



# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

## UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

### CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Mezclas asfálticas. Caracterización y Ensayos de Materiales Utilizados en la  
Ciudad de Cuenca.

### TRABAJO DE TITULACIÓN O PROYECTO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**AUTOR: CHRISTIAN ANDRÉS YANZA PÉREZ**

**DIRECTOR: CÉSAR HUMBERTO MALDONADO NOBOA**

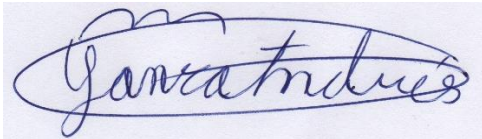
**CUENCA-ECUADOR**

**2020**

*Yo me gradúe en  
los 50 años de La Cato!  
... y sostuve la Universidad*

## DECLARACIÓN:

Yo, Yanza Pérez Christian Andrés, declaro bajo juramento que el trabajo descrito es de mi autoría, que no ha sido anteriormente presentado por ningún grado o calificación profesional, y que he consultado la totalidad de las referencias bibliográficas que se incluyen en este proyecto, y eximo a la UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.



---

**Autor:** Yanza Pérez Christian Andrés

**C.I.:**0105793673

## CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Paola Delgado Garzón

**COORDINADORA DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN DE LA CARRERA DE  
INGENIERÍA CIVIL.**

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación denominado **“MEZCLAS ASFÁLTICAS. CARACTERIZACIÓN Y ENSAYOS DE MATERIALES UTILIZADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA”**, realizado por YANZA PEREZ CHRISTIAN ANDRÉS ha sido revisado y orientado durante su ejecución, por lo que certifico que el presente documento, se sujeta a las normas éticas de investigación, por lo que está expedido para su sustentación.

**Cuenca, Septiembre del 2020**



Ing. César Maldonado Noboa

Docente Tutor

## DEDICATORIA

A Dios por estar siempre presente en mi vida, siendo mi guía espiritual en el camino recorrido hasta el momento y en el que me resta por recorrer. A mis padres, quienes con su esfuerzo, sacrificio y dedicación han forjado en mí el ser que soy actualmente. A toda mi familia, quienes siempre estuvieron presentes en los momentos de dificultad, con palabras de aliento y apoyo para nunca perderme en el camino hacia mis objetivos.

## EPÍGRAFE

*“Es verdad que no siempre es posible hacer lo que deseamos. Sin embargo, nada se consigue a menos que lo deseemos.”*

Masashi Kishimoto

## AGRADECIMIENTO

Por su paciencia, comprensión, confianza y apoyo, a toda mi familia que de una u otra manera, han influido en el cumplir con esta meta. A todos los profesionales de la educación que a lo largo de mi formación académica han compartido sus conocimientos para que pueda lograr este objetivo tan anhelado de convertirme en profesional.

## RESUMEN

La calidad de los materiales utilizados en la construcción de una obra civil, es un indicador principal de su resistencia. Cuando de diseño y construcción de una estructura de un pavimento se trata, la calidad se verifica con la aplicación de ensayos de laboratorio o de campo antes, durante y después de la ejecución del proyecto; los resultados de los ensayos contribuirán a garantizar que las capas de pavimento funcionen adecuadamente durante la vida útil del proyecto. Todas las acciones, permitirán verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño durante la ejecución y permitirán estudiar y garantizar las características de durabilidad, resistencia, trabajabilidad, de la obra una vez que su construcción haya terminado y la misma esté en funcionamiento. A nivel mundial existen varias normativas encargadas de especificar las diferentes directrices a cubrir para el desarrollo de ensayos en pavimentos, siendo las más reconocidas las normas AASHTO y ASTM, sirviendo estas generalmente como guía para la elaboración de normas dentro de cada país.

Este trabajo investigativo presenta análisis y características de las mezclas asfálticas y los materiales que lo componen, la descripción de los equipos necesarios para ensayar muestras en laboratorio o en campo y la descripción de los ensayos necesarios de aplicación por parte de la “Norma Ecuatoriana Vial” para la identificación de las diferentes características de los materiales granulares, material bituminoso y la mezcla entre ellos. Adicionalmente se realiza una comparación entre ensayos descritos en el capítulo tres con la “Norma del Instituto Nacional de Vías de Colombia”, identificando semejanzas y diferencias entre ellas en cuanto a: descripción del ensayo, muestreo, equipos e insumos, procedimientos de ensayos y cálculos.

**PALABRAS CLAVE:** MATERIALES GRANULARES, ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, MEZCLAS ASFÁLTICAS, ENSAYOS, CALIDAD DE MATERIALES.

## ABSTRACT

The quality of the materials used in the construction of civil work is the main indicator of its resistance. When it comes to the design and construction of a pavement structure, the quality is verified with the application of laboratory or field tests before, during, and after the execution of the project; the results of the tests will help to ensure that the pavement layers function properly during the life of the project. All actions will make it possible to verify compliance with the design specifications during the execution and will allow studying and guaranteeing the characteristics of durability, resistance, and workability of the work once its construction has finished and it is in operation. Globally, there are several regulations whose purpose is to specify the different guidelines to be covered for the development of tests on pavements, being the most recognized the AASHTO and the ASTM standards, these generally serving as a guide for the development of standards within each country.

This research work presents analysis and characteristics of the asphalt mixtures and the materials that compose it, the description of the equipment necessary to test samples in the laboratory or the field and the description of the necessary application tests by the "Ecuadorian Road Standard" for the identification of the different characteristics of granular materials, bituminous material, and the mixture between them. Additionally, a comparison is made between tests described in chapter three with the "Norm of the National Roads Institute of Colombia", identifying similarities and differences between them in terms of description of the test, sampling, equipment and supplies, test procedures, and calculations.

**KEYWORDS:** GRANULAR MATERIALS, FLEXIBLE PAVEMENTS, ASPHALT MIXTURES, FIELD TESTS, MATERIALS QUALITY.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Formulación del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificación .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>5</b>
1.4.1	Objetivo General.....	5
1.4.2	Objetivos Específicos .....	5
<b>1.5</b>	<b>Ubicación y área de influencia de la investigación .....</b>	<b>7</b>
1.5.1	Ubicación del área de influencia.....	7
1.5.2	Descripción del área de influencia.....	8
1.5.3	Descripción y Georreferenciación de las diferentes minas y plantas asfálticas .....	9
<b>1.6</b>	<b>Materiales Granulares. Descripción .....</b>	<b>11</b>
1.6.1	Muestreo del agregado para superficies de rodadura .....	13
1.6.1.1	Método del cuarteo de muestras.....	14
1.6.1.2	Muestreo de material bituminoso .....	15
<b>1.7</b>	<b>Diseño de Pavimentos .....</b>	<b>15</b>
1.7.1	Método ASSHTO-93 .....	17
1.7.1.1	Índice de serviciabilidad del pavimento .....	19
1.7.1.2	Tráfico.....	19
1.7.1.3	Suelos de Fundación.....	21
1.7.1.4	Materiales de construcción .....	23
1.7.2	Guía AASHTO para el diseño de Estructuras de Pavimentos .....	25
	Ahuellamiento: .....	25
	Pérdida de agregados: .....	25
	Drenaje: .....	26
	Espesores mínimos para las capas: .....	27
<b>1.8</b>	<b>Mezclas asfálticas. Diseño .....</b>	<b>28</b>
1.8.1	Mezclas bituminosas en caliente .....	30
1.8.1.1	Capas de rodadura de mezcla bituminosa .....	31
1.8.1.2	Hormigón asfáltico mezclado en planta y en frío.....	32
1.8.2	Capas de rodadura básicas según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013): .....	33
1.8.2.1	Capa granular .....	33
1.8.2.2	Suelo estabilizado con material bituminoso .....	34
1.8.2.3	Capa de hormigón asfáltico mezclado en sitio.....	35
1.8.2.4	Capa de rodadura de hormigón asfáltico en caliente .....	37
1.8.2.5	Tratamientos bituminosos superficiales .....	43
1.8.3	Diseño de mezclas asfálticas.....	52
1.8.3.1	Densidad.....	52
1.8.3.2	Vacíos de aire, o simplemente vacíos .....	53
1.8.3.3	Vacíos en el agregado mineral (VMA) .....	53
1.8.3.4	Contenido de asfalto .....	54
1.8.3.5	Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas.....	55

1.8.3.6	Evaluación y ajustes en el diseño de la mezcla .....	60
1.8.3.7	Pruebas en mezclas asfálticas .....	62
1.8.3.8	Método Marshall para el Diseño de Mezclas Asfálticas .....	64
1.8.3.9	Método Hveem de Diseño de Mezclas Asfálticas.....	76
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO 2: ENSAYOS DE LABORATORIO. EQUIPOS .....</b>	<b>84</b>
<b>2.1</b>	<b>Descripción general de los equipos.....</b>	<b>85</b>
2.1.1	Equipo multiusos automático ensayos CBR – Marshall .....	85
2.1.1.1	Descripción .....	85
2.1.1.2	Instalación .....	86
2.1.1.3	Seguridad.....	87
2.1.1.4	Software .....	89
2.1.1.5	Ensayos.....	89
2.1.1.6	Calibración.....	92
2.1.2	Molde de estabilidad .....	92
2.1.2.1	Descripción .....	92
2.1.3	Máquina de los ángeles .....	93
2.1.3.1	Descripción .....	93
2.1.3.2	Instalación .....	93
2.1.3.3	Seguridad.....	94
2.1.3.4	Contador.....	95
2.1.4	Equipo para ensayos RICE.....	96
2.1.4.1	Descripción .....	96
2.1.4.2	Seguridad.....	96
2.1.4.3	Ensayos.....	97
2.1.5	Mesa vibratoria.....	98
2.1.5.1	Descripción .....	98
2.1.6	Equipo para ensayo de flotabilidad .....	99
2.1.6.1	Descripción .....	99
2.1.7	Canasta para densidades .....	99
2.1.7.1	Descripción .....	99
2.1.8	Horno eléctrico programable digital.....	99
2.1.8.1	Descripción .....	99
2.1.8.2	Instalación .....	100
2.1.8.3	Seguridad.....	101
2.1.9	Baño maría inoxidable digital .....	102
2.1.9.1	Descripción .....	102
2.1.9.2	Instalación .....	102
2.1.10	Tamizadora eléctrica para finos .....	102
2.1.10.1	Descripción .....	102
2.1.10.2	Instalación .....	104
2.1.10.3	Seguridad.....	104
2.1.10.4	Operación .....	105
2.1.11	Extractor Centrífugo de asfaltos de 1500g.....	105
2.1.11.1	Descripción .....	105
2.1.11.2	Instalación .....	106
2.1.11.3	Seguridad.....	106
2.1.11.4	Ensayos.....	107
2.1.12	Moldes para briquetas de asfalto .....	109
2.1.12.1	Descripción .....	109
2.1.13	Pedestal de compactación Marshall .....	110

2.1.13.1	Descripción .....	110
2.1.13.2	Instalación .....	110
2.1.13.3	Ensayos.....	110
2.1.13.4	Seguridad.....	111
2.1.14	Martillo de compactación Marshall .....	111
2.1.14.1	Descripción .....	111
2.1.15	Viga Benkelman .....	112
2.1.15.1	Descripción.....	112
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO 3: ENSAYOS DE LABORATORIO. PROCEDIMIENTOS.....</b>	<b>113</b>
<b>3.1</b>	<b>Generalidades .....</b>	<b>114</b>
3.1.1	Pruebas de Extracción.....	114
3.1.2	Pruebas de análisis granulométrico.....	115
3.1.3	Pruebas de análisis de estabilidad y densidad.....	115
<b>3.2</b>	<b>Ensayos .....</b>	<b>116</b>
3.2.1	Granulometría.....	116
3.2.1.1	Generalidades .....	116
3.2.1.2	Equipos.....	118
3.2.1.3	Muestreo.....	119
3.2.1.4	Ensayo .....	122
3.2.1.5	Cálculos .....	126
3.2.1.6	Informe de resultados .....	127
3.2.2	Límite Líquido .....	129
3.2.2.1	Generalidades .....	129
3.2.2.2	Equipos.....	130
3.2.2.3	Muestreo.....	133
3.2.2.4	Ensayo .....	133
3.2.2.5	Cálculos .....	135
3.2.2.6	Informe de resultados .....	137
3.2.3	Índice de plasticidad .....	138
3.2.3.1	Generalidades .....	138
3.2.3.2	Instrumentos .....	140
3.2.3.3	Preparación de la Muestra .....	140
3.2.3.4	Ensayo .....	141
3.2.3.5	Cálculos .....	142
3.2.3.6	Informe de resultados .....	145
3.2.4	Índice de Vacíos .....	146
3.2.4.1	Generalidades .....	146
3.2.4.2	Equipos.....	146
3.2.4.3	Calibración.....	148
3.2.4.4	Muestreo.....	149
3.2.4.5	Ensayo .....	149
3.2.4.6	Cálculos .....	151
3.2.4.7	Informe de resultados .....	153
3.2.5	Adherencia.....	154
3.2.5.1	Generalidades .....	154
3.2.5.2	Equipos.....	154
3.2.5.3	Muestreo.....	155
3.2.5.4	Ensayo .....	155
3.2.5.5	Cálculos .....	156

3.2.5.6	Informe de resultados .....	157
3.2.6	Partículas Planas, Alargadas o Planas y Alargadas .....	158
3.2.6.1	Generalidades .....	158
3.2.6.2	Equipos .....	159
3.2.6.3	Muestreo .....	160
3.2.6.4	Ensayo .....	161
3.2.6.5	Cálculos .....	163
3.2.6.6	Informe de resultados .....	163
3.2.7	Partículas fracturadas (angularidad) .....	164
3.2.7.1	Generalidades .....	164
3.2.7.2	Equipos .....	166
3.2.7.3	Muestreo .....	168
3.2.7.4	Ensayo .....	171
3.2.7.5	Cálculos .....	173
3.2.7.6	Informe de resultados .....	177
3.2.8	Equivalente de arena .....	178
3.2.8.1	Generalidades .....	178
3.2.8.2	Equipos .....	179
3.2.8.3	Muestreo .....	181
3.2.8.4	Ensayo .....	182
3.2.8.5	Cálculos .....	184
3.2.8.6	Informe de resultados .....	184
3.2.9	Relación de Soporte de California (CBR) .....	185
3.2.9.1	Generalidades .....	185
3.2.9.2	Equipos .....	186
3.2.9.3	Muestreo .....	188
3.2.9.4	Ensayo .....	189
3.2.9.5	Cálculos .....	192
3.2.9.6	Informe de resultados .....	194
3.2.10	Prueba Marshall .....	195
3.2.10.1	Generalidades .....	195
3.2.10.2	Equipos .....	196
3.2.10.3	Muestreo .....	198
3.2.10.4	Ensayo .....	198
3.2.10.5	Cálculos .....	203
3.2.10.6	Informe de resultados .....	204
3.2.11	Desgaste de los Ángeles .....	205
3.2.11.1	Generalidades .....	205
3.2.11.2	Equipos .....	206
3.2.11.3	Muestreo .....	208
3.2.11.4	Ensayo .....	209
3.2.11.5	Cálculos .....	211
3.2.11.6	Informe de resultados .....	212
3.2.12	Densidad .....	213
3.2.12.1	Generalidades .....	213
3.2.12.2	Equipos .....	216
3.2.12.3	Muestreo .....	218
3.2.12.4	Ensayo .....	220
3.2.12.5	Cálculos .....	224
3.2.12.6	Informe de resultados .....	228
3.2.13	Inmersión - Compresión .....	229
3.2.13.1	Generalidades .....	229

3.2.13.2	Equipos .....	229
3.2.13.3	Muestreo .....	230
3.2.13.4	Ensayo .....	231
3.2.13.5	Cálculos .....	232
3.2.13.6	Informe de resultados .....	233
3.2.14	Compactación .....	234
3.2.14.1	Generalidades .....	234
3.2.14.2	Equipos .....	235
3.2.14.3	Muestreo .....	237
3.2.14.4	Corrección de sobredimensionamiento .....	238
3.2.14.5	Ensayo .....	239
3.2.14.6	Cálculos .....	240
3.2.14.7	Informe de resultados .....	242
3.2.15	Durabilidad .....	243
3.2.15.1	Generalidades .....	243
3.2.15.2	Equipos .....	244
3.2.15.3	Reactivos .....	245
3.2.15.4	Muestreo .....	246
3.2.15.5	Ensayo .....	248
3.2.15.6	Cálculos .....	251
3.2.15.7	Informe de resultados .....	251
3.2.16	Resistencia al deslizamiento .....	253
3.2.16.1	Generalidades .....	253
3.2.16.2	Equipos .....	253
3.2.16.3	Muestreo .....	258
3.2.16.4	Ensayo .....	259
3.2.16.5	Cálculos .....	261
3.2.16.6	Informe de resultados .....	262
3.2.17	Contenido de asfalto por extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos .....	264
3.2.17.1	Generalidades .....	264
3.2.17.2	Equipos .....	265
3.2.17.3	Muestreo .....	266
3.2.17.4	Ensayo .....	267
3.2.17.5	Cálculos .....	271
3.2.17.6	Informe de resultados .....	271
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS. COMPARACIÓN DE NORMAS .....</b>	<b>272</b>
<b>4.1</b>	<b>Granulometría .....</b>	<b>273</b>
<b>4.2</b>	<b>Límite Líquido .....</b>	<b>275</b>
<b>4.3</b>	<b>Índice de Plasticidad .....</b>	<b>277</b>
<b>4.4</b>	<b>Índice de Vacíos .....</b>	<b>278</b>
<b>4.5</b>	<b>Adherencia .....</b>	<b>279</b>
<b>4.6</b>	<b>Partículas Planas, Alargadas o Planas y Alargadas .....</b>	<b>281</b>
<b>4.7</b>	<b>Partículas Fracturadas .....</b>	<b>282</b>
4.7.1	Agregado fino .....	282

4.7.2	Agregado grueso .....	283
<b>4.8</b>	<b>Equivalente de Arena .....</b>	<b>285</b>
<b>4.9</b>	<b>Relación Soporte de California (CBR) .....</b>	<b>287</b>
<b>4.10</b>	<b>Prueba Marshall .....</b>	<b>290</b>
<b>4.11</b>	<b>Desgaste de los Ángeles .....</b>	<b>292</b>
<b>4.12</b>	<b>Densidad .....</b>	<b>293</b>
<b>4.13</b>	<b>Inmersión - Compresión .....</b>	<b>295</b>
<b>4.14</b>	<b>Compactación.....</b>	<b>296</b>
<b>4.15</b>	<b>Durabilidad.....</b>	<b>302</b>
<b>4.16</b>	<b>Resistencia al Deslizamiento.....</b>	<b>304</b>
<b>4.17</b>	<b>Contenido de asfalto .....</b>	<b>306</b>
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO 5: OBSERVACIONES, CONCLUSIONES Y ANEXOS .....</b>	<b>307</b>
<b>5.1</b>	<b>Observaciones .....</b>	<b>308</b>
<b>5.2</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>310</b>
<b>5.3</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>312</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>322</b>

### Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Canteras ubicadas dentro del sector "El Descanso". Fuente: Google Earth, (2020) .....	10
Ilustración 2. Planta de asfaltos de la Municipalidad de Cuenca. Fuente: Google Earth, (2020).....	10
Ilustración 3. Planta de asfaltos ASFALTAR EP. Fuente: Google Earth, (2020) .....	11
Ilustración 4. Capas que conforman un pavimento flexible. Fuente: Luis Guillermo Loria.....	11
Ilustración 5. Método del cuarteo para la toma de muestras. Fuente: Instituto de Asfalto (2005) .....	14
Ilustración 6. Pirámide de determinación de contenido óptimo de asfalto. Fuente: Instituto de Asfalto (2005).....	83

Ilustración 7. Tablero de indicación y control del equipo multiusos automático para ensayos CBR-Marshall. Fuente: Pinzuar LTDA (2002) .....	88
Ilustración 8. Partes del contador digital de la máquina de los ángeles. Fuente: Pinzuar (2002).....	96
Ilustración 9. Drenaje para sello y máximo nivel de agua del vaso recolector en el equipo de ensayos RICE. Fuente: Pinzuar (2002).....	97
Ilustración 10. Partes del tablero de la tamizadora. Fuente: Pinzuar.....	103
Ilustración 11. Copa de Casagrande. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981).....	131
Ilustración 12. Acanaladores. Dimensiones normadas. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981) .....	132
Ilustración 13. Representación gráfica del ensayo de límite líquido. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981) .....	135
Ilustración 14. Dimensiones de una partícula de agregado. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) .....	159
Ilustración 15. Dispositivo Calibrador utilizado en el ensayo de determinación de partículas planas. Fuente: (ASTM International, 2010) .....	160
Ilustración 16. Calibrador A. Fuente: (ASTM International, 2010) .....	162
Ilustración 17. Calibrador B. Fuente: (ASTM International, 2010) .....	163
Ilustración 18. Partículas fracturadas: bordes agudos, superficies rugosas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) .....	175
Ilustración 19. Partículas fracturadas: bordes agudos, superficies lisas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) .....	175
Ilustración 20. Partículas fracturadas: bordes redondeados, superficies rugosas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) .....	176

Ilustración 21. Partícula fracturada flaqueada por dos partículas no fracturadas (solo desportilladas).  
 Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) ..... 176

Ilustración 22. Partículas no fracturadas: bordes redondeados, superficies lisas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) ..... 176

Ilustración 23. Partículas no fracturadas: partículas redondeadas, superficies lisas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) ..... 177

Ilustración 24. Correcciones a la curva de penetración. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) ..... 193

Ilustración 25. Requisitos que deberá cubrir la máquina de los Ángeles. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) ..... 207

Ilustración 26. Forma de trabajo del péndulo. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) ..... 254

Ilustración 27. Brazo de péndulo. Ensayo de Resistencia al deslizamiento. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) ..... 255

Ilustración 28. Partes del péndulo. Ensayo de resistencia al deslizamiento. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) ..... 256

Ilustración 29. Gráfica para corrección del coeficiente de resistencia al deslizamiento. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)..... 262

Ilustración 30. Diferencia de cierre de ranura en el ensayo de LL para las normas ecuatoriana y colombiana..... 275

Ilustración 31. Aparato de enrollamiento para ensayo de determinación del LP e IP. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) ..... 278

## DEFINICIONES

**Absorción:** según lo indicado por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010), la absorción se define como el aumento en la masa de un agregado, provocado por la penetración de agua a través de sus poros durante cierto tiempo. La absorción no toma en cuenta el agua que queda en la superficie de las partículas.

**Árido Fino:** Según la norma NTE INEN 694 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010), los áridos finos están conformados por las partículas de árido que luego de un análisis granulométrico para su clasificación, pasan por el tamiz de 9.5mm (3/8") y de esta porción de la muestra, su mayoría atraviesa el tamiz de 4.75mm (N°4) y se retiene en el tamiz 75µm (N°200).

**Árido Grueso:** Basando la definición en la norma NTE INEN 694 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010), el árido grueso será el conformado por todos los agregados cuya composición queda retenida en el tamiz 4.75mm (N°4).

**Asfalto:** Material aglomerante o cementante formado por betún natural u obtenido del petróleo mediante destilación.

**Ahuellamiento:** Formación de surcos en el pavimento debido a la carga generada por los vehículos que circulan por la vía; pueden causarse por consolidación, movimiento lateral de las capas de la estructura del pavimento, efectos del tráfico o deslizamientos superficiales. La compactación juega un importante papel para evitar este efecto en las vías.

**Bachada:** es un conjunto de materiales para preparación de cierta cantidad de mezcla asfáltica preparada en un ciclo de mezclado.

**Coefficiente de Fricción Dinámico:** en función de lo descrito por el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016), el coeficiente de fricción dinámico consiste en la relación entre la resistencia al deslizamiento y la fuerza normal a la superficie de deslizamiento.

**Compactación:** Compresión de un determinado material con el fin de disminuir su volumen. En las capas asfálticas, la mala compactación genera ahuellamientos. Se puede definir también a la compactación según el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), como el aumento de densidad de una determinada capa o suelo a través de la compresión de la misma con medios mecánicos.

**Densidad:** Grado de solidez que una mezcla asfáltica puede llegar a alcanzar con la compactación, es decir, con la eliminación de vacíos entre partículas de agregado. Se expresa como una masa por unidad de volumen de un material ( $\text{kg/m}^3$ ).

**Densidad aparente:** se define como la masa por unidad de volumen de las partículas impermeables de una muestra de agregado.

**Densidad Máxima de Laboratorio:** el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017) la define como el peso unitario máximo obtenido al compactar una muestra en un laboratorio a través de un ensayo proctor estándar o proctor modificado.

**Densidad Relativa:** valores adimensionales obtenidos de la correlación entre dos densidades: la de un material determinado y del agua destilada a una temperatura específica.

**Densidad Relativa Aparente:** este valor es el resultado de relacionar la densidad aparente del árido con la densidad del agua destilada a cierta temperatura.

**Durabilidad:** básicamente es la propiedad que le permite a una mezcla asfáltica no desintegrarse bajo efectos ambientales y de tráfico.

**Estabilidad:** es la capacidad de la capa superior de una estructura de asfalto para resistir las deformaciones provocadas por la actuación de las diferentes cargas que soporta la vía.

**Estructura de pavimento:** Son el conjunto de capas que conforman el cuerpo de la vía (subbase, base y superficie de rodadura) y que se asientan sobre una subrasante previamente preparada.

**Exudación superficial fuerte, moderada y leve:** Según lo indica el (Instituto de Asfalto, 2005), la exudación superficial se define como la aparición de una película de asfalto sobre la superficie del pavimento, causado por el exceso de material bituminoso en una mezcla asfáltica. Se considera fuerte si la cantidad de asfalto exudada provoca burbujas superficiales o deformación en una probeta durante un ensayo luego de compactada la muestra, es moderada si el material bituminoso exudado causa que un papel se pegue a la superficie y no permite que la probeta se deforme y se considera leve si en la superficie se observa solamente un ligero lustre.

**Flexibilidad:** Propiedad de los pavimentos asfálticos que les permite adaptarse a los asentamientos; esta propiedad se mejora con contenidos altos de material bituminoso en la mezcla.

**Galga:** instrumento de metal con espesores normados, utilizado para la comprobación de medidas de cotas pequeñas.

**Gravedad Específica Bulk:** Consiste en relacionar el peso en el aire a una misma temperatura, entre el volumen de agregado y un volumen igual de agua destilada sin gas.

**Impermeabilidad:** Capacidad de una mezcla asfáltica para permitir o negar el paso tanto de aire como de agua hacia el interior de la misma o hasta las capas inferiores a ésta.

**Masa unitaria (peso volumétrico) del árido:** expresada en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) define al peso volumétrico como la masa por unidad de volumen que corresponde al árido total, es decir, volumen de las partículas individuales más el volumen de vacíos entre ellas.

**Material de préstamo:** son los materiales que se utilizan en construcciones civiles y que no son propios de la zona de ejecución del proyecto, sino que provienen de lugares distintos. Estos materiales tienen la función de cumplir con especificaciones técnicas y funciones detalladas en cierto proyecto y que los materiales locales no pudieran cubrir.

**Mezcla bituminosa en caliente:** es el resultado de la mezcla de áridos con un ligante y aditivos, cuya consistencia final luego del proceso de fabricación (calentamiento del ligante y áridos), muestra partículas de áridos cubiertas completamente por una película de ligante.

**Mezcla bituminosa de alto módulo:** Consiste en una mezcla bituminosa en caliente cuyo módulo dinámico supera los 11000MPa a temperaturas de 20°C.

**Mezcla bituminosa discontinua en caliente:** Mezcla bituminosa en caliente que se utiliza dentro del diseño de pavimentos como superficie de rodadura; sus áridos están dispuestos en discontinuidad granulométrica muy acentuada. Todos los áridos que conforman esta mezcla, presentan un diámetro inferior al del árido grueso.

**Número Estructural (SN):** según (AASHTO, 1993), es “un número abstracto que expresa la resistencia estructural de un pavimento requerido para combinaciones dadas de soporte del suelo ( $M_R$ ), tráfico total expresado en cargas por eje simple equivalente de 18kips, serviciabilidad terminal y medio ambiente.”

**Ondulaciones y Desplazamientos:** Las ondulaciones como su nombre lo dice, consiste en la aparición de “ondas” en la capa de rodadura de la vía debidas a movimientos plásticos; los desplazamientos de igual forma, son movimientos plásticos que se expresan en la vía como pandeos locales en la capa de rodadura, Se pueden generar por las acciones vehiculares o por un mal diseño de la mezcla en cuanto a la estabilidad.

**Pavimento flexible:** estructura construida por capas granulares no tratadas y una capa superior de mezcla bituminosa con un espesor máximo de 15cm.

**Pavimento:** basados en la norma NEVI del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), el pavimento es una estructura que en obras civiles está formada por una o más capas, diseñadas para soportar cargas repetitivas actuantes en su superficie y transmitir las tensiones hasta la subrasante durante toda la vida útil del proyecto vial (generalmente, 20 años), por lo que su diseño será de tal forma que las fuerzas y tensiones actuantes, no superen las admisibles.

**Penetración:** Característica que mide la consistencia, estabilidad o solidez de un material bituminoso mediante la inserción vertical de una aguja patrón sobre una muestra, con condiciones determinadas de carga, tiempo y temperatura. Su valor se enuncia en unidades de distancia, en décimas de milímetro (0.1mm).

**Polución:** Según la (Real Academia Española, 2014), la polución es la contaminación del medio ambiente (generalmente aire y/o agua) que se genera por los residuos provenientes de la actividad humana o procesos industriales o biológicos.

**Resistencia a la fatiga:** Capacidad del pavimento para aguantar flexiones repetitivas que pudieren llegar a generar la circulación vehicular sobre la vía. Mientras mayor sea el contenido de material bituminoso, mayor será esta capacidad.

**Resistencia al deslizamiento:** Capacidad de la capa superficial del pavimento para resistir el deslizamiento o resbalamiento de los neumáticos de los automotores cuando dicha superficie se encuentre mojada.

**Riego de imprimación:** Según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), el riego de imprimación es la “aplicación de un ligante hidrocarbonado sobre una capa granular, previa a la colocación sobre ésta de una capa bituminosa”.

**Sistema de pavimentos multicapa:** es un sistema de pavimentos en el que se puede llegar a ahorrar ligantes y en cuanto a su desempeño, tienen gran resistencia mecánica e impermeabilidad, al mismo tiempo que muestra características antideslizantes muy favorables.

**Vacíos:** Son los espacios restantes (vacíos) en una mezcla asfáltica previamente compactada.

**Vida útil:** período de tiempo para el cual la obra fue diseñada y durante el cual la estructura del pavimento no deberá presentar degradaciones generalizadas.

**Volumen de vacíos:** Cantidad total de espacios vacíos en una mezcla asfáltica compactada.

## ABREVIATURAS

**AASHTO:** American Association of State Highway and Transportation Officials; traducido: Asociación Americana de Autoridades de Vialidad y Transporte de los Estados Unidos.

**AID:** Área de Influencia Directa.

**AII:** Área de Influencia Indirecta.

**CBR:** Californian Bearing Ratio; traducido: Ensayo de Relación de Soporte de California.

**CKE:** Equivalente Centrífugo de Kerosene.

**ESAL's:** Equivalent Simple Axial Load; traducido: Carga Axial Simple Equivalente.

**INEN:** Instituto Ecuatoriano de Normalización.

**IP:** Índice de Plasticidad.

**LL:** Límite Líquido.

**MTOP:** Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador.

**MC:** Asfaltos Diluidos de Curado Medio.

**NEVI:** Norma Ecuatoriana Vial.

**NE:** Número Estructural de Diseño.

**PSI:** Pavement Serviceability Index; traducido: Índice de Serviciabilidad del Pavimento.

**RC:** Asfaltos Diluidos de Curado Rápido.

**SC:** Asfaltos Diluidos de Curado Lento.

**SSS:** Superficie Seca Saturada.

**SUCS:** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

**TFOT:** Thin Film Oven Test; traducido: Ensayo en Horno sobre Película Delgada.

**TPDA:** Tráfico Promedio Diario Anual.

**VFA:** Vacíos Llenos con Asfalto.

**VMA:** Vacíos en el Agregado Mineral.

## **CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES**

El presente capítulo contiene los diferentes objetivos que en el desarrollo del documento se pretenden cumplir, se analiza el área de influencia directa e indirecta, se describen los materiales granulares y tipos de superficies de rodadura y se presenta el diseño de pavimentos flexibles y mezclas asfálticas.

## 1.1 Introducción

Constantemente las sociedades buscan la mejora e innovación de sus canales de comunicación. En cuanto a las obras civiles, las carreteras toman un papel muy importante en lo anteriormente mencionado y en el desarrollo de la sociedad ya que un buen sistema vial puede traducirse en importación y exportación de productos, desarrollo del turismo, seguridad de conductores y peatones, etc. Se puede decir entonces, que el desarrollo depende de que la obra civil se ejecute siguiendo los respectivos lineamientos de calidad, mismos que se verifican con la ejecución de ensayos tanto a los materiales que conforman la obra así como a la obra en sí una vez esta haya concluido su etapa de construcción. Un buen control de calidad se traduce a un proyecto duradero, resistente, confiable, seguro, con una vida útil adecuada y con pocos requerimientos de mantenimiento. El desarrollo de los ensayos requiere el uso de equipos e insumos para la toma y preparación de muestras y ejecución de ensayos, por lo cual se deberá asegurar la calidad y buen estado de dichos equipos para confiar en los resultados obtenidos en cada ensayo. El presente documento indica puntos tales como: descripción, instalación, calibración, dimensiones, requerimientos, entre otras características de los equipos e insumos utilizados en cada ensayo. Los ensayos de laboratorio o de campo pueden ser descritos en varias normativas, siendo necesario para el caso de este documento el uso de la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) para la determinación y descripción de los diferentes ensayos aplicables a los materiales que conforman las capas del pavimento flexible. Posterior a su descripción y desarrollo, los ensayos son comparados con los descritos por la Norma del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS-13), identificando entre estas las semejanzas y diferencias en cuanto a: descripción, equipos, muestreo, desarrollo del ensayo y cálculos posteriores al ensayo.

## 1.2 Formulación del problema

La Ingeniería Civil evoluciona constantemente y busca cada día la creación, planificación, construcción y mantenimiento de obras capaces de soportar las adversidades climáticas y de uso de estas, claro está, a sabiendas de que la calidad del producto final, va de la mano con las características de los materiales y técnicas constructivas utilizados. Las pruebas de laboratorio y de campo para asfaltos, son pruebas que nos permiten la determinación de las características mecánicas, trabajabilidad y rendimiento del material analizado. Específicamente en el caso de los asfaltos, hay varias pruebas o ensayos para la determinación de su calidad, por lo que la necesidad de contar con una guía de ensayos es importante. Para nuestro país existe la “Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12)”, en donde se describen de manera general los procedimientos a realizarse en cada ensayo. En base a esto, se determina nuestro interés en la “personalización” de una guía práctica de laboratorio que se centre en los equipos disponibles y por adquirir dentro de las instalaciones del laboratorio de asfaltos de la Universidad Católica de Cuenca, teniendo en cuenta sus características, capacidades, modo de uso, etc.

### 1.3 Justificación

Inicialmente, el desarrollo de este documento estaba centrado en la elaboración de una guía de laboratorio de asfaltos basada en la práctica, es decir, se pretendía describir todos los aspectos importantes para cada ensayo luego de ejecutar cada uno de estos en las instalaciones de la Universidad Católica de Cuenca, específicamente, en su laboratorio de asfaltos. La práctica permitiría obtener datos para su posterior presentación en cuanto a: descripción, equipos, desarrollo del ensayo, cálculos y presentación de resultados. Debido a los problemas mundiales acontecidos en el lapso de tiempo en el cual el presente documento estaba en desarrollo, se vio la necesidad obligatoria de cambiar este objetivo general por un objetivo factible de ejecución, acordando que el presente documento se justifique mediante la realización de una comparación de ensayos descritos en dos normas en específico: la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) y la norma del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS-13). El eje central de este documento consiste en describir los ensayos mediante la aplicación de la norma ecuatoriana para posteriormente comparar dichos ensayos con los descritos por la norma colombiana, identificando sus semejanzas importantes y sus diferencias.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Elaborar una guía de ensayos de laboratorio de asfaltos que permita identificar, caracterizar, describir, ensayar y obtener resultados referentes a la calidad de los materiales utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas, así como en las mezclas asfálticas mismas, basando la información en revisiones bibliográficas y comparaciones entre la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 y Normas del Instituto Nacional de Vías de Colombia INVIAS.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar el área sobre la cual el presente documento tenga influencia directa e indirecta y su afectación sobre las mismas.
- Describir las mezclas asfálticas con los materiales que las conforman y los procedimientos a seguir para su diseño.
- Describir los tipos de capas de rodadura según la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12.
- Especificar las características (descripción, calibración, instalación, uso, mantenimiento, etc.) de los diferentes equipos utilizados en la ejecución de ensayos de caracterización de materiales.
- Exponer la metodología para la obtención de muestras de los materiales a analizar en función de los ensayos.
- Describir los ensayos de determinación de calidad y características mecánicas de diferentes muestras con la aplicación de la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12).
- Describir los procedimientos a seguir para la ejecución de cada ensayo de caracterización de materiales y mezclas asfálticas.

- Comparar las normas de ejecución de ensayos descritas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas NEVI-12 y por el Instituto Nacional de Vías de Colombia INVIAS.
- Exponer recomendaciones y conclusiones sobre los procedimientos y resultados de los ensayos anexando, para ciertos casos, formatos de presentación de resultados.

## **1.5 Ubicación y área de influencia de la investigación**

### **1.5.1 Ubicación del área de influencia**

Se describe al área de influencia según (Integral: Ingenieros Consultores, 2015), como la zona o espacio geográfico sobre la cual tendrá influencia de manera directa o indirecta la aplicación de un proyecto, generando impactos positivos y negativos, lo cual afecta a medios abióticos, bióticos y/o socioeconómicos. El área de influencia directa (AID) puede ser definido como el lugar sobre el cual existe afectación por parte de los impactos generados con la realización de las actividades del proyecto; dichos impactos actuarán sobre los diferentes medios ya mencionados que forman parte de un espacio. El área de influencia indirecta (AII) por su parte, comprende el territorio que sobrepasa al área de influencia directa, teniendo sobre la misma la presencia de impactos sobre sus diferentes medios.

En función de estas definiciones, se procede a la determinación del área de influencia. La ejecución del proyecto servirá para que en el futuro estudiantes de la Universidad Católica de Cuenca, específicamente de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, obtengan las bases necesarias para el manejo de los equipos de laboratorio de asfaltos en función del ensayo que requieran ejecutar; por tal motivo, se deduce que este proyecto tendrá afectación principalmente dentro del cantón Cuenca y de la parroquia Ricaurte, ambas ubicadas en la provincia del Azuay, Ecuador, ya que son los sitios sobre los cuales se asientan las edificaciones actuales y sobre los cuales se construirán las futuras infraestructuras para el área de educación superior de la Universidad Católica de Cuenca.

De esta manera se especifica que el Área de Influencia Directa está conformado por la superficie comprendida dentro de los límites políticos o geográficos de la parroquia Ricaurte y se extiende

hasta la ciudad de Cuenca con el área delimitada por las calles, General Torres, teniente Hugo Ortiz, Padre Aguirre y la Avenida de las Américas.

El cubrimiento de la carrera de Ingeniería Civil dentro de la educación superior, es brindado por varias universidades a nivel nacional, teniendo un determinado número de estas en lugares cercanos al AID del proyecto, tanto en el cantón Cuenca, como en el cantón Azogues; un punto a tener en cuenta también, es la necesidad de obtención de materiales para la realización de las diferentes pruebas, siendo para este caso necesaria la localización de las diferentes minas y plantas asfálticas cercanas al AID; esta extensión que cubre la ubicación de todas las universidades del cantón Cuenca y la Universidad Católica de Cuenca sede Azogues, conjuntamente con la región conformada por las minas y plantas asfálticas, forman la superficie perteneciente al Área de Influencia Indirecta.

### **1.5.2 Descripción del área de influencia**

#### **Ciudad de Cuenca**

Según (EcuRed, 2018), Santa Ana de los Cuatro Ríos de Cuenca es la tercera ciudad más grande del Ecuador, a más de ser conocida como la capital de la provincia del Azuay y reconocida también como la capital cultural del Ecuador y declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por parte de la UNESCO; basado en (Climate-Data.Org, 2018) y ocupando una superficie de 122Km<sup>2</sup> y ubicada a una altura de 2550m.s.n.m., la ciudad de Cuenca cuenta con un clima primaveral, alternando durante el día y la tarde entre nubosidades y tiempos soleados, es decir, tiene un clima cálido y templado en el transcurso del año, las temperaturas en la ciudad de Cuenca varían entre 7°C y 19°C.

La ubicación geográfica de la ciudad de Cuenca, se describe en base a (IGM, 2017), teniendo en cuenta el Sistema de Coordenadas Geográficas y el cálculo de coordenadas basado en el Sistema Geodésico Mundial Estándar WGS84. La ciudad de Cuenca se localiza en las coordenadas de latitud: 2°54'2" S y longitud: 79°0'16.3" O; del mismo modo, en cuanto a sus coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), se ubica en la zona 17S 721648.60m E; 9679243.42m S.

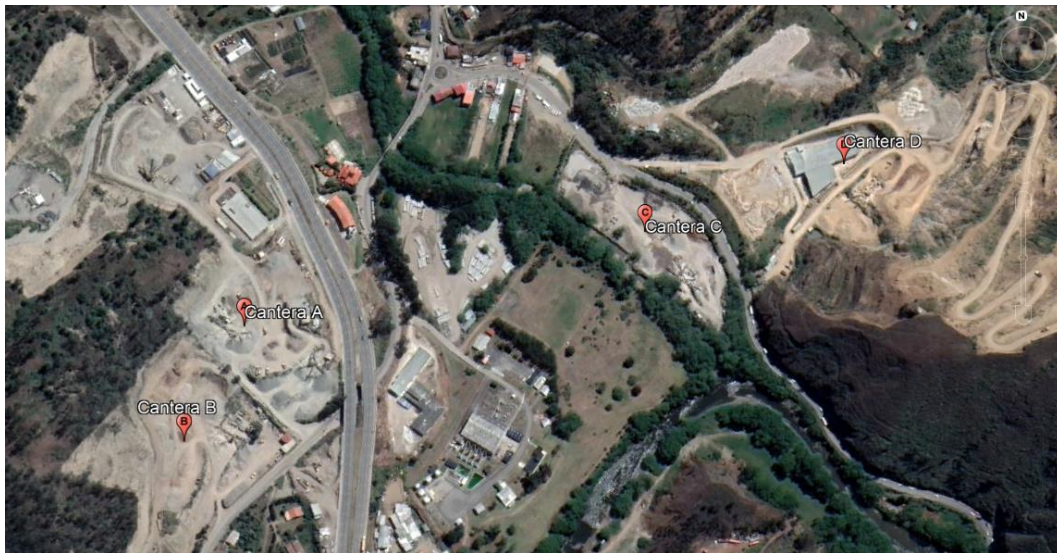
### **1.5.3 Descripción y Georreferenciación de las diferentes minas y plantas asfálticas**

Para el desarrollo del presente documento, se busca el apoyo de diferentes minas ubicadas en el sector “El Descanso”, específicamente, de cuatro de ellas para la obtención de algunos materiales a ser ensayados en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Católica de Cuenca.

Las coordenadas de ubicación de las mismas son: Cantera A: 735899.22m E, 9686158.47m S, Cantera B: 735806.28m E, 9686058.29m S, Cantera C: 736385.35m E, 9686267.92m S y finalmente Cantera D: 736623.80m E, 9686341.92m S. El apoyo se logra mediante respuesta de solamente una de las canteras en mención, con la facilitación de muestras de material de Base y Subbase.

En cuanto a las plantas asfálticas se localizaron dos existentes dentro del área de influencia, solicitando de igual manera su apoyo. Se obtuvo respuesta positiva de parte de una de ellas mediante la facilitación de muestras de agregados para las mezclas asfálticas y material bituminoso.

La localización geográfica de las plantas asfálticas son las siguientes: ASFALTAR EP: 748270.33m E, 9677995.32m S y Planta asfáltica de la Municipalidad de Cuenca: 735100.53m E, 9685655.85m S



*Ilustración 1. Canteras ubicadas dentro del sector "El Descanso". Fuente: Google Earth, (2020)*



*Ilustración 2. Planta de asfaltos de la Municipalidad de Cuenca. Fuente: Google Earth, (2020)*



Ilustración 3. Planta de asfaltos ASFALTAR EP. Fuente: Google Earth, (2020)

## 1.6 Materiales Granulares. Descripción

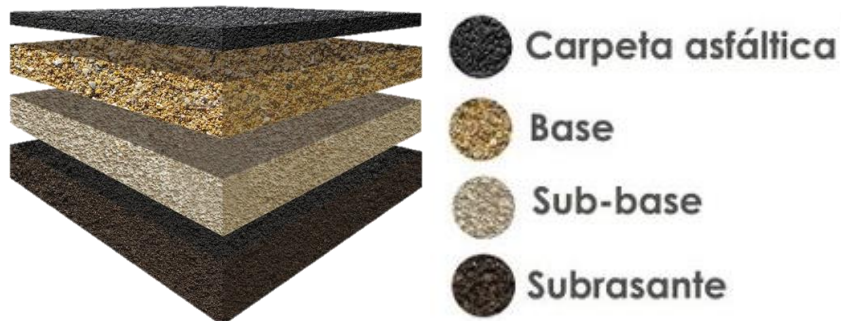


Ilustración 4. Capas que conforman un pavimento flexible. Fuente: Luis Guillermo Loria

En primera instancia y según (Instituto Nacional de Vías Colombia, 2007), se dice que los materiales podrán ser de origen natural o en su defecto, pueden proceder de la trituración de rocas y/o gravas. Se debe tener en cuenta que el material triturado resulta de mejor calidad que el natural debido a las caras que se forman en el producto final luego de la trituración, lo cual es beneficioso en lo que a adherencia respecta. Es importante controlar que los materiales cumplan con

características de dureza, resistencia y durabilidad, controlando que las partículas que los conforman sean las adecuadas; claro está, todo dependerá de las condiciones de diseño y el uso que se le vaya a dar a la vía.

El manual (AASHTO, 1993) describe ciertas características para los materiales granulares:

**Capa de subbase:** Se ubica entre la subrasante y la capa de base. Es una capa de material granular compactado, cuyos requerimientos son menos estrictos en cuanto a características de resistencia, plasticidad y gradación (en comparación con la capa de base), no obstante, su calidad deberá superar mayormente a la calidad del suelo de fundación; estudios indican que la colocación de una capa de subbase permite el diseño de pavimentos económicos cuando la subrasante es pobre, pero en algunos casos, la capa de subbase puede ser omitida, siempre y cuando la calidad de la subrasante sea alta y lo permita.

**Capa de base:** Se ubica por debajo de la capa superior del pavimento y por encima de la capa de subbase (si la misma está considerada en el diseño) o superficie de rodadura. Cumple con la función de soporte estructural y generalmente se conforma de material triturado (piedra, escoria o grava) y arena o diferentes combinaciones entre estos; también puede mezclarse con cemento portland, cal, asfalto y cenizas volantes en función de los requerimientos de soporte estructural que dicte el diseño. La capa de base tiene altos requerimientos de resistencia, plasticidad y gradación.

**Superficie de rodadura:** La capa de rodadura se forma por una mezcla de agregados minerales y materiales bituminosos y se coloca habitualmente sobre la capa de base; además de ser parte esencial de la estructura del pavimento, el diseño de esta, indica que debe: ser resistente a la abrasión provocada por del tráfico, permitir la reducción del agua superficial (misma que puede

llegar a ingresar a las capas inferiores del pavimento), lograr obtener una superficie lisa, resistente al patinaje de los neumáticos. Su calidad depende de que tan buena sea la gradación de agregados y del porcentaje de material bituminoso utilizado, por lo que el garantizar su óptimo desarrollo dependerá del uso de procedimientos de diseño de laboratorio. Lo más común en la superficie de rodadura, es que se utilicen materiales granulares con tamaños de alrededor de 1 pulgada.

### 1.6.1 Muestreo del agregado para superficies de rodadura

El (Instituto de Asfalto, 2005), indica que para la elaboración de los respectivos análisis de laboratorio a los agregados utilizados en una mezcla asfáltica, se seleccionarán una cantidad específica de materiales en función del tamaño de la partícula; se recomienda que las muestras sean tomadas directamente de la banda de alimentación con la aplicación del método del cuarteo y no de la pila o tolva. El método del cuarteo se puede usar también en el caso en el que la muestra seleccionada requiera ser reducida para tener una mejor trabajabilidad. A continuación se presenta las recomendaciones de muestreo:

Tamaño máximo nominal de partículas (porcentaje que pasa)		Peso mínimo de muestras de campo	
mm	N°	lb	kg
<b>Agregado fino</b>			
2.36	N°8	10	5
4.75	N°4	10	5
<b>Agregado grueso</b>			
9.5	3/8plg	10	5
12.5	1/2plg	20	10
19.0	3/4plg	30	15
25.0	1plg	50	25
37.5	1 1/2plg	70	30
50.0	2plg	90	40
63.0	2 1/2plg	100	45
75.0	3plg	125	60
90.0	3 1/2plg	150	65

Tabla 1. Tamaños recomendados de muestras de agregados. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

### 1.6.1.1 Método del cuarteo de muestras

El procedimiento utilizado para el cuarteo de muestras es muy simple; para su desarrollo se necesita la disposición de dos implementos: tela para cuarteo y una vara. Los pasos a seguir serán:

- a) Vaciar el contenido de la muestra inicialmente tomada sobre la tela de cuarteo,
- b) Con la ayuda de la vara se nivela la muestra,
- c) Introducir la vara por debajo de la tela (aproximadamente por la mitad de la muestra) y levantar de extremo a extremo para dividir la muestra,
- d) Repetir el procedimiento (c) para lograr la división de la muestra en cuatro partes (cuarteo) y finalmente,
- e) Tomar como la nueva muestra a los materiales ubicados en dos extremos diagonales. A continuación se representa gráficamente estos procedimientos:

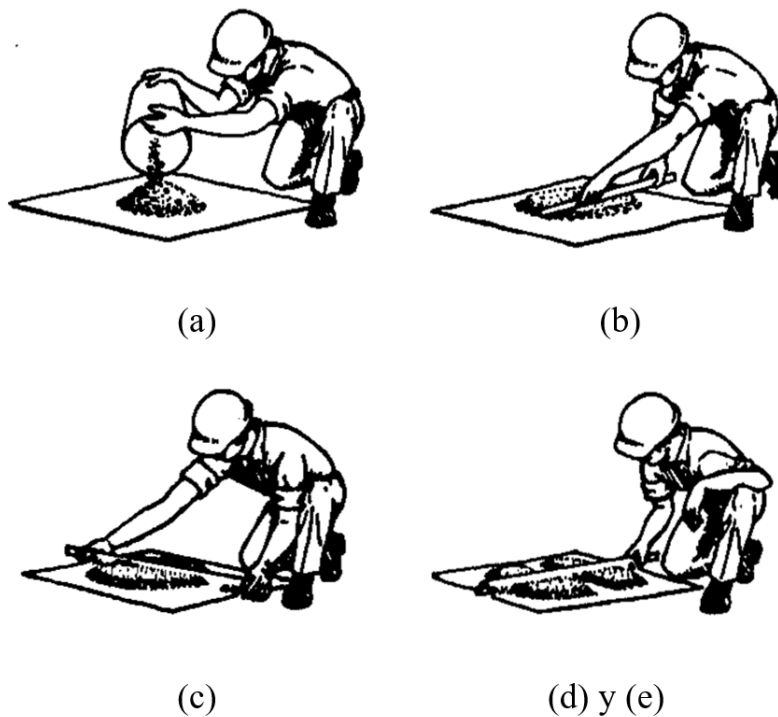


Ilustración 5. Método del cuarteo para la toma de muestras. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

### **1.6.1.2 Muestreo de material bituminoso**

Esta muestra se toma directamente del tanque o sitio de almacenamiento a través de las válvulas de muestreo que como su nombre lo indica, fueron diseñadas para que la muestra tomada, sea representativa. Se deberán tener en cuenta las siguientes directrices:

- a) Los recipientes para la toma de la muestra deberán presentarse limpios, secos y nuevos,
- b) Antes de tomar la muestra, se hará drenar al menos un litro de material bituminoso a través de la válvula con el fin de limpiarla y asegurar que la muestra tomada representa las características de todo el material bituminoso existente en el cargamento,
- c) Las tapas de los recipientes deberán también ser nuevas, secas y limpias y con un método de sellado mediante rosca
- d) En caso de derrames, se limpiarán los recipientes con un tramo seco y limpio (nunca húmedo o con contenido de solvente),
- e) Marcar los recipientes (no las tapas) para su futura identificación y finalmente,
- f) Tomar todas las medidas de seguridad que permitan el manejo, transporte y almacenamiento del material bituminoso caliente; usar equipos tales como: guantes, máscara, camisa de manga larga, etc.

## **1.7 Diseño de Pavimentos**

Cuando de diseño de pavimentos se trata, se deben tener en cuenta algunos puntos importantes tales como: el tránsito, el clima, disposición de materiales y estudio de subrasante. Con estas consideraciones técnicas, se asegura que las vías cumplan con su periodo de vida útil, convirtiéndose en la base del progreso social y económico de determinada población en función a un correcto diseño de las subbases, bases y pavimentos.

Tal como lo especifica el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su volumen 2B, se podrán utilizar dos métodos en el diseño de pavimentos flexibles: el primero conocido como Método AASHTO versión 1993 y el segundo que lleva el nombre de “Guía AASHTO para el diseño de Estructuras de Pavimentos”; este último fue creado por un grupo de ingenieros consultores que realizaron ajustes a la Guía AASHTO 1972 luego de su revisión.

AASHTO es una asociación estadounidense sin fines de lucro formada por integrantes de los Departamentos de Carreteras y Transporte de los 50 estados, el Distrito de Columbia y Puerto Rico. Esta asociación representa a todos los métodos de transporte, siendo estos: aéreos, terrestres, ferroviarios y acuáticos, en lo que se refiere tanto a transporte público como privado y centra su objetivo en fomentar el desarrollo, ejercicio y sostenimiento del sistema nacional integrado de transporte.

Debido a la importancia de sus aportes, “AASHTO es líder internacional en el establecimiento de estándares técnicos para todas las fases del desarrollo del sistema de carreteras” ya que expone normas muy acertadas para el diseño, construcción de carreteras y puentes y estudio de los materiales de construcción para estas obras civiles. El tiempo y dedicación que esta empresa invierte en la calidad de sus aportes, se evidencian con los resultados de aplicar sus mencionadas normas, por lo que está bien justificada la frase de Jim Tymon, Director Ejecutivo (AASHTO, 2018): “AASHTO es una gran asociación. Creo en los problemas que defendemos y me encanta trabajar para los departamentos estatales. Ellos son los que construyen, operan y mantienen las Instalaciones que son la columna vertebral de nuestro sistema de transporte”

### 1.7.1 Método ASSHTO-93

Tal como lo especifica (AASHTO, 1993), los principios de este método de diseño, se basan principalmente en encontrar el número estructural (SN), valor encargado de soportar la carga. Este valor está en función del objetivo del proyecto vial. Algunas de las consideraciones que se tienen en este método son: manera de proceder del pavimento, tránsito sobre la vía, suelo de asentamiento de la vía, materiales de construcción, medio ambiente, avenamiento, nivel de confianza de la vía, costos, ciclo de vida y diseño de bermas.

Además, se tienen en cuenta ciertas variables tales como: módulo de resiliencia, periodo de diseño, PSI, pérdida del PSI, número total de ejes simples equivalentes, nivel de confianza y desviación estándar. La guía en cuestión especifica que la experiencia juega un papel importante en el diseño de pavimentos, ya que los materiales y el medio ambiente pueden variar, es decir, la guía no puede abarcar todas las condiciones que presente el sitio de ejecución de un proyecto vial.

Para el caso de los pavimentos flexibles, la guía AASHTO-93 plantea ecuaciones básicas de diseño de la siguiente manera:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R * S_0 + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}(M_R) - 8.07$$

En donde:

$W_{18}$  – Número previsto de aplicaciones de carga por eje simple equivalente a 18kip

$Z_R$  – Desviación estándar normal

$S_0$  – Error estándar combinado de la predicción del tráfico y comportamiento de la estructura

$\Delta PSI$  – Diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial de diseño  $P_0$  y el final de diseño  $P_t$

$M_R$  – Módulo de resiliencia en psi (libras por pulgada cuadrada)

El cálculo de SN se puede realizar de dos maneras, utilizando los nomogramas de diseño para pavimentos flexibles (Anexo a) o con el uso de la siguiente fórmula, teniendo en cuenta tres variables:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

En donde:

$a_i$  – Coeficiente de la capa  $i$

$D_i$  – Espesor de la capa  $i$

$m_i$  – Coeficiente de drenaje de la capa  $i$

Una vez calculado el número estructural (SN), éste necesita ser convertido a espesores de capa de rodadura, base y subbase a través de los coeficientes de capa que se expresan a continuación y que simbolizan la resistencia relativa de los materiales de construcción:

CAPA	COEFICIENTE
Concreto asfáltico de superficie	0.44
Base de piedra triturada	0.14
Subbase o grava arenosa	0.11

Tabla 2. Valores promedio de coeficientes para materiales. Fuente: AASHTO-93

Los coeficientes que se acaban de mencionar, basan su determinación en los valores del módulo de resiliencia y de esfuerzos o deformaciones de un sistema de pavimentos multicapa.

Para la aplicación de las fórmulas descritas, es necesario describir algunas de las características que deben cumplir ciertas variables, lo cual se presenta a continuación:

#### ***1.7.1.1 Índice de serviciabilidad del pavimento***

Este valor se obtiene de las medidas de rugosidad y daños que pudieren causarse al pavimento durante su vida útil. La importancia de la rugosidad, hace que sea necesaria la aplicación de un método rentable y confiable para su determinación a través de la revisión histórica del comportamiento del pavimento. Se sabe sin embargo, que la consideración de los daños al pavimento durante su vida útil afecta de manera poco significativa al PSI, por lo que la mayoría de diseñadores se basan solamente en la rugosidad para determinar la calidad de transitabilidad.

La guía AASHTO recomienda que el valor de índice de serviciabilidad inicial  $P_0$  se tome como 4.2 en caso de los pavimentos flexibles, siempre y cuando no se cuenten con valores más confiables basados en la experiencia; para el caso del índice de serviciabilidad final  $P_t$  se recomienda usar valores de 2.5 ó 3.0 para carreteras principales y de 2.0 en carreteras de menor importancia. El índice de serviciabilidad terminal puede llegar incluso a un valor de 1.5 en los casos en los que la economía local requiera gastos iniciales bajos.

#### ***1.7.1.2 Tráfico***

Específicamente, nuestro punto de interés en cuanto al tráfico es la carga por eje, configuración por ejes y número de aplicaciones. Estos valores deben figurar como un número de cargas por eje simple equivalente de 18kip y se sumarán durante todo el periodo de diseño. La norma NEVI del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), contiene las siguientes ecuaciones para el cálculo del número de ejes equivalentes:

$$Nt_0 = 365 * FE * TPDA_0$$

$$Nt = \int_0^t Nt_0(1+r)^x dx$$

Reemplazando los límites de integración y el valor de  $Nt_0$ , se obtiene:

$$Nt = Nt_0 \left[ \frac{(1+r)^x - 1}{Ln(1+r)} \right]_0^t$$

Ahora, la distribución de vehículos por carriles se realiza en función de la siguiente tabla:

Número de Carriles	Porcentaje de Vehículos Pesados en el Carril de Diseño
2	50
4	45
6 o más	40

Tabla 3. Distribución de vehículos por número de carriles. Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013))

Otra manera de determinar el número acumulado de ejes equivalentes, resulta de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$Nt_0 = 365 * FE * TPDA_0 \left[ \frac{(1+r)^t - 1}{Ln(1+r)} \right] * \frac{A}{100} * \frac{B}{100}$$

En las presentes fórmulas se observa:

$Nt_0$  – Número de ejes equivalentes inicial

$FE$  – Factor de equivalencia de carga

$TPDA_0$  – Tráfico promedio diario anual inicial

$Nt$  – Número de ejes equivalentes al final del período de diseño

$r$  – Tasa de crecimiento vehicular general o por tipo de vehículo

$t$  – Período de diseño

$A$  – Porcentaje estimado de vehículos pesados (buses y camiones)

$B$  – Porcentaje de vehículos pesados que emplean el carril de diseño

### **1.7.1.3 Suelos de Fundación**

Éste se define gracias a su módulo de resiliencia, mismo que expresa la propiedad elástica del suelo, basando su medición en algunas características no lineales.

#### **1.7.1.3.1 Módulo de Resiliencia**

Tal como se describe por (Pérez, Garnica, González, Curiel, & Ruiz, 2016), el módulo de resiliencia es el resultado de relacionar el esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) con la deformación recuperable ( $\varepsilon_r$ ) de una prueba triaxial. La determinación del módulo de resiliencia parte de datos de ensayos de laboratorio y es una medida de la elasticidad del suelo; para el caso de diseño de pavimentos flexibles, no es necesario realizar modificaciones a su valor, siendo diferente para el caso de los pavimentos rígidos, en donde resulta preciso convertirlo a un módulo de relación de la subrasante ( $k$ ). El módulo resiliente es internacionalmente utilizado como el principal método de caracterización de materiales empleados en el diseño de pavimentos ya que ayuda a predecir la rugosidad, el agrietamiento, el ahuellamiento, escalonamiento, entre otros factores.

Actualmente, no todos los laboratorios cuentan con el equipo necesario para la determinación del módulo de resiliencia por lo que ciertos estudios permiten su determinación a partir del análisis de CBR, del valor-R (indicador de la resistencia al calor de una capa de material) y de los valores obtenidos en ensayos de propiedades de índice de suelo (formas, tamaños, densidades, etc., de las partículas de suelo analizado).

Algunos de los métodos de determinación del módulo de resiliencia a partir del CBR son los siguientes:

Para (Heukelom & Klomp, 1962), luego de usar compactación dinámica y módulos in-situ del suelo, la correlación de los valores de CBR, permite obtener la siguiente relación, útil cuando los suelos son de graduación fina con un CBR sumergido de 10% o menos y corresponden a la densidad de campo esperada:

$$M_R(\text{psi}) = 1500 * CBR$$

Esta relación se realizó a partir de datos que van entre 750 y 3000 veces el CBR.

La Norma Ecuatoriana Vial del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), especifica la ecuación anterior junto a otras, en función de rangos de CBR, como se muestra a continuación:

$$MR = 1500 * CBR \quad \text{cuando } CBR < 10\%$$

$$MR = 3000(CBR)^{0.65} \quad \text{cuando } 10\% < CBR < 20\%$$

$$MR = 4326 * \ln(CBR) + 241 \quad \text{cuando los suelos son granulares}$$

Para el caso en el que se utiliza en valor-R en correlación con el CBR, el Instituto de Asfalto ha desarrollado la siguiente ecuación:

$$M_R(\text{psi}) = \frac{A}{B} * (\text{valor} - R)$$

En donde:

$A$  – varía de 772 a 1155

$B$  – varía de 369 a 555

La normativa AASHTO propone también una ecuación que permite determinar el módulo de resiliencia para suelos de graduación fina en caso de que los diseñadores no desarrollen sus propias relaciones, misma que se expresa a continuación:

$$M_R = 1000 + 555 * (valor - R)$$

#### **1.7.1.4 Materiales de construcción**

Generalmente existen tres tipos de pavimentos: los rígidos, los flexibles y los compuestos; este proyecto se centra únicamente en el estudio de los pavimentos flexibles, mismos que están conformados primeramente por un suelo de fundación o subrasante sobre el cual se asienta la subbase, posteriormente la base y finalmente la capa de rodadura. La subbase, base y capa superficial o capa de rodadura fueron descritas en el punto 1.4 del presente documento, por lo que en este punto, se describirá solamente el suelo de fundación.

##### **1.7.1.4.1 Suelo de fundación o subrasante:**

Según (Ramos, 2014), es una capa de suelo preparado mediante compactación en función de la densidad especificada. La subrasante puede estar formada únicamente por el terreno natural sobre el cual se asentará la vía o puede conformarse por una capa de material de préstamo adecuado; de lo descrito dependen los costos de diseño, construcción y mantenimiento vial, ya que si el terreno existente (subrasante) asegura estabilidad, durabilidad y correcto comportamiento estructural del pavimento, bastará con asegurar su compactación, caso contrario se apreciará la necesidad de: sustituir el suelo mediante movimientos de tierra o mejorar el mismo técnicamente.

Debido a que esta capa servirá como soporte para la estructura del pavimento y a que de su calidad depende el espesor del mismo, durante el diseño la subrasante tendrá que sectorizarse y evaluarse (cada sector) en cuanto a sus propiedades mecánicas, físicas, químicas, de rigidez e

hidráulicas, tanto en campo como en laboratorio. La determinación de la calidad de la subrasante puede ser basada en ensayos de CBR, y clasificada a su vez en seis categorías (ver tabla siguiente), tal como lo indica el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2013b), 2013):

<b>Categoría</b>	<b>Calidad</b>	<b>CBR</b>
S0	Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1	Subrasante Pobre	3% < CBR < 5%
S2	Subrasante Regular	6% < CBR < 10%
S3	Subrasante Buena	11% < CBR < 19%
S4	Subrasante Muy Buena	20% < CBR < 29%
S5	Subrasante Excelente	CBR > 30%

*Tabla 4. Calidad de la subrasante. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2013b), 2013)*

A más del CBR, se deben tomar en cuenta las características de: distribución granulométrica del agregado, plasticidad, porcentaje de equivalente de arena, índice de grupo, humedad y clasificación de los suelos. Si la calidad de la subrasante es igual a una Subrasante Regular o mayor, se le puede considerar a la misma como apta para el diseño vial, mientras que si su calidad es menor a la de una Subrasante Regular, puede aplicarse la estabilización de suelos, la cual tiene como objetivo mejorar las propiedades físicas del suelo, logrando optimizar su resistencia mecánica con la incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos, llegando así a obtener estabilizaciones: suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto, etc.

Cuando se pretenda seleccionar el tipo de estabilizador, el (U.S Army Corps of Engineers, 1991), recomienda como guía, la utilización de la tabla ubicada en el presente documento como Anexo b, en donde se indica la mejor opción de mejoramiento en función de la clasificación que el método SUCS le dé al suelo.

## 1.7.2 Guía AASHTO para el diseño de Estructuras de Pavimentos

Como ya se mencionó y tal como lo indica la norma NEVI del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), esta guía, es el resultado de la revisión del Método AASHTO-93, por lo cual únicamente se agregan algunas consideraciones en cuanto al diseño de pavimentos:

**Ahuellamiento:** se considera solamente en caminos con superficie de grava. La profundidad permitida para dichos caminos generalmente varía de 1 a 2 pulgadas.

**Pérdida de agregados:** esto ocurre por el tráfico y la erosión, lo cual provoca el adelgazamiento de la superficie de rodadura y por lo tanto, disminuye su capacidad de soportar cargas. Para evitar esto, es necesario considerar en el diseño: el espesor que podría llegar a perderse en los agregados que se perderán y el espesor mínimo de agregados requerido para que la superficie de rodadura se mantenga trabajando durante su vida útil. Para el cálculo de la pérdida de agregados se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$GL = 0.12 + 0.1223(LT)$$

$$GL = (B/25.4)/(0.0045LADT + \frac{3380.6}{R} + 0.467G)$$

En donde:

GL = pérdida total de agregados en pulgadas.

LT = número de camiones cargados en miles.

B = número de operaciones de nivelación (con motoniveladora) durante el período de tiempo en consideración.

LADT = tráfico diario promedio en el carril de diseño (para caminos de una sola vía, usar el tráfico total en ambas direcciones).

R = radio promedio de las curvas en pies.

G = valor absoluto de la pendiente en porcentaje.

Para el caso de caminos con poca actividad de camiones, y cuando se pretenda determinar la pérdida de grava, es recomendable la utilización de la siguiente fórmula:

$$AGL = [T^2 / (T^2 + 5Q)] \times f(4.2 + 0.092T + 0.889R^2 + 1.88VC)$$

En donde:

AGL = pérdida anual de agregados en pulgadas

T = volumen de tráfico anual en ambas direcciones en miles de vehículos

R = precipitación pluvial anual en pulgadas

VC = porcentaje de gradiente promedio en el camino

f = 0.037 para gravas lateríticas

0.043 para gravas cuarcíticas

0.028 para gravas volcánicas

0.059 para gravas coralíferas

**Drenaje:** Esto depende de las características ambientales referentes al sitio en donde se construirá la vía y dependerá del diseñador identificar la calidad que el mismo debe tener en condiciones ambientales desfavorables. El correcto diseño del drenaje evita o minimiza los efectos

que el hinchamiento de suelos expansivos puede provocar en la estructura del pavimento. La calidad de drenaje se clasifica como sigue:

Calidad de Drenaje	Tiempo de Remoción de Agua
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	No drena

Tabla 5. Calidad del drenaje de una vía. Fuente: AASHTO (1993)

Ya se mencionó anteriormente que los coeficientes de drenaje son utilizados en la ecuación que determina el valor de  $SN$ , por lo que basados en (AASHTO, 1993), se especifican los valores de  $m_i$ , mismos que al estar en función de la eficacia de drenaje y del porcentaje de tiempo por el cual la estructura de la vía se encuentra expuesta a humedad durante el transcurso de un año, se expresan como sigue:

Valores de $m_i$ recomendados para los Coeficientes de Capa Modificados de Materiales de Base y Subbase no Tratada en Pavimentos Flexibles				
Calidad del drenaje	% de Tiempo que la Estructura del Pavimento está Expuesta a Niveles de Humedad Cercanos a la Saturación			
	< 1	1 - 5	5 - 25	> 25
<b>Excelente</b>	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
<b>Bueno</b>	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
<b>Regular</b>	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80
<b>Pobre</b>	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
<b>Muy pobre</b>	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Tabla 6. Valores recomendados para  $m_i$ . Fuente: AASHTO (1993)

**Espesores mínimos para las capas:** Cumpliendo con todas las especificaciones que nos brinda la guía (AASHTO, 1993), se puede llegar a determinar el NE para una estructura de pavimento flexible; posterior a esto es necesaria la identificación de los grosores de las capas que conforman el pavimento aplicando la siguiente fórmula:

$$NE = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

Seguidamente se presenta una tabla con las cantidades mínimas de espesor para cada capa del pavimento en función del tráfico ESAL's (que hace referencia al número de ejes equivalentes de 18kips en un período de tiempo específico):

<b>Espesores Mínimos (en pulgadas)</b>		
<b>Tráfico ESAL's</b>	<b>Concreto Asfáltico</b>	<b>Base de Agregados</b>
Menos de 50000	1.0 (o tratamiento superficial)	4
50001 – 150000	2.0	4
150001 – 500000	2.5	4
500001 – 2000000	3.0	6
2000001 – 7000000	3.5	6
Mayor que 7000000	4.0	6

*Tabla 7. Espesores mínimos para las capas de la estructura de pavimento. Fuente: AASHTO (1993)*

## **1.8 Mezclas asfálticas. Diseño**

En la parte anterior, se presentaron algunas peculiaridades que deben rescatar los materiales de construcción para pavimentos. A continuación se presentarán varias características que deben cumplir las mezclas asfálticas y sus materiales de construcción para ser usadas en proyectos, así como también se describirá el proceso para su diseño.

Al hablar de agregados para mezclas en planta, se sabe que los mismos se componen de partículas de: piedra o grava triturada o piedra en estado natural y/o arena; estos agregados serán fragmentos limpios, resistentes, duros y sin materia orgánica; los agregados se clasifican en 3 tipos según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017):

- **Agregados tipo A:** todas las partículas del agregado grueso son el producto de la trituración de piedra. El agregado fino se conformará por arena natural o material triturado, pudiéndose en casos específicos, agregar relleno mineral para que el agregado cumpla con las exigencias plasmadas en el contrato de un proyecto.

- **Agregados tipo B:** este tipo de agregados, se conforma con al menos 50% de partículas provenientes de trituración (agregado grueso). Se permite que el agregado fino y el relleno mineral sean de origen natural o provenientes de trituración.
- **Agregados tipo C:** estos agregados proceden de depósitos naturales o trituración, dependiendo de las capacidades y disponibilidad de la región.

Para su empleo, será necesario que los agregados se encuentren totalmente secos, y en caso de que esto no se pueda obtener, se instalarán secadores de aire que logren que la humedad de los agregados no sobrepase el 1% al final del mezclado. Hablando específicamente del agregado grueso, se dice que su desgaste deberá ser menor o igual al 40% una vez transcurridos 500 giros en la máquina de los ángeles (ensayo de abrasión). La plasticidad aceptada para el material que pase a través del tamiz N°40 (0.425mm), es de menos de 4. En cuanto a su durabilidad, los agregados deberán mantenerse íntegros y, en caso de desintegración, se aceptará un máximo de 12% tras someterse a 5 periodos de sumersión y limpieza en sulfato de sodio. El componente bituminoso deberá permanecer en al menos el 95% de la superficie de los agregados luego de realizado el ensayo de peladura (Norma AASHTO T-182).

Para el caso de los agregados finos, su angularidad será igual al porcentaje de vacíos de aire contenidos en la parte de la muestra que pasa el tamiz INEN 2.36mm; dicho porcentaje no podrá ser inferior al 45%. Las pruebas referentes a equivalente de arena se realizarán a los materiales que atraviesen el tamiz INEN 4.75mm y para el caso de capas de rodadura para tráfico livianos y medianos, se aceptará como mínimo un valor de 45 y para el caso de tráfico pesado, este valor será como mínimo de 50.

Los agregados deberán verificar su calidad granulométrica mediante su aprobación en los ensayos de granulometría establecidos en las normas INEN 696 y 697. Sus pesos específicos cubrirán las especificaciones descritas en las normas INEN 856 y 857 y finalmente, su peso unitario se determinará a través del ensayo descrito en la norma INEN 584.

Pasando al estudio de las mezclas asfálticas, y cuando estas se prevean utilizar como superficie para circulación de vehículos pesados, en su diseño de buscará cumplir con una relación entre los porcentajes de dos factores: peso del agregado que atraviesa el tamiz de 75 $\mu$ m y contenido de asfalto en peso del total de la mezcla (relación filler/betún), sea superior o igual a 0.8, pero sin superar a 1.2. Según se especifique en el contrato, la mezcla asfáltica deberá cumplir con una de las graduaciones siguientes:

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4
25.4mm (1")	100	-	-	-
19.0mm (3/4")	90-100	100	-	-
12.7mm (1/2")	-	90-100	100	-
9.5mm (3/8")	56-80		90-100	100
4.75mm (N°4)	35-65	44-74	55-85	80-100
2.36mm (N°8)	23-49	28-58	32-67	65-100
1.18mm (N°16)	-	-	-	40-80
0.60mm (N°30)	-	-	-	25-65
0.30mm (N°50)	5-19	5-21	7-23	7-40
0.15mm (N°100)	-	-	-	3-20
0.075mm (N°200)	2-8	2-10	2-10	2-10

Tabla 8. Graduaciones de agregados para mezclas asfálticas. Fuente: MTOP (2017)

### 1.8.1 Mezclas bituminosas en caliente

El primer punto a tomar en cuenta, es la temperatura y clima en estío de la zona delimitada para el proyecto; de esto dependerá la selección del material bituminoso así como su dosificación. Es importante la aplicación de un riego de imprimación por debajo de la capa de mezcla bituminosa

que se prevea emplear. La Norma NEVI del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), nos brinda valores apropiados que deben tener las capas de material bituminoso para lograr que una estructura de pavimento sea firme:

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Categoría de Tráfico Pesado		
		T0 a T1	T2 a T3	T4
Rodadura	PA	4	4	
	M	3	2-3	2-3
	F		2-3	2-3
	D y S		6-5	5
Intermedia	D y S	5-10 (*)	5-10 (*)	5-10 (*)
Base	S y G	7-15	7-15	7-15
	MAM	7-13		

PA – Mezclas bituminosas drenantes  
M y F – Mezclas bituminosas discontinuas en caliente  
D, S y G – Mezclas bituminosas en caliente  
MAM – Mezclas bituminosas de alto módulo  
(\*) – Salvo en espaldones, para los cuales se tienen otros espesores

Nota: espesores especificados en *cm*.

Tabla 9. Espesor mínimo de capas de mezcla bituminosa. Fuente: MTOP (2017)

Esto deberá cumplirse a menos que especialistas demuestren mediante estudios que muestren resultados similares o mejores con la aplicación de capas de menor grosor. Cuando en la estructura vial sea necesario colocar un número de capas de mezcla bituminosa superior a uno, la capa inferior será siempre mayor o igual a la superior en espesor.

### 1.8.1.1 Capas de rodadura de mezcla bituminosa

En la tabla anterior se indicaron las diferentes capas bituminosas que pueden formar parte de la superficie de rodadura de la estructura de pavimento. Continuando con lo descrito por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), las mezclas PA se utilizan únicamente en carreteras que no vayan a exponerse a nieve ni hielo durante su vida útil, con accesos pavimentados, TPDA's mayores a 5000 vehículos/día y régimen de lluvia constante.

Los pavimentos PA no se utilizarán en zonas cuya altitud supere los 1200msnm ni zonas pluviométricas poco lluviosas, a menos que se justifique su aplicación; este tipo de mezcla deberá cumplir una longitud mínima de 500m. Las mezclas drenantes podrán usarse en zonas con TPDA mayor a 10000 vehículos/día, justificando su construcción con la mejora de seguridad y comodidad durante tiempos de lluvia; se deberá asegurar que las características climáticas, de trazado y tráfico, evidencien las ventajas de su uso.

### ***1.8.1.2 Hormigón asfáltico mezclado en planta y en frío***

Es una mezcla utilizada como superficie de rodadura, cuyos agregados cumplirán con las respectivas especificaciones en cuanto a granulometría. Contendrán relleno mineral y de ser preciso, asfalto emulsionado. Su colocación se realizará sobre una capa de base debidamente estabilizada y compactada o sobre una superficie de rodadura ya existente. Para este tipo de mezcla, se utilizarán agregados con tamaño nominal de 1/2" (todo el material deberá pasar por el tamiz 3/4"); la granulometría se verificará con la aplicación de la norma INEN 696 de manera periódica para certificar el cumplimiento en cuanto a calidad de los agregados.

Una vez preparada la mezcla, se realizarán análisis de calidad a muestras de hormigón emulsionado mediante el ensayo Marshall Modificado. Durante la distribución de la mezcla en la obra, se tomarán datos de espesor de la capa de rodadura cada cierta longitud de vía (se especificará en los planos del proyecto), verificando que dicho valor no varíe en más de 6mm de acuerdo al detallado en el diseño, comprobando además que en ningún caso el promedio de todos los datos tomados sea menor al establecido para la obra.

## 1.8.2 Capas de rodadura básicas según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013):

### 1.8.2.1 *Capa granular*

Consiste en una capa estabilizada de grava y arcilla o arcilla y arena, mismos que podrán proceder, previa autorización del fiscalizador, de la excavación realizada al generar la plataforma o subrasante del camino, material de préstamo o de fuentes externas al proyecto. La definición de los materiales conformadores de la capa, dependerán de la granulometría del árido ubicada sobre la subrasante terminada. Las capas de grava y arcilla o arena y arcilla deberán presentar homogenización, no contener materia vegetal y al ser compactadas, deben cumplir con lo que el contrato especifique. En cuanto a sus límites de Atterberg, se especifica un LL máximo de 35 y un IP que no exceda de 9. Se busca que su granulometría cumpla con la ecuación siguiente:

$$P = \% \text{ que pasa el tamiz} = \left(\frac{d}{D}\right)^n * 100$$

En donde:

$$n \approx 0.25-0.40$$

$$d = 1 \quad \text{abertura del tamiz}$$

$$D = 1 \quad \text{máxima dimensión del agregado}$$

Tal como lo especifica el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), se deberá asegurar mediante ensayos que la mezcla cumpla con las características granulométricas especificadas en la norma INEN 696 (AASHTO T-11 y T-27); dicha verificación se realiza inmediatamente luego de que la mezcla se haya finalizado. Los límites de Atterberg se verificarán mediante ensayos de plasticidad y límites descritos en las normas INEN 691 y 692 (AASHTO T-89 y T90). La densidad máxima y humedad óptima deberán ser comprobadas mediante los ensayos especificados en AASHTO T-180, método D.

El espesor de la capa se verificará cada 100m de longitud mediante mediciones tanto a los lados como en el eje de la vía de manera alternada; en caso de que el grosor haya disminuido del especificado en el contrato, dicha disminución no deberá exceder los 2cm y el promedio de las mediciones deberá ser igual o mayor al espesor indicado en los planos. En resumen en cuanto a la granulometría, esta deberá cumplir con lo especificado en la siguiente tabla:

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada				
	A	B	C	D	E
50.8mm (2")	100				
38.1mm (1 1/2")	80-10				
25.4mm (1")	60-80	100	100	100	100
9.5mm (3/8")	-	50-85	60-100	-	-
4.75mm (N°4)	45-65	35-70	45-85	-	-
2.0mm (N°10)	-	25-50	30-65	40-100	55-100
0.425mm (N°40)	-	12-30	15-40	20-50	30-70
0.075mm (N°200)	5-15	4-12	5-15	6-20	8-25

Tabla 10. Granulometría para capas de rodadura de grava-arena-arcilla. Fuente: MTOP (2017)

### 1.8.2.2 Suelo estabilizado con material bituminoso

Basados en el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), el principal objetivo de este suelo, es el mejoramiento del suelo y disminución de la permeabilidad; son superficies de rodadura útiles cuando los caminos son de baja intensidad vehicular. Los materiales a utilizar podrán provenir de la excavación realizada para asentar la vía, así como de fuentes exteriores; dichos materiales estarán libres de compuestos orgánicos, arcilla de alta plasticidad y materiales que pudieran causar daño a la vía.

Para la creación de esta superficie de rodadura, se permite la utilización de suelos cohesivos, así como suelos no cohesivos (limos, arenas o mezclas entre ellos), Se recomienda que en cuanto a su granulometría, el 50% del material pase a través del tamiz N°4 y entre el 10% y 50% pase a través del tamiz N°200; cabe aclarar que estas recomendaciones, no necesariamente son

lineamientos exactos que deben ser cumplidos. En cuanto al LL e IP, estos deberán ser menores a 35 y 9 respectivamente. Será necesaria la comprobación de la granulometría mediante ensayos descritos en la norma INEN 696.

Los materiales antes mencionados deberán ser mezclados con material bituminoso, el cual siguiendo las indicaciones del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), se formará por asfaltos diluidos o emulsiones asfálticas. La mezcla se diseña, a más de los materiales ya mencionados, con agua. Se deberá indicar dentro del diseño: el porcentaje en peso del material bituminoso, relacionado con el peso del suelo seco, el porcentaje de agua que tendrá el suelo al ser mezclado y la compactación y densidad máxima de la mezcla. El porcentaje aceptable de ligante en la dosificación será de  $\pm 1\%$  del peso seco del material a estabilizar.

Durante la construcción de la superficie de rodadura se realizará la comprobación del espesor de la capa, cada 100m de longitud, tomando medidas de manera alternada en los lados de la vía y en su eje; no se aceptarán variaciones de más de 1,5cm y luego de promediar todas las medidas tomadas, se deberá asegurar que el resultado sea igual o superior al espesor especificado en el contrato vial.

### ***1.8.2.3 Capa de hormigón asfáltico mezclado en sitio***

El punto más importante a tomar en cuenta en el hormigón asfáltico mezclado en sitio, es la granulometría, misma que puede ser fina y abierta para un agregado 90% triturado. Antes de realizar la mezcla de los agregados con el asfalto, se deberá asegurar que los agregados estén completamente mezclados y secos. Siguiendo con el desarrollo del tema, se muestran tablas en donde se describe la granulometría a cumplir con los agregados según corresponda a las especificaciones del diseñador:

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8mm)	100	-	-
1 1/2" (38.1mm)	70-100	100	-
1" (25.4mm)	55-85	70-100	100
3/4" (19.0mm)	50-80	60-90	70-100
3/8" (9.5mm)	40-70	45-75	50-80
N°4 (4.75mm)	30-60	30-60	35-65
N°10 (2.00mm)	20-50	20-50	25-50
N°40 (0.425mm)	5-30	5-30	10-30
N°200 (0.075mm)	0-5	0-5	0-5

Tabla 11. Granulometría para capa de hormigón asfáltico mezclado en sitio. Clasificación 1. Fuente: MTOP (2017)

Tamiz	Porcentajes en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	3/8" máximo	1/4" máximo
1/2" (12.7mm)	100	-
3/8" (9.5mm)	90-100	100
1/4" (6.3mm)	55-75	85-100
N°4 (4.75mm)	30-50	-
N°8 (2.38mm)	15-32	15-32
N°16 (1.18mm)	0-15	0-15
N°200 (0.075mm)	0-3	0-3

Tabla 12. Granulometría para capa de hormigón asfáltico mezclado en sitio. Clasificación 2. Fuente: MTOP (2017)

Los agregados cumplirán con ciertas indicaciones de aptitud, comprobando la granulometría a través de pruebas (sobre muestras tomadas en sitio) tal como se indica en la norma INEN 696. El hormigón asfáltico mezclado en sitio, tendrá que satisfacer ciertas especificaciones basadas en las limitaciones presentadas a continuación:

- Peso de los agregados secos que pasen el tamiz N°4 y tamices mayores:  $\pm 5\%$
- Peso de los agregados secos que pasan los tamices N°8 hasta el N100:  $\pm 4\%$
- Peso de los agregados secos que pasen el tamiz N°200:  $\pm 2\%$
- Dosificación del material asfáltico:  $\pm 0.5\%$

En cuanto al grosor, éste no variará en más de 5mm al indicado en los planos y tampoco el promedio de todas las medidas tomadas, deberá ser menor al mismo. El nivel de la vía terminada, no deberá variar en más de 1.2cm en comparación con las cotas establecidas en el proyecto; en cuanto a la sección transversal, la pendiente será uniforme, sin rugosidades y nunca tendrá una desviación mayor a 8mm en comparación con lo establecido.

#### ***1.8.2.4 Capa de rodadura de hormigón asfáltico en caliente***

Para la colocación de esta capa, se tendrá claro que la superficie sobre la cual se asentará la misma, deberá ser preparada e imprimada; estará compuesta por agregados gruesos, finos, filler mineral (material generalmente molido, preferiblemente cal hidratada no plástica o en su defecto polvo de piedra, con partículas cuyo tamaño les permita pasar el tamiz N°200) y material bituminoso.

Los agregados gruesos y agregados finos cumplirán con los requisitos indicados en las tablas siguientes a más de que deberán encontrarse limpios de terrones de arcilla, siendo el porcentaje aceptado de máximo 1%; se deberá asegurar que dichos agregados no contengan materia orgánica ni materiales dañinos. Esta composición permite formar mezclas asfálticas de dos tipos: Mezcla Asfáltica Normal y Mezcla Superpave Nivel 1.

Ensayos	Requerimiento	
	Altitud (m.s.n.m)	
	<3000	>3000
Durabilidad (al Sulfato de Sodio)	12% max	10% max
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	18% max	15% max
Abrasión Los Ángeles	40% max	35% max
Índice de Durabilidad	35% mim	35% min
Partículas chatas y alargadas	10% max	10% max
Caras fracturadas	Ver tablas siguientes	
Sales Solubles Totales	0.5% max	0.5% max
Absorción	1%	Según Diseño
Adherencia	+95	

Tabla 13. Requerimientos para agregados gruesos. Fuente: MTOP (2012)

Ensayos	Requerimiento	
	Altitud (m.s.n.m)	
	<3000	>3000
Equivalente de Arena	Ver tablas siguientes	
Angularidad del agregado fino	Ver tablas siguientes	
Adhesividad (Riedel Weber)	4% min	6% min
Índice de Plasticidad (malla N°40)	NP	NP
Índice de Durabilidad	35% min	35% min
Índice de Plasticidad (malla N°200)	Max 4	NP
Sales Solubles Totales	0.5% max	0.5% max
Absorción	0.50%	Según Diseño

Tabla 14. Requerimientos para agregados finos. Fuente: MTOP (2012)

Tráfico en Ejes Equivalentes (en millones)	Espesor de Capa	
	<100 mm	>100 mm
≤ 3	65/40	50/30
> 3 – 30	85/50	60/40
> 30	100/80	90/70

Nota: la expresión 65/40 significa un 65% del agregado tiene una cara fracturada y un 40% dos caras fracturadas.

Tabla 15. Requerimientos para caras fracturadas. Fuente: MTOP (2012)

Tráfico en Ejes Equivalentes (en millones)	Porcentaje de Equivalente de Arena (mínimo)
≤ 3	45
> 3 – 30	50
> 30	55

Tabla 16. Requerimientos de Equivalente de Arena. Fuente: MTOP (2012)

Tráfico en Ejes Equivalentes (en millones)	Espesor de Capa	
	<100 mm	>100 mm
≤ 3	30 min	30 min
> 3 – 30	40 min	40 min
> 30	40 min	40 min

Tabla 17. Angularidad del agregado fino. Fuente: MTOP (2012)

#### 1.8.2.4.1 Mezcla Asfáltica Normal (MAC)

La mezcla asfáltica normal será de 3 tipos y cumplirá con la granulometría siguiente:

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25mm (1")	100	-	-
19mm (3/4")	80	100	-
12.5mm (1/2")	67-85	80-100	-
9.5mm (3/8")	60-77	70-88	100
4.75mm (N°4)	43-54	51-68	65-87
2mm (N°10)	29-45	28-52	43-61
0.425mm (N°40)	14-25	17-28	16-29
0.180mm (N°80)	8-17	8-17	9-19
0.075mm (N°200)	4-8	5-8	5-10

Tabla 18. Granulometría para MAC. Fuente: MTOP (2012)

#### 1.8.2.4.2 Mezcla Superpave

Estas mezclas cumplirán con las características indicadas en las tablas posteriores, debiendo lograr que su curva granulométrica se ubique interior a los límites de control y exterior a la zona de restricción.

Tamaño del tamiz (mm)	Puntos de Control		Línea de Máxima Densidad	Zona de Restricción		Fórmula de Mezcla	Tolerancia
25		100	100				
19	100	90	88.4				
12.5			73.2				
9.5			59.6				
4.75			49.5			*	(6)
2.36	49	23	34.6	34.6	34.6	*	(6)
1.18			25.3	22.3	28.3		*
0.60			18.7	16.7	20.7	*	(4)
0.30			13.7	13.7	13.7	*	(3)
0.15			10				
0.075	8	2	7.3			*	(2)

\* Valores especificados por el contratista. Aproximación de 0.1%

(#) Desviaciones aceptables de los valores de la fórmula ( $\pm$ )

Tabla 19. Graduación Superpave para Agregado de tamaño nominal máximo de 19mm. Fuente: MTOP (2012)

Tamaño del tamiz (mm)	Puntos de Control		Línea de Máxima Densidad	Zona de Restricción		Fórmula de Mezcla	Tolerancia
37.5		100	100				
25	100	90	83.3				
19			73.6				
12.5			61.0				
9.5			53.9			*	(6)
4.75			39.5	39.5	39.5	*	(6)
2.36	45	19	28.8	26.8	30.8		
1.18			21.1	18.1	24.1	*	(4)
0.60			15.6	13.6	17.6	*	(3)
0.30			11.4	11.4	11.4		
0.15	7	1	8.3			*	(2)
0.075			6.1				

\* Valores especificados por el contratista. Aproximación de 0.1%

(#) Desviaciones aceptables de los valores de la fórmula ( $\pm$ )

Tabla 20. Graduación Superpave para Agregado de tamaño nominal máximo de 25mm. Fuente: MTOP (2012)

Cuando se vaya a diseñar una mezcla asfáltica, se tendrán en cuenta determinadas características de calidad que la misma tendrá que cumplir en función de las ventajas que se esperan conseguir en la vía. Las mezclas de hormigón bituminoso, podrán ser realizadas de 3 clases, teniendo características determinadas para cada caso, tal como se indica a continuación:

Parámetros de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
a. Marshall (MTC E 504)			
1. Estabilidad	8kN (815kg)	5.34kN (544kg)	4.45kN (453kg)
2. Flujo 0.25mm	8-14	8-16	8-2
b. Porcentaje de vacíos con aire (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
1. Vacíos en el agregado mineral	Ver tabla siguiente		
2. Compactación, número de golpes en cada capa de testigo	75	50	50
c. Inmersión-Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa (mín)	2.1	2.1	1.4
2. Resistencia Retenida % (mín)	70	70	70
d. Resistencia Conservada en la Prueba de Tracción Indirecta (mín)	70	70	70
e. Relación Polvo-Asfalto	0.6-1.3	0.6-1.3	0.6-1.3
f. Relación Est./Flujo	1700-2500		
El índice de Compactibilidad mínimo será de 5. El índice de Compactibilidad será: con GB50 y GEB5, las gravedades específicas de Bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.			

Tabla 21. Requisitos para Mezcla de Hormigón Bituminoso. Fuente: MTOP (2012)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado %	
	Marshall	Superpave
2.36mm (N°8)	21	
4.75mm (N°4)	18	
9.5mm (3/8")	16	15
12.5mm (1/2")	15	14
19mm (3/4")	14	13
25mm (1")	13	12
38mm (1 1/2")	12	11
50mm (2")	11.5	10.5

Tabla 22. Vacíos mínimos en los agregados. Fuente: MTOP (2012)

Al hablar de mezclas Superpave, se tendrán en cuenta ciertos requerimientos generales en cuanto a porcentajes de diseño, siendo importantes los siguientes: Se tendrá un porcentaje de 4% en cuanto a vacíos con aire a los giros de diseño ( $N_{dis}$ ), en cuanto a los giros iniciales ( $N_{ini}$ ), su porcentaje de densidad máxima será de 89%, para los giros máximos ( $N_{max}$ ), el porcentaje de densidad será de máximo 98% y finalmente, la resistencia conservada en el ensayo de tracción

indirecta será de 80%. La siguiente tabla presenta datos para la determinación de los giros inicial, de diseño y máximo en función de las máximas temperaturas promedio del aire en la zona de ejecución del proyecto:

Tráfico (millones de ejes equivalentes)	Temperatura promedio alta de aire											
	39°C			39°C-40°C			41°C-42°C			43°C-44°C		
	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>max</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>max</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>max</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>max</sub>
ESAL<0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3<ESAL<1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1<ESAL<3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3<ESAL<10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10<ESAL<30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30<ESAL<100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
ESAL>100	9	142	233	10	158	262	10	165	275	10	172	288

Tabla 23. Giros de compactación para mezclas Superpave. Fuente: MTOP (2012)

Cuando se habla de los VFA, estos se definen según (Zambrano, 2016), como los vacíos existentes entre partículas de agregado que posterior a la mezcla con material bituminoso, se llenarán de asfalto; su resultado se determina a través de la diferencia entre los VMA y los vacíos de aire en mezclas compactadas, para posteriormente dividir este resultado para VMA (la ecuación se presenta al final de este párrafo).

Para el caso de mezclas asfálticas tipo Superpave, se podrá utilizar la fórmula anteriormente descrita o para facilidad del diseñador, dichos VFA se expresarán en porcentaje en función del tráfico (que a continuación se presenta como millones de ejes equivalentes), según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2012), como los valores los siguientes: Para tráficos menores a 0.3, VFA variará entre 70% y 80%, para tráficos entre 0.3 y 3, VFA estará entre 65% y 78% y finalmente para tráficos mayores a 3, VFA se encontrará entre 65% y 75%.

$$VFA = 100 * \frac{VMA - V_s}{VMA}$$

En donde:

$VFA$  – Vacíos Llenos con Asfalto

$VMA$  – Vacíos en el Agregado Mineral

$V_s$  – Vacíos de aire en mezclas compactadas

#### **1.8.2.5 Tratamientos bituminosos superficiales**

Se definirá un tratamiento bituminoso superficial según el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), como una capa formada por agregados secos, limpios, sólidos y resistentes, empapados en material bituminoso y asentada encima de la capa de base de la estructura del pavimento o también sobre una superficie de rodadura ya existente (en caso de que el objetivo sea la rehabilitación de la vía). Los agregados utilizados en los tratamientos bituminosos se conformarán por partículas de piedra o grava triturada, piedra o grava natural, arena u otro material granular, siempre y cuando el inspector así lo apruebe.

Los agregados gruesos presentarán un desgaste máximo de 35% luego de 500 giros en el ensayo de abrasión según lo indique la norma INEN 860. El índice de plasticidad de los agregados que pasen el tamiz N°40, será menos de 4 según lo indicado en la norma INEN 691 y 692. La desintegración o pérdida total no sobrepasará el 12% luego de cinco periodos de sumersión y limpieza en sulfato de sodio; en cuanto al ensayo de peladura, se deberán obtener resultados de impregnación de material bituminoso mayores al 95%. La granulometría aceptada para estos agregados, cumplirá con las siguientes especificaciones:

Tamiz	Porcentaje que pasa en peso a través de los tamices de malla cuadrada					
	A	B	C	D	E	F
38.1mm	100	-	-	-	-	-
25.5mm	90-100	100	-	-	-	-
19.0mm	20-55	90-100	100	-	-	-
12.7mm	0-15	20-55	90-100	100	100	-
9.5mm	0-5	0-15	40-75	90-100	90-100	100
4.75mm	-	0-5	0-15	0-20	10-30	75-100
2.38mm	-	-	0-5	0-10	0-10	20-55
1.19mm	-	-	-	0-5	0-5	0-10
0.6mm	-	-	-	-	-	0-5
0.075mm	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2

Tabla 24. Granulometría para agregados utilizados en tratamientos bituminosos superficiales. Fuente: MTOP (2017)

Para el desarrollo de estos tratamientos bituminosos superficiales, se permite la utilización de cemento asfáltico, asfaltos diluidos o emulsiones asfálticas como material bituminoso.

Los cementos asfálticos son el resultado de la destilación del petróleo; estos permanecen en estado semisólido a temperaturas del ambiente. Cuando se pretenda la utilización de cemento asfáltico, se deberá verificar el cumplimiento de las siguientes especificaciones:

Ensayos	60 -70		85 - 100	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
<b>a. Betún original:</b>				
1. Penetración (25°C, 100gr, 5s), mm/10	60	70	85	100
2. Punto de ablandamiento A y B. °C	48	57	45	53
3. Índice de penetración (*)	-1.5	+1.5	-1.5	+1.5
4. Ductilidad (25°C, 5cm/minuto), cm	100	-	100	-
5. Contenido de agua (en volumen), %	-	0.2	-	0.2
6. Solubilidad en tricloroetileno, %	99	-	99	-
7. Punto de inflamación, copa Cleveland, °C	232	-	232	-
8. Densidad relativa, 25°C/25°C	1.00	-	1.00	-

9. Ensayo de la mancha (**)	Negativo		Negativo	
10. Contenido de parafinas, %	-	2.2	-	2.2
<b>b. Ensayos al residuo TFOT:</b>	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1. Variación de masa, %	-	0.8	-	1.0
2. Penetración, % de penetración original	54	-	50	-
3. Ductilidad, cm	50	-	75	-
4. Resistencia al endurecimiento (***)	-	5.0	-	5.0
<p>(*) Para determinar el índice de penetración se utiliza el método de anillo y bola (Tab), partiendo del valor de penetración en mm/10, a 25°C, 100 gr y 5s (Pen) y del valor de ablandamiento, °C; se utilizan las expresiones siguientes:</p> $A = 50 \frac{\log 800 - \log(Pen)}{(Tab) - 25} \qquad \text{índice de penetración} = \frac{20 - 10A}{A + 1}$ <p>(**) Será necesaria la especificación del tipo de solvente a utilizar y, en caso de que el solvente contenga xileno, se especificará el porcentaje a usar.</p> <p>(***) Se define como la relación entre: viscosidad absoluta a 60°C después del ensayo TFOT y la misma viscosidad a 60°C del betún original (antes de la prueba)</p>				

Tabla 25. Requisitos a cumplir previo a la utilización del cemento asfáltico. Fuente: MTOP (2017)

Los asfaltos diluidos se definen según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), como asfaltos de consistencia suave o fluida cuya principal característica es el exceder los límites permitidos en cuanto al ensayo de penetración INEN 917; su clasificación va de acuerdo a la volatilidad del diluyente obteniendo: asfaltos diluidos de curado rápido (RC), asfaltos diluidos de curado medio (MC) y asfaltos diluidos de curado lento (SC). Su calidad se verifica mediante el cumplimiento de las normas AASTHO M-81 y M-82 y ASTM D 2026 para asfaltos RC, MC y Sc, respectivamente.

El aspecto de los asfaltos debe ser homogéneo y los mismos deben tener cero contenidos de agua, de tal manera que, al calentarse a la temperatura que se van a emplear, se pueda observar la

formación de espuma. Los requerimientos que los asfaltos diluidos deberán cumplir son los siguientes:

Propiedad	Tipo de Cemento							
	RC-70		RC-250		RC-800		RC-3000	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
a. Viscosidad:								
1. Cinemática, a 60°C, centistokes	70	140	250	500	800	1600	3000	6000
2. Saybold-Furol, s	60	120	125	250	100	200	300	600
3. Temperatura de ensayo	50	idem	60	idem	82.2	idem	82.2	Idem
b. Punto de inflamación: vaso abierto, °C:	-	-	27	-	27	-	27	-
c. Agua, %	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2
d. Destilación, % en volumen total destilado a 360°C:								
1. 190°C	10	-	-	-	-	-	-	-
2. 225°C	50	-	35	-	15	-	-	-
3. 260°C	70	-	60	-	45	-	25	-
4. 315°C	85	-	80	-	75	-	70	-
e. Residuo por destilación a 360°C	55	-	65	-	75	-	80	-
f. Ensayos en el residuo:								
1. Viscosidad absoluta, a 60°C, poises	600	2400	600	2400	600	2400	600	2400
2. Penetración, a 25°C, 100gr, 5s	80	120	80	120	80	120	80	120
3. Ductilidad, a 25°C, 5cm/mm, cm	100	-	100	-	100	-	100	-
4. Solubilidad en Tricloroetileno, %	99	-	99	-	99	-	99	-
g. Temperatura de empleo:								
1. Rociado, °C	27	66	60	107	79	124	102	143
2. De carga, °C		91		118		135		154

Tabla 26. Especificaciones que deben cumplir los asfaltos diluidos RC. Fuente: MTOP (2017)

Propiedad	Tipo de Cemento									
	MC-30		MC-70		MC-250		MC-800		MC-3000	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
a. Viscosidad:										
1. Cinemática, a 60°C, centistokes	30	60	70	140	250	500	800	1600	3000	6000
2. Saybold-Furol, s	70	150	60	120	125	250	100	200	300	600
3. Temperatura de ensayo	25	idem	50	idem	60	idem	82.2	idem	82.2	Idem
b. Punto de inflamación: vaso abierto, °C:	38	-	38	-	66	-	66	-	66	-
c. Agua, %	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2
d. Destilación, % en volumen total destilado a 360°C:										
1. 225°C	-	25	0	20	0	10	-	-	-	-
2. 260°C	40	70	20	60	15	55	0	35	0	15
3. 315°C	75	93	65	90	60	87	45	80	15	75
e. Residuo por destilación a 360°C	50	-	55	-	67	-	75	-	80	-
f. Ensayos en el residuo:										
1. Viscosidad absoluta, a 60°C, poises	300	1200	300	1200	300	1200	300	1200	300	1200
2. Penetración, a 25°C, 100gr, 5s	80	120	80	120	80	120	80	120	80	120
3. Ductilidad, a 25°C, 5cm/mm, cm	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-
4. Solubilidad en Tricloroetileno, %	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
g. Temperatura de empleo:										
1. Mezclado con agregados	-	-	32	68	52	93	71	107	93	127
2. Rociado, °C	-	-	41	79	60	107	79	124	102	143
3. De carga, °C	-	-		91		118		135		154

Tabla 27. Especificaciones que deben cumplir los asfaltos diluidos MC. Fuente: MTOP (2017)

Propiedad	Tipo de Cemento							
	SC-70		SC-250		SC-800		SC-3000	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
a. Viscosidad cinemática, a 60°C, centistokes	70	140	250	500	800	1600	3000	6000
b. Punto de inflamación, Cleveland, °C	66	-	79	-	93	-	107	-
c. Destilación a 360°C, total	10	30	4	20	2	12	-	5
d. Agua, %	-	0.5	-	0.5	-	0.5	-	0.5
e. Solubilidad en Tricloroetileno, %	99	-	99	-	99	-	99	-
f. Ensayos en el residuo: Viscosidad cinemática a 60°C, poises	4	70	8	100	20	160	40	350
g. Temperatura de empleo:								
1. Mezclado con agregados	32	68	52	93	71	107	93	127
2. Rociado, °C	41	79	60	107	79	124	102	143
3. De carga, °C		91		118		135		154

Tabla 28. Especificaciones que deben cumplir los asfaltos diluidos SC. Fuente: MTOP (2017)

Al hablar de emulsiones asfálticas, estas se pueden clasificar en tres tipos en función del agente emulsificador: aniónicas, catiónicas y no iónicas; esto debido a que el asfalto puede presentar glóbulos cargados eléctricamente de manera positiva o negativa o ser neutros. En el diseño de pavimentos, las más utilizadas son las emulsiones asfálticas aniónicas y catiónicas. Otra clasificación para las emulsiones asfálticas, está en función de su naturaleza, granulometría y condiciones ambientales, existiendo los siguientes tipos: de rotura rápida (RS), de rotura media (MS) y de rotura lenta (SS).

Las emulsiones asfálticas, tendrán que presentarse homogéneas y cumplirán con lo establecido en las normas AASHTO M-140 y M-208; dichas emulsiones no deberán tener temperaturas que superen los 85°C ni temperaturas por debajo de los 4.5°C en ningún momento. Durante la fase de calentamiento de las emulsiones asfálticas, estas deberán estar en constante movimiento con el fin de evitar que el calor se concentre en un solo punto. El resumen que sigue, presenta las especificaciones técnicas que las diferentes emulsiones asfálticas deberán cumplir:

Propiedades	Rotura Rápida				Rotura Media						Rotura Media								Rotura Lenta				
	RS-1		RS-2		MS-1		MS-2		MS-2h		HFMS-1		HFMS-2		HFMS-2h		HFMS-2s		SS-1		SS-1h		
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
a. Viscosidad:																							
1. Furol, a 25°C, s	20	100	-	-	20	100	100	-	100	-	20	100	100	-	100	-	50	-	20	100	20	100	
2. Furol, a 50°C, s	-	-	75	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3. Estabilidad al almacenaje 24h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	
4. Demulsificación: 35ml, 0.2N, CaCl <sub>2</sub> , %	60	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
b. Cubrimiento:																							
1. Agregado seco	-	-	-	-	bueno	-	bueno	-	bueno	-	bueno	-	bueno	-	bueno	-	bueno	-	-	-	-	-	
2. Luego rociado	-	-	-	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	-	-	-	-	
3. Agregado húmedo	-	-	-	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	-	-	-	-	
4. Solo rociado	-	-	-	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	pobre	-	-	-	-	-	
c. Mezcla con cemento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-	2.0	
d. Ens. del tamiz	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	
e. Residuo por destilación	55		63		55		65		65		55		65		65		65		57		57		
f. Ensayos en el residuo:																							
1. Penetración, a 25°C, 100gr, 5s	100	200	100	200	100	200	100	200	40	90	100	200	100	200	40	90	200		100	200	40	90	
2. Ductilidad, a 35°C, 5cm/m, cm	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	
3. Solubilidad en tricloroetileno, %	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	
4. Ensayo de flotación a 60°C, s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1200	-	1200	-	1200	-	1200	-	-	-	-	-	
g. Temperatura de empleo:																							
1. Almacenamiento	20	60	50	85	10	60	50	85	50	85	10	60	-	-	50	85	-	-	10	60	10	60	
2. Mezcla en planta	-	-	-	-	10	70	10	70	10	70	10	70	10	70	10	70	-	-	10	70	10	70	
3. Mezcla en sitio	-	-	-	-	20	70	20	70	20	70	20	70	20	70	20	70	-	-	20	70	20	70	
4. Tratamiento superficial	20	60	50	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Nota:	El prefijo "HF" hace referencia a emulsiones aniónicas de alta flotación (High Float). Los sufijos "h" o "s" hacen referencia a la dureza y viscosidad del asfalto base.																						

Tabla 29. Especificaciones de emulsiones asfálticas aniónicas. Fuente: MTOP (2017)

Propiedades	Rotura Rápida				Rotura Media				Rotura Lenta			
	CRS-1		CRS-2		CMS-2		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
a. Viscosidad:												
1. Furol, a 25°C, s	-	-	-	-	-	-	-	-	20	100	20	100
2. Furol, a 50°C, s	20	100	100	400	50	450	50	450	-	-	-	-
3. Estabilidad al almacenaje 24h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
4. Demulsificación: 35ml, 8% sds, %	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b. Cubrimiento:												
1. Agregado seco	-	-	-	-	bueno		bueno		-	-	-	-
2. Luego rociado	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
3. Agregado húmedo	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
4. Solo rociado	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
c. Carga de partícula	+		+		+		+		+		+	
d. Mezcla con cemento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-	2.0
e. Ens. del tamiz	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1
f. Destilación: aceite destilado %	-	3	-	3	-	12	-	12				
g. Residuo, %	60	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
h. Ensayos de residuo:												
1. Penetración a 25°C, 100gr, 5s	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
2. Ductilidad a 25°C, 5cm/m, cm	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
3. Solubilidad en tricloroetileno, %	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-
i. Temperatura de empleo:												
1. Almacenamiento	50	85	50	85	50	85	50	85	10	60	10	60
2. Mezcla en planta	-	-	-	-	10	70	10	70	10	70	10	70
3. Mezcla en sitio	-	-	-	-	20	70	20	70	20	70	20	70
4. Tratamiento superficial	50	85	50	85	-	-	-	-	-	-	-	-
Nota: El prefijo “C” se utiliza para identificar a las emulsiones catiónicas. Los sufijos “h” o “s” hacen referencia a la dureza y viscosidad del asfalto base.												

Tabla 30. Especificaciones de emulsiones asfálticas catiónicas. Fuente: MTOP (2017)

### 1.8.3 Diseño de mezclas asfálticas

El desarrollo de este punto se basará en el texto “Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente” (Serie de Manuales N° 22) del (Instituto de Asfalto, 2005) de los Estados Unidos.

Resumiendo el concepto de mezclas asfálticas, éstas son el resultado de la mezcla de asfalto y agregados en cantidades exactas; dicha combinación será la encargada de determinar las características tanto físicas como de desempeño de la mezcla. Las proporciones de asfalto y agregados que se deberán utilizar se determinan a través de los métodos Marshall y Hveem, logrando resultados excelentes con cualquiera de estos. Dentro del diseño de una mezcla asfáltica, existen cuatro características que deberán tenerse en cuenta, ya que éstas definirán la calidad del producto final, es decir, determinarán la calidad del pavimento y su desempeño. Dichas características son: densidad de la mezcla, espacios de aire, espacios vacíos en el agregado mineral y cantidad de asfalto.

#### 1.8.3.1 Densidad

Una vez que la mezcla es compactada, su densidad se define como el peso unitario de ésta. Generalmente es recomendable y necesario que la densidad del pavimento terminado sea alta ya que esto permitirá que el pavimento obtenga características de rendimiento duradero. La densidad se enuncia en  $\text{kg/m}^3$  o  $\text{lb/pe}^3$  y su valor resulta del producto entre la gravedad específica total de la mezcla y la densidad del agua, sabiendo que el agua tendrá una densidad de  $1000\text{kg/m}^3$  o  $62.416\text{lb/pe}^3$ .

Las mezclas terminadas, se analizan en laboratorios mediante ensayos de densidad y al valor obtenido, se lo puede usar como patrón indicador de calidad, determinando mediante la misma si la mezcla podrá o no ser aceptada una vez que sea colocada y compactada in-situ; la densidad in-

situ deberá ser un porcentaje determinado en relación a la densidad en laboratorio, ya que generalmente es casi imposible lograr en el campo la misma compactación obtenida en laboratorios.

### ***1.8.3.2 Vacíos de aire, o simplemente vacíos***

Generalmente se forman por los espacios entre las partículas de agregados una vez que éstos hayan sido revestidos con material bituminoso y la mezcla haya sido compactada. La existencia de determinado porcentaje de vacíos es útil y necesaria, ya que cuando la vía entre en funcionamiento, los vehículos crearán un efecto de compactación sobre la misma; estudios indican que un porcentaje aceptable de vacíos se encuentra entre 3% y 5% dependiendo del diseño.

Una razón más para que la cantidad de vacíos en una mezcla se encuentre entre el rango mencionado, es el hecho de que la durabilidad del pavimento depende de la cantidad de vacíos, y al ir más allá del límite superior, es decir si los vacíos son exagerados, aumenta la permeabilidad de la mezcla, traduciéndose esto en un paso exagerado de agua y aire, dando como resultado deterioro de la vía. Por otra parte, si el porcentaje de vacíos está por debajo del límite inferior, se genera en el pavimento un fenómeno de exudación, el cual consiste en la salida del exceso de asfalto desde la mezcla hasta la superficie. Resulta obvio que la densidad y el porcentaje de vacíos están relacionados de manera directa, por lo que cuando más elevada sea la densidad, más bajo será el porcentaje de vacíos existente en la mezcla y recíprocamente.

### ***1.8.3.3 Vacíos en el agregado mineral (VMA)***

Son los espacios conformados por los vacíos llenos de aire que se encuentran entre los agregados de una mezcla compactada además de los espacios llenos de asfalto, es decir, es el espacio aprovechable en una mezcla para colocar el volumen efectivo de asfalto más el volumen

de vacíos. Por lo tanto, la cantidad de asfalto que se puede utilizar, depende de que tan elevado o pequeño sea el valor de VMA.

El cálculo de VMA está en función del diámetro de las partículas de agregado. Los valores mínimos de VMA se determinan basados en el principio de que mientras más grande sea la película de asfalto sobre los agregados, mayor será la duración de la mezcla. Por lo tanto, si se llegaran a presentar valores de VMA por debajo de los mínimos permitidos, las películas de asfalto serán demasiado delgadas, dando como resultado mezclas poco durables y de apariencia seca. A continuación se presentan los requisitos mínimos que deben cubrir los vacíos en el agregado mineral:

Tamaño máximo Porcentaje		VMA mínimo, por ciento Vacíos de diseño por ciento <sup>1</sup>		
mm	pulgadas	3.0	4.0	5.0
1.18	N°16	21.5	22.5	23.5
2.36	N°8	19.0	20.0	21.0
4.75	N°4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

<sup>1</sup> Se deberá interpolar el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los citados en la presente tabla.

Tabla 31. Requisitos mínimos de VMA. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

#### 1.8.3.4 Contenido de asfalto

Este valor se determinará de forma exacta mediante análisis de laboratorio y será importante que se controle su cumplimiento durante la mezcla y puesta en obra. El contenido de asfalto depende o está íntimamente ligado a las características de los agregados en cuanto a su granulometría y absorción; esto se deduce ya que mientras más pequeñas sean las partículas de

agregado, mayor será el área superficial total y por lo tanto se requerirá de una cantidad mayor de asfalto para que se logre cubrir todas las superficies de manera uniforme. En caso de que la mezcla contenga también relleno mineral, la correlación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto será más acentuada ya que el relleno mineral absorbe gran parte del contenido de asfalto, lo cual significa que cambios pequeños en el contenido de humedad pueden causar grandes cambios en la calidad de la mezcla asfáltica.

La cantidad de asfalto está también determinada según la capacidad de absorción de los agregados usados en la mezcla, concluyendo que la cantidad de asfalto que se utilice, será la necesaria para cubrir los porcentajes de absorción de agregados, relleno mineral (en caso de que exista), a más de la necesaria para envolver los agregados con una capa conveniente de asfalto.

En cuanto al asfalto absorbido y no absorbido, se identifican dos tipos: Contenido total de asfalto y Contenido efectivo de asfalto. El primero se fija como el contenido de asfalto necesario en la mezcla que permita que las cualidades buscadas se consigan; el segundo será el volumen de asfalto que los agregados no absorben, es decir, el que formará la capa de asfalto alrededor de los agregados de la mezcla; este contenido efectivo de asfalto es el producto de la diferencia entre el contenido total de asfalto y la cantidad absorbida por el agregado.

#### ***1.8.3.5 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas***

Como se sabe, el objetivo de un proyecto de ingeniería, siempre es el de cubrir los requerimientos de los beneficiarios en su totalidad, por lo que siempre será prudente verificar el cumplimiento de ciertas características importantes, mismas que aseguran el rendimiento de la obra y garantizan la satisfacción de los implicados. Para el caso del diseño de mezclas asfálticas, se buscará cubrir las siguientes propiedades de diseño:

### 1.8.3.5.1 Estabilidad

El objetivo de la estabilidad es lograr que el asfalto no se desplace ni deforme durante la actuación repetitiva del tráfico sobre la vía; cuando el asfalto tiene estabilidad baja, en el mismo se generarán ahuellamientos, ondulaciones entre otros efectos negativos con el transcurso del tiempo. Por lo mencionado se deduce que la estabilidad de la vía, dependerá del volumen de tránsito proyectado para toda la vida útil del proyecto vial; el análisis deberá realizarse de manera muy minuciosa para que el asfalto sea diseñado de tal forma que soporte la carga de tránsito y al mismo tiempo el valor de estabilidad no sea muy elevado, es decir, evitando que pueda provocar un pavimento demasiado rígido, cuyas consecuencias serían un pavimento de corta vida útil.

La fricción entre partículas de agregados cubre un punto importante en la estabilidad ya que se relaciona con la forma y textura de éstos. La cohesión dependerá de las peculiaridades del asfalto, pudiendo ésta aumentar mientras más viscoso sea el asfalto o mientras su temperatura disminuya. Estas dos últimas características juntas, evitan o permiten que el agregado se deslice (dependiendo de un diseño correcto o incorrecto) por la acción del tráfico. Entonces como habrá de suponerse, a mayor angularidad y aspereza del agregado, mayor estabilidad en la mezcla asfáltica. En resumen, se presenta en la tabla siguiente las causas y efectos más comunes que genera una mala estabilidad:

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Exceso de asfalto en la mezcla.	Ondulaciones, ahuellamiento y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla.	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas superficies trituradas.	Ahuellamiento y canalización.

*Tabla 32. Causas y efectos de una mala estabilidad en el pavimento. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)*

### 1.8.3.5.2 Durabilidad

Es la característica del pavimento para soportar ciertos factores (clima y/o tránsito) que ponen en peligro su integridad. Dichos factores pueden ser: disgregación de las partículas de agregado, variaciones en las características del asfalto (polimerización y oxidación) y desintegración de las películas de asfalto. Obviamente existen actividades que se pueden llevar a ejecutar para que la durabilidad del pavimento cumpla con los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento de la vía; dichas acciones son: utilización de una cantidad de asfalto lo más elevada posible, utilización de una gradación densa en cuanto a los agregados de la mezcla y diseño y compactación que permitan a la mezcla ser lo más impermeable posible.

La primera acción permitirá tener películas gruesas alrededor del agregado, así como sellar en un mayor porcentaje los vacíos, lo cual evitará el envejecimiento y separación de los agregados y el ingreso de aire o sustancias líquidas que pudieren dañar el pavimento, la segunda acción logrará contactos más íntimos entre los agregados, traduciéndose esto en el mejoramiento de la impermeabilidad del pavimento. Así mismo, la utilización de agregados densos brindará a la mezcla resistencia a la desintegración, separación y acción del tráfico; la tercera acción evitará que el aire y agua penetren a la capa de rodadura y a todas las capas conformadoras del pavimento. A continuación se presenta un resumen de algunas causas y efectos que una mezcla con poca durabilidad pudiera tener:

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Bajo contenido de asfaltos.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptibles al agua (hidrofilicos).	Películas del asfalto desprendidas de agregado, provocando un pavimento desgastado o desintegrado.

Tabla 33. Causas y efectos de la poca durabilidad del asfalto. Fuente: Instituto del Asfalto (2005)

### 1.8.3.5.3 Impermeabilidad

Se define a la impermeabilidad como la resistencia del pavimento para evitar el paso del agua o aire, lo cual está relacionado de manera directa con la cantidad y tamaño de vacíos de la mezcla una vez ésta haya sido compactada. A continuación se presentan algunas causas y efectos de una mezcla poco impermeable:

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Tabla 34. Causas y efectos en una mezcla poco impermeable. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

### 1.8.3.5.4 Trabajabilidad

Es un indicador de la capacidad de una mezcla asfáltica para ser instalada y compactada; a mayor trabajabilidad, la colocación y compactación serán menormente problemáticas. Depende tanto del diseño de la mezcla como del tipo de agregado y/o granulometría utilizado; un agregado grueso, provoca desintegración de la mezcla y dificultad en la compactación, por lo que se recomienda que luego de análisis de laboratorio, se agregue arena a una mezcla poco trabajable, siempre y cuando, las características de diseño no se vean afectadas.

De igual manera, el relleno mineral deberá estar contenido en la mezcla asfáltica de tal manera que no la vuelva demasiado viscosa. El uso de poco relleno mineral, mucha arena mediana, partículas lisas y redondeadas (agregado grueso), temperaturas muy elevadas y/o demasiada humedad, pueden provocar que las mezclas sean tiernas, lo cual conlleva a que éstas sean

inestables y su compactación no sea posible. A continuación se presentan algunas causas y efectos de una mala trabajabilidad:

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Tamaño máximo de partícula: grande.	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso.	Dificultad para compactar.
Temperatura muy baja de la mezcla.	Agregado sin revestir, mezcla poco durable, superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio.	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral.	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral.	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.

Tabla 35. Causas y efectos de una mala trabajabilidad. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

#### **1.8.3.5.5 Flexibilidad**

Es la característica de los pavimentos de acomodarse sin agrietarse bajo la actuación de movimientos y asentamientos o expansión de la subrasante; todo diseño de pavimentos busca lograr flexibilidad de la mezcla. Un punto importante es el de buscar un equilibrio entre la flexibilidad y la estabilidad ya que los requerimientos de cada una de estas características pueden entrar en conflicto entre sí.

#### **1.8.3.5.6 Resistencia a la fatiga**

Se define como la resistencia de una mezcla colocada en obra, a la flexión repetitiva que se genera en la parte superior de la capa de rodadura con la acción de las cargas vehiculares. Está muy relacionada con los vacíos y la viscosidad de la mezcla ya que a mayor porcentaje de vacíos, menor fatiga sufre el pavimento; por el contrario, cuando el asfalto envejece y se endurece considerablemente, la resistencia de la mezcla a la fatiga disminuye.

Seguidamente se presentan algunas causas y efectos que una mala resistencia a la fatiga puede causar en el pavimento:

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño.	Envejecimiento temprano de asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento.	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Tabla 36. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

#### 1.8.3.5.7 Resistencia al deslizamiento

El diseño de pavimentos tiene como uno de los principales objetivos el resguardar la seguridad de los usuarios de las vías, por lo que es muy importante que la superficie de rodadura tenga una alta resistencia al deslizamiento o resbalamiento de los neumáticos de los vehículos, fundamentalmente en épocas lluviosas. Una manera de obtener resistencia al deslizamiento es mediante superficies ásperas y rugosas.

Mediante estudios con el paso del tiempo se ha llegado a determinar que la mejor manera de evitar el deslizamiento es usando agregados de tamaños máximos de 9.5mm (3/8plg) a 12.5mm (1/2plg). La resistencia de los agregados se presenta como un factor muy importante, ya que estos deberán estar en la capacidad de soportar el tránsito vehicular sin sufrir alisamiento.

A continuación se describen algunas causas y efectos de una mala resistencia al deslizamiento:

<b>Causas</b>	<b>Efectos</b>
Exceso de asfalto.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Pavimento liso, posibilidad de hidropilano.
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento.

Tabla 37. Causas y efectos de la poca resistencia al deslizamiento. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

#### 1.8.3.6 Evaluación y ajustes en el diseño de la mezcla

Una manera de identificar la mezcla adecuada para cubrir las necesidades de la estructura de pavimento y que logre cubrir con las exigencias de seguridad, confort al manejar, etc., es el método de ensayo y error, con el cual se prepararán varias mezclas, se buscará mejoras cada vez que se

crea una nueva y finalmente se identificará la que cubra con todas las necesidades y especificaciones. En primera instancia, lo que se busca es que los agregados usados en la mezcla, cumplan con las especificaciones granulométricas determinadas para el proyecto vial, por lo que las curvas granulométricas de cada muestra serán la principal muestra de un buen o mal diseño y de esto se partirá con los ajustes para las siguientes mezclas a analizar. Los ajustes o correcciones que a una mezcla deberá realizarse, podrán ser los siguientes:

#### ***1.8.3.6.1 Bajo contenido de vacíos, Baja Estabilidad***

Para obtener un aumento en el contenido de vacíos se podrá aumentar el VMA adicionando agregado grueso o fino, logrando que en la mezcla los agregados se distancien más unos de otros, generando una mayor cantidad de vacíos. El aumento de los vacíos se logrará también con una disminución del porcentaje de asfalto utilizado en la mezcla, cumpliendo con las condiciones de que el asfalto podrá ser reducido solamente cuando se observe y compruebe que el mismo se utilizó en exceso y cuando se compruebe que su reducción no dejará el porcentaje de asfalto por debajo del límite aceptado; se comprobará también que la durabilidad no se vea afectada.

En cuanto a la estabilidad, la misma puede ser aumentada de igual manera, con un aumento en la cantidad de agregados gruesos (triturados), ya que con esto se logrará texturas superficiales ásperas y formas angulares en las partículas, mejorando el V;A y la fricción; habrá que tener en cuenta que los agregados añadidos, no provengan de la trituración de materiales que pudieran obtener como producto final partículas con caras lisas.

#### ***1.8.3.6.2 Bajo contenido de vacíos, Estabilidad Satisfactoria***

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, el bajo contenido de vacíos genera exudación una vez que el tránsito vehicular surge efecto sobre la vía; esto puede acarrear consigo inestabilidad y

degradación del agregado, por lo que para estos casos, resulta razonable modificar la mezcla con los mismos métodos mencionados anteriormente en el punto 1.6.3.6.1

#### ***1.8.3.6.3 Contenido satisfactorio de vacíos, Baja estabilidad***

Esto puede ser causado por agregados de mala calidad, por lo que se recomienda seguir las instrucciones especificadas en el numeral 1.8.3.6.1.

#### ***1.8.3.6.4 Contenido alto de vacíos, Estabilidad satisfactoria***

En la mayor parte de las mezclas, los contenidos altos de vacíos se relacionan con la permeabilidad alta, por lo que se recomienda disminuirlos aumentando el contenido de polvo mineral o de ser posible, cambiando las graduaciones de los agregados de tal manera que permita un aumento de densidad.

#### ***1.8.3.6.5 Contenido alto de vacíos, Baja Estabilidad***

Cuando se presente este inconveniente, se deberán seguir las recomendaciones descritas en el numeral 1.8.3.6.4; cuando los resultados obtenidos no satisfagan y no logren reducir el contenido de vacíos y aumentar la estabilidad, se revisará que el agregado que se está utilizando vaya de acuerdo a lo establecido en el numeral 1.8.3.6.1.

#### ***1.8.3.7 Pruebas en mezclas asfálticas***

Las mezclas asfálticas se diseñan con el fin de cubrir una o varias necesidades, por lo que el control en cuanto al cumplimiento de las especificaciones es muy importante. Cuando se vaya a realizar un análisis de calidad, se deberá tener en cuenta en primera instancia, el cumplimiento de las especificaciones que el método de diseño seleccionado indique y que dicho método, cubra por completo las necesidades hacia las cuales la vía va dirigida. Posterior a esto, se buscará realizar pruebas o ensayos tanto a los materiales de construcción como a las mezclas preparadas con para

lograr cumplir con las especificaciones que su diseño haya dado como resultado final; dichas pruebas buscan cubrir cuatro puntos importantes que avalan la calidad de la mezcla: Diseño preliminar, Aceptación de la fuente de agregados, Control de la mezcla de obra y Criterios para compactación de concreto asfáltico.

#### ***1.8.3.7.1 Diseño preliminar***

El objetivo principal de esta prueba es el aprobar o desaprobar una fuente de materiales como adecuada para satisfacer las especificaciones de granulometría y posteriormente, de mezcla asfáltica.

#### ***1.8.3.7.2 Aceptación de la fuente***

Con estas pruebas se buscará delimitar el área de influencia de la obra en cuanto a fuentes de materiales, analizando, buscando y determinando el proveedor más adecuado en función a la calidad y la economía.

#### ***1.8.3.7.3 Control de mezclas de obra***

Una vez que la mezcla haya sido diseñada y la planta esté lista para su producción, se deberá realizar análisis de calidad de mezcla asfáltica a la misma con el fin de verificar que las ecuaciones de diseño aplicadas hayan dado como resultado una mezcla adecuada para el correcto funcionamiento del tráfico que circulará por determinada vía. Se buscará evitar que los pavimentos tengan problemas dentro de la vida útil de la vía, por lo que será necesario verificar la granulometría y contenidos de asfalto en la mezcla, permitiendo de ser necesario, cambios pequeños luego de que se verifique que los requisitos se cubran en su totalidad con dichas variaciones.

Se realizarán también pruebas de control de calidad de rutina mediante toma de muestras y ensayo de la mezcla cada cierto periodo con el fin de determinar que se sigan cumpliendo las características y requerimientos de diseño y calidad. Obviamente, en caso de que se identifique problemas en la mezcla luego de que la misma haya sido ensayada, se deberán realizar las respectivas correcciones, llegando incluso a evaluar y modificar el diseño de ser el caso.

#### ***1.8.3.7.4 Criterios para compactación de concreto asfáltico***

Las mezclas a ser analizadas serán mezclas de laboratorio, mediante la cual se describirán los requerimientos de compactación en obra (mediante la obtención de una densidad de referencia en el laboratorio); se puede lograr obtener datos más reales mediante el ensayo de muestras tomadas en obra y compactadas en el mismo sitio o en el laboratorio. Se deberá controlar la densidad mediante ensayos a muestras tomadas de la sección de control o franja de prueba del pavimento terminado; para esto se utilizará un medidor nuclear o se realizará muestreo de núcleos; se tomarán y se promediarán cinco medidas y se deberá obtener una densidad igual o mayor al 96%; en caso de que una de las medidas indique un valor de densidad menor al 94%, se deberán promediar 6 muestras preparadas en laboratorio.

#### ***1.8.3.8 Método Marshall para el Diseño de Mezclas Asfálticas***

El principal objetivo de este método es el fijar un óptimo contenido de asfalto para una determinada combinación de agregados. Con este método se logran establecer características de las mezclas asfálticas en caliente, estableciendo las densidades y vacíos óptimos para el correcto mezclado, trabajabilidad, resistencia y duración del pavimento.

Para la aplicación de este método, se deberá asegurar que las partículas de agregados sean de tamaños máximos de 25.0mm (1plg) y que la mezclas se vaya a realizar con cemento asfáltico clasificado a través de su viscosidad o penetración.

Para el ensayo de muestras, este método indica la utilización de probetas de 64mm (2.5plg) de espesor y 102mm (4plg) de diámetro; cada probeta tendrá una misma granulometría, pero diferente contenido de asfalto y se prepararán mediante calentamiento, mezclado o compactado de la mezcla, logrando que los ensayos cubran el análisis de la relación de vacíos-densidad y de estabilidad-flujo.

El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas se presenta en la norma AASHTO T 245 o ASTM D 1559. Los procedimientos de este método, son descritos por el (Instituto de Asfalto, 2005) y se resumen a continuación:

#### ***1.8.3.8.1 Preparación para efectuar los procedimientos Marshall***

Anteriormente se presentaron las diferentes características que los agregados y asfalto deben tener cuando se pretende preparar una mezcla asfáltica (numeral 1.8.3.5); para iniciar con la aplicación del método Marshall se deberá comprobar el cumplimiento de dichas especificaciones en función de las cualidades que se espera, tenga la mezcla asfáltica; se deberá también elegir el tipo de agregados a usar y su granulometría. Posteriormente se preparan los respectivos ensayos.

El material bituminoso y los agregados que van a utilizarse en la mezcla, deberán ser preparados y ensayados para la determinación de sus características; de dichos ensayos se generará las regulaciones a seguir para el diseño de la mezcla asfáltica, por lo que será menester comprobar que los materiales empleados en la fabricación de la mezcla, tengan las mismas peculiaridades que los ensayados. Para la ejecución de las pruebas de laboratorio, deberá conocerse de antemano la relación viscosidad-temperatura de la mezcla, lo que nos servirá de partida para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de laboratorio; en el caso de los agregados se tendrá que determinar su peso específico, previo secado de la muestra, y se efectuará un análisis granulométrico por lavado.

Es completamente necesario que los agregados estén lo mayormente posible libres de humedad para que los resultados de los ensayos no se vean afectados. Para asegurar esto, se colocará un espécimen de cada agregado en un contenedor y se calentará a  $110^{\circ}\text{C}$  ( $230^{\circ}\text{F}$ ); luego de un período de tiempo la muestra es retirada del horno y se registra el valor de su peso; se procede con una segunda etapa de calentamiento y luego de determinado tiempo, nuevamente se retira del horno y se procede con su pesaje; este procedimiento se realiza hasta que el valor obtenido se muestre constante luego de cada calentamiento.

Siguiendo con los agregados, es necesaria la identificación de partículas de tamaño diferente en las muestras, lo cual se logra con un análisis granulométrico por lavado o por vía húmeda; para esto se realizarán los siguientes procedimientos:

- a) Se seca y se pesa la muestra,
- b) La muestra se lava a través del tamiz N°200 (0.075mm), lo cual logra la remoción de polvo mineral,
- c) Se seca la muestra aplicando el método explicado en el párrafo anterior y,
- d) Registro del peso seco de cada muestra y determinación del peso de polvo mineral, restando al peso de la muestra antes del lavado, el peso de la muestra luego del mismo.

La determinación del peso específico del agregado resulta de la relación peso-volumen de una muestra de éste, comparado con un volumen igual de agua a una misma temperatura; la determinación de este valor servirá como punto de partida para posteriormente medir los pesos específicos de las diferentes proporciones de agregado, asfalto y vacíos a utilizarse en los diseños.

Una vez analizados los agregados, se parte de su granulometría para proceder con el análisis de las mezclas iniciando con la creación de probetas, mismas que se diferenciarán unas de otras por

el contenido de asfalto que cada una posea (la variación de asfalto de una probeta a otra será ligera), así como también por la proporción de agregado de cada una. La preparación de las mezclas se realiza como sigue:

- a) El material bituminoso y el agregado son calentados y mezclados por completo, buscando cubrir a todos los agregados con una película de material bituminoso,
- b) Las mezclas preparadas anteriormente se ubican en los recipientes precalentados Marshall para posteriormente usar el martillo Marshall de compactación previamente calentado con el fin de que no provoque variación en la superficie de la mezcla y,
- c) Se compactan las muestras con el uso del martillo Marshall formando probetas; el número de golpes se establece en función del volumen de tráfico que circulará por la vía en cuestión, pudiendo variar dicho número entre 35, 50 o 75. Las probetas deberán recibir igual número de golpes por ambas caras, es decir por ejemplo, si el análisis determinó un número de 35 golpes, la probeta recibirá 35 golpes en cada cara, dando un total de 70 golpes. Una vez que se completa la compactación, las probetas se enfrían y extraen de los moldes.

#### ***1.8.3.8.2 Procedimiento del ensayo Marshall***

- **Determinación del peso específico total**

Este peso se determina inmediatamente una vez la mezcla compactada haya llegado a tener la misma temperatura que el ambiente; con esta medición de peso se tendrá la base para el análisis de densidad-vacíos.

La determinación del peso específico promedio de agregados se realiza con la siguiente ecuación:

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots}$$

En donde:

$P_1, P_2, P_3$  – Porcentaje en peso de cada fracción de material que interviene en el total de agregado.

$G_1, G_2, G_3$  – Pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas.

El peso específico máximo teórico para cada porcentaje de asfalto será:

$$G_{agrm} = \frac{100}{\frac{\%_{agregados}}{G_{agr}} + \frac{\%_{cemento\ asfáltico}}{G_{asf}}}$$

En donde:

$\%_{agregados}$  – 100 - % asfalto

$G_{agr}$  – peso específico promedio de agregados

La determinación del volumen se realiza mediante la expresión:

$$Volumen = \text{Peso aire SSS} - \text{Peso agua SSS}$$

En donde:

$\text{Peso aire SSS}$  – Peso de la muestra en aire en estado SSS

$\text{Peso agua SSS}$  – Peso de la muestra en el agua en estado SSS

La determinación de la densidad Bulk se expresa como:

$$Densidad_{Bulk} = \frac{Peso\ aire\ seco}{Peso\ aire\ SSS - Peso\ agua\ SSS}$$

En donde:

*Peso aire seco* – Peso en el aire de la muestra seca

El peso específico de la mezcla asfáltica suelta será igual a:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

En donde:

*A* – Peso de la muestra

*D* – Peso del envase (matraz + agua)

*E* – Peso del envase (matraz + agua + muestra)

El porcentaje en volumen de los agregados se expresa como sigue:

$$\%V_{agr} = \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$

En donde:

*G<sub>mb</sub>* – Bulk promedio de 3 probetas

*G<sub>sb</sub>* – Peso específico Bulk del agregado

*P<sub>s</sub>* – % agregados=% total - % asfalto

El porcentaje total de vacíos será:

$$P_a = 100 \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

En donde:

$G_{mb}$  – Bulk promedio de 3 probetas

El volumen de asfalto en función del volumen total de la probeta se expresa en porcentaje como lo indica la siguiente expresión:

$$V_a = 100 - \%V_{agregados} - P_a$$

En donde:

$\%V_{agregados}$  – Porcentaje de volumen de agregados

$P_a$  – % total de vacíos con respecto al volumen total de la probeta

El porcentaje de vacíos de los agregados minerales se expresa como:

$$V_{am} = 100 - \%V_{agr}$$

El volumen efectivo de la mezcla asfáltica se determina mediante la ecuación:

$$V_{ea} = \frac{V_a}{V_{am}} * 100$$

El contenido de asfalto efectivo será como sigue:

$$A_e = \%_{asfalto} - \frac{P_{ba}}{100} * \%_{agregados}$$

$$P_{ba} = 100 \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} * G_b$$

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

En donde:

$P_{mm}$  – Sumatoria de los porcentajes de mezcla (100%)

$P_b$  – % de asfalto al que se quiere calcular

$G_b$  – Peso específico de asfalto (1.011)

$G_{se}$  – Gravedad específica efectiva del agregado

$P_{ba}$  – Asfalto absorbido por el agregado

- **Ensayos de estabilidad y fluencia**

Se encarga de determinar la resistencia a la deformación de la mezcla. El procedimiento se realiza como sigue:

- a) Se inicia calentando las probetas en agua a 60°C (140°F), misma que es la máxima temperatura que un pavimento podrá experimentar durante su vida útil,
- b) Se procede con el secado de la probeta y su colocación en el equipo de ensayo Marshall,

- c) Se activa el equipo y se procede con la aplicación de la carga, lo cual se realiza a una velocidad constante de 51mm (2plg) por minuto hasta observar la falla de la muestra, de tal manera que se determina la carga máxima que la probeta logra resistir y,
  - d) Finalmente se registra la carga a la cual la muestra falla como un valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia.
- **Valor de estabilidad Marshall**

Es el valor registrado como carga de falla de la muestra e indica la resistencia de una mezcla a la deformación por lo que se tiende a pensar que mientras mayor sea la carga soportada, mayor será la resistencia a la deformación. Esto no es del todo cierto, ya que estudios demuestran que estabilidades extremadamente altas provocan deficiencias en durabilidad.

Los valores de estabilidad se corrigen (cuando las probetas no tengan exactamente una altura de 2.5 pulgadas) en base al volumen de la probeta y a los valores de la tabla tomada de (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2016) y que se presenta a continuación, con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$E_c = Dial * Factor de corrección * Constante del anillo$$

En donde:

$$Constante del anillo = 51.621 + 10.003 * Dial$$

Volumen de la probeta (cm <sup>3</sup> )	Espesor aproximado de la probeta (cm)	Factor de corrección
200-213	2.54	5.56
214-225	2.70	5.00
226-237	2.86	4.55
238-250	3.02	4.17
251-264	3.17	3.85
265-276	3.33	3.57
277-289	3.49	3.33
290-301	3.65	3.03
302-316	3.81	2.78
317-328	3.97	2.50
329-340	4.13	2.27
341-353	4.29	2.08
354-367	4.44	1.92
368-379	4.60	1.79
390-392	4.76	1.67
393-405	4.92	1.56
406-420	5.08	1.47
421-431	5.24	1.39
432-443	5.40	1.32
444-456	5.56	1.25
457-470	5.71	1.19
471-482	5.87	1.14
483-495	6.03	1.09
496-508	6.19	1.04
509-522	6.35	1.00
523-535	6.51	0.96
536-546	6.67	0.93
547-559	6.82	0.89
560-573	6.98	0.86
574-585	7.14	0.83
586-598	7.30	0.81
599-610	7.46	0.78
611-625	7.62	0.76

Tabla 38. Factores de corrección de estabilidad. Fuente: AASHTO (2016)

- **Valor de fluencia Marshall**

Este valor se mide en centésimas de pulgada y es una medida que representa la deformación de la probeta a través de la disminución en el diámetro vertical de esta. Una mezcla se considera muy frágil y rígida si su composición demuestra bajos valores de fluencia acompañados de valores altos

de estabilidad Marshall. Si el ensayo Marshall indica en una muestra una fluencia demasiado alta, la mezcla se considera muy plástica, por lo tanto su deformación se genera con cargas demasiado bajas.

- **Análisis de densidad y vacíos**

Este análisis se realiza inmediatamente luego de haber realizado los ensayos de estabilidad y fluencia en todas las probetas a ensayar. El fin de este análisis es la determinación del porcentaje de vacíos en la mezcla compactada; su cálculo parte del peso específico total de la probeta compactada (este valor se calcula con las probetas pesadas en aire y agua) y el peso específico teórico de la mezcla de pavimentación sin contar los vacíos (este valor se calcula en base a los pesos específicos del asfalto y el agregado, teniendo en cuenta el asfalto absorbido por el agregado).

El peso unitario se calcula mediante el producto entre el peso específico total de la mezcla por  $1000 \text{ Kg/m}^3$  ( $62.4 \text{ lb/pe}^3$ ). El VMA se determina en función del peso específico total del agregado y su resultado se enuncia como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada; su cálculo resulta de restarle el volumen del agregado al volumen total de la mezcla. El VFA se conforma por vacíos llenos de asfalto y aire, por lo que su cálculo se obtiene como la diferencia entre los vacíos de aire del VMA y posteriormente dividiendo este valor para VMA; su resultado se expresa en porcentaje.

### ***1.8.3.8.3 Análisis de resultados del ensayo Marshall***

#### **▪ Gráfica de resultados**

Este es un punto importante ya que permite al diseñador apreciar mediante la visión cual es la mejor opción de diseño existente entre todas las muestras ensayadas; la selección se basará en la identificación del cumplimiento de criterios establecidos para el pavimento. Se graficarán por separado los datos derivados de las pruebas Marshall para: porcentaje de vacíos, VMA, VFA, densidades, estabilidad y por último fluencia; las gráficas tendrán en el eje vertical a cada una de las características mencionadas recientemente y en su eje horizontal el contenido de asfalto (representado en porcentaje); cada punto marcado en el gráfico se unirá al siguiente mediante líneas, formando curvas suaves.

#### **▪ Relaciones y observaciones de los resultados**

Las gráficas que se forman al tener en cuenta el punto anteriormente mencionado, traen consigo ciertas indicaciones en cuanto al diseño de la mezcla asfáltica; será necesario estudiar estas directrices con el fin de identificar cual es la mezcla que cubre las necesidades viales o de ser el caso, cuales son las variaciones que se necesitan realizar.

#### **▪ Determinación del contenido óptimo de asfalto y verificado de criterios de diseño**

Los dos puntos anteriores de este numeral, son la base para la identificación del contenido óptimo de asfalto en una mezcla; en primera instancia se establecerá el contenido de asfalto que provoca un porcentaje de vacíos igual al 4%, se continúa con la valoración de las demás propiedades identificando sus valores con el contenido de asfalto anteriormente mencionado y se compara dicho valor con los criterios descritos en las tablas siguientes. En caso de que los criterios no sean cumplidos, habrá que ajustar la mezcla o de ser el caso, volver a diseñarla.

Criterios para mezcla del método Marshall	Tránsito liviano. Carpeta y Base		Tránsito mediano. Carpeta y Base		Tránsito pesado. Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N (lb)	3336 (750)	-	5338 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01plg)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
VMA	Ver la tabla contenida en el numeral 1.8.3.3					
VFA	70	80	65	78	65	75
Notas: Los valores de fluencia se identifican en el punto en el que la carga comienza a disminuir. Al calcular el porcentaje de vacíos, se permitirá un grado de tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdido por absorción del mismo por parte del agregado.						

Tabla 39. Criterios a cubrir para el diseño por el Método Marshall. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

- **Seleccionado de diseño de mezcla**

Siempre se buscará que el diseño de la mezcla asfáltica cubra con todos los criterios establecidos en la tabla anterior y no con uno en particular, al mismo tiempo de que se buscará que dicho diseño sea el más económico en relación a otros. En caso de que se requiera una modificación en cuanto a los criterios de diseño, se deberá justificar su modificación y verificar que dicha alteración produzca una mezcla satisfactoria.

### 1.8.3.9 Método Hveem de Diseño de Mezclas Asfálticas

Con este método se logra la aproximación en cuanto al contenido de asfalto en una mezcla a través de la realización del ensayo equivalente centrífugo de Kerosene para posterior ensayo de estabilidad y de expansión a las probetas, buscando optimización en la relación entre agregados y material bituminoso. Para este diseño es necesario que los agregados tengan tamaños máximos de 25.0mm (1plg) y que el material bituminoso sea clasificado de acuerdo a su viscosidad o penetración. Para el diseño de mezclas asfálticas con este procedimiento, se necesita realizar una

variedad de ensayos que determinan el contenido óptimo de asfalto; dichos ensayos son: Ensayo Equivalente Centrífugo de Kerosene (CKE), Preparación de probetas, Ensayo de estabilidad y Ensayo de expansión.

#### ***1.8.3.9.1 Preparación antes de los procesos Hveem***

En primera instancia, se deben identificar y verificar el cumplimiento de las cualidades descritas en el numeral 1.8.3.5 del presente documento; para lograr dicho cumplimiento se realizarán combinaciones entre agregados y material bituminoso buscando la mejor opción. Una vez cumplido este requerimiento se procede a realizar las siguientes preparaciones:

- **Selección de las Muestras de Material**

Es importante que los materiales utilizados para los ensayos, sean de las mismas características que los que se pretendan utilizar en la mezcla final para garantizar la calidad de esta. Este punto se aclara ya que en el transcurso de los años se han registrado varias fallas del pavimento antes de que el mismo cumpla con su vida útil, mismas que luego de un análisis determinaron que dicha falla fue causada por variaciones entre los materiales ensayados y los empleados en la mezcla.

- **Preparación del Agregado**

Al hablar de los materiales empleados en las mezclas asfálticas, se puede decir que el material bituminoso no necesita de preparación previa ya que sus características se conocen al momento de seleccionar el grado de asfalto; para el caso de los agregados, es necesario identificar sus características mediante procesos de: secado del agregado, determinación del peso específico, análisis granulométrico por lavado, determinación de área superficial y determinación de la capacidad superficial del agregado grueso.

El secado del agregado tiene como fin obtener un peso constante luego de que la muestra se haya sometido a temperaturas de 110°C (230°F) por varias ocasiones (de la misma manera que se explicó en el numeral 1.8.3.8.1).

El análisis granulométrico por la vía húmeda y la determinación del peso específico se realizará de la forma descrita en los párrafos 4 y 5 del numeral 1.8.3.8.1 de este documento.

El área superficial del agregado tiene importancia en este método ya que se usa como un indicador para aproximar el contenido de asfalto para la mezcla; este valor se fija luego de tamizar una muestra en seco y pesando la cantidad de material de cada tamiz. Posterior a esto se convierten los valores a una estimación del área superficial de la muestra, sabiendo que estos valores varían inversamente con el tamaño del agregado. La tabla que sigue muestra los factores de conversión de área superficial:

	<b>Tamaño máximo mm (N°)</b>	4.75 (4)	2.36 (8)	1.18 (16)	0.600 (30)	0.30 (50)	0.15 (100)	0.075 (200)
<b>Factor de Área Superficial<sup>1</sup></b> <b>pie<sup>2</sup>/lb (m<sup>2</sup>/kg)</b>		2 (0.41)	4 (0.82)	8 (1.64)	14 (2.87)	30 (6.14)	60 (12.29)	160 (32.77)
<sup>1</sup> Se permite el uso de estos factores solamente cuando todos los tamices nombrados en la parte superior son utilizados en el análisis.								
<b>Tamaño del tamiz</b>		<b>Porcentaje que pasa</b>	<b>*</b>	<b>Factor de A.S</b>	<b>=</b>	<b>Área Superficial</b>		
19.0mm	(3/4")	100	*	2 (0.41)	=	2.0 (0.41)		
9.5mm	(3/8")	90	*	2 (0.41)	=	2.0 (0.41)		
4.75mm	(N°4)	75	*	2 (0.41)	=	1.5 (0.31)		
2.36mm	(N°8)	60	*	4 (0.82)	=	2.4 (0.49)		

1.18mm	(N°16)	45	*	8 (1.64)	=	3.6 (0.74)
0.60mm	(N°30)	35	*	14 (2.87)	=	4.9 (1.00)
0.30mm	(N°50)	25	*	30 (6.14)	=	7.5 (1.54)
0.15mm	(N°100)	18	*	60 (12.29)	=	10.8 (2.21)
0.075mm	(N°200)	10	*	160 (32.77)	=	16.0 (3.28)
$\sum$ Área superficial					=	48.7pie <sup>2</sup> /lb (9.98m <sup>2</sup> /kg)

Tabla 40. Tabla de factores de área superficial. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

La facultad superficial de un agregado, es su disponibilidad para conservar una capa de asfalto. El CKE se utiliza en la aproximación del contenido de asfalto en un agregado administrando un índice “K” que fundamentado en la porosidad, proporciona la rugosidad relativa del agregado y la capacidad superficial. El índice “K” se obtiene a través de pruebas que calculan el aceite retenido en la fracción gruesa y fracción fina de agregados. Todos los valores “K” se reducen en uno solo, representando el compuesto de agregado, mismo que conjuntamente con el área superficial del agregado, determinan la cantidad aproximada de asfalto.

#### ▪ Preparación de probetas de Ensayo

La preparación de los cilindros se realiza con pequeñas variaciones en cada una de ellas en cuanto al contenido de material bituminoso; estas variaciones son el resultado de los datos obtenidos en las pruebas de análisis de área superficial y capacidad superficial. Las especificaciones de cantidad de agregados para las muestras, nacen de los datos obtenidos tras un análisis de tamizado en seco. La preparación de las probetas cumplirá con las siguientes indicaciones: una se realizará con el contenido aproximado de asfalto, otras dos se formarán con porcentajes de 0.5% y 1.0% más contenido que el aproximado y una cuarta probeta contendrá un valor de 0.5% menor que el aproximado de asfalto.

Para la formación de las probetas se seguirán los siguientes pasos: (a) Calentado y mezclado del asfalto hasta lograr un cubrimiento homogéneo de las partículas de agregado con películas de asfalto, (b) calentado de la mezcla en un horno a 60°C (140°F) durante 15 horas, logrando envejecer ligeramente al asfalto y permitiendo absorción de material bituminoso por parte de los agregados, (c) calentado a 100°C (230°F) de la mezcla, aparentando la temperatura de compactación, (d) se coloca la mezcla en un molde de compactación y se apisona con el uso de una varilla de punta redondeada, lo cual asegura que la compactación sea uniforme y (e) con el uso de un compactador mecánico, simular en la mezcla la compactación por rodillo del pavimento en obra.

#### ***1.8.3.9.2 Procedimiento del ensayo Hveem***

- **Ensayo de estabilómetro**

Tiene el objetivo de medir la estabilidad de la mezcla con la acción de esfuerzos generados por la acción de fuerzas verticales (que aparentan la acción de la carga vehicular) sobre la probeta, misma que se coloca en el equipo con una membrana de caucho que la rodea. El resultado final se identifica como una presión horizontal. Este ensayo se basa en la resistencia de los agregados y la consistencia del material bituminoso.

El ensayo inicia con el calentamiento de la probeta a 60°C (140°F), misma que posteriormente se coloca en el estabilómetro; seguidamente, se aumenta la presión del estabilómetro hasta una fuerza igual a 34.5KPa (5psi) y se aplica una carga vertical de 0.02mm/s (0.05plg/min) hasta lograr una fuerza de 26.7kN (6000lbf); se van tomando registro tanto de las presiones horizontales como de las cargas verticales aplicadas, procediendo luego con la disminución de la carga vertical a 4.45kN (1000lbf), registrando el desplazamiento mediante la bomba; finalmente, se obtiene un valor de estabilidad, el cual se fundamenta en el hecho de que la mezcla asfáltica presenta

propiedades que varían entre un líquido y un sólido rígido, representando dicho valor en una escala de 0 (líquido) a 100 (sólido que hipotéticamente transmite presión lateral que no se puede registrar bajo la acción de determinada carga vertical).

- **Análisis de vacíos**

Este valor se calcula partiendo del peso específico total del cilindro analizado y del peso específico teórico de la mezcla asfáltica sin vacíos. Las probetas se pesan en aire y agua para identificar el peso específico.

- **Ensayo de expansión**

Es un método que permite identificar la cantidad de agua filtrada en la probeta, la cantidad de agua que pudiera llegar a sobrepasar la capa de rodadura, así como de la expansión que el agua pudiera llegar a causar a la mezcla compactada. El procedimiento para obtener resultados con este ensayo es el siguiente:

Colocar la probeta en su respectivo molde dentro de una bandeja de aluminio y cubrirla con una placa perforada de bronce; montar sobre la probeta el medidor de cuadrante, tocando con la guía la placa de bronce; Sobre la placa de bronce se vierte una determinada cantidad de agua; se procede midiendo y registrando la distancia entre el labio superior del molde y la superficie de agua; La probeta se somete a sumersión por un lapso de 34 horas; Se toma la medida de la elevación que la superficie de la probeta haya sufrido causa de la expansión; Nuevamente se mide la distancia desde el labio superior del molde hasta la superficie del agua, valor que una vez restado del valor inicial (antes de las 24 horas), indicará el total de agua filtrada, es decir, nos facilitará el valor de la permeabilidad de la probeta.

### 1.8.3.9.3 *Análisis de resultados del ensayo Hveem*

Con la realización de los ensayos Hveem, se logran resultados para peso unitario, porcentaje de vacíos y estabilidad, mismos que serán graficados, colocando cada uno de estos en el eje vertical y el porcentaje de asfalto por peso de agregado utilizado en cada probeta, en el eje horizontal; todos los puntos registrados se unen entre sí formando una curva, misma que usa posteriormente para comparar las características entre probetas y su tendencia con las variaciones realizadas.

De todas las combinaciones realizadas, se seleccionará como mejor o mejores a las que cumplan con las especificaciones descritas en la siguiente tabla; lo que el diseño busca es que la mezcla tenga los porcentajes más altos posibles de material bituminoso sin que la estabilidad o el contenido de vacíos se vea afectado de manera negativa; esto se verificará con la comparación entre las mezclas de: valores obtenidos en el estabilómetro, porcentajes de vacíos y la tendencia a la exudación.

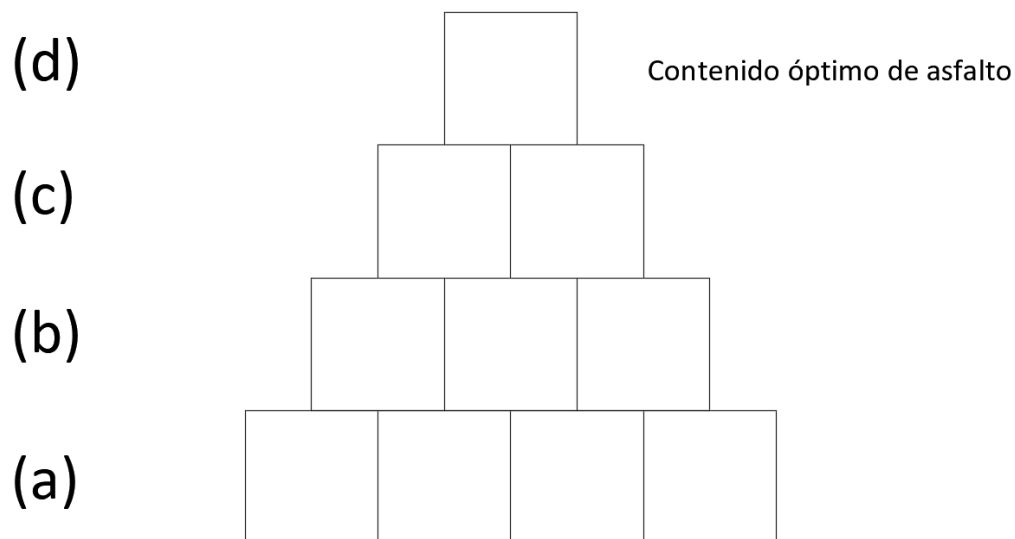
Categoría de tránsito	Pesado		Mediano		Liviano	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Propiedad de la Prueba						
Valor de Estabilómetro	37	-	35	-	30	-
Expansión	Menos que 0.030plg (0.762mm)					
Notas: El método de diseño no lo indica, pero se deberá procurar un porcentaje de vacíos mínimo de 4%. Es necesaria la comprobación del cumplimiento de todos los criterios de diseño a más de la estabilidad.						

Tabla 41. Criterios de diseño para el método Hveem. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)

Para identificar el contenido óptimo de asfalto es recomendable el uso de una pirámide como la que se presenta a continuación:

- a) Se inicia con el registro de los contenidos de asfalto de cada probeta de ensayo, ordenándolos de menor a mayor partiendo desde la izquierda,
- b) Se seleccionan las tres probetas con los contenidos más altos de material bituminoso y ausencia de exudación, es decir, que no presente una moderada ni una fuerte,
- c) De las probetas seleccionadas en el paso anterior, se eligen las que ahora tengan el contenido más alto posible de asfalto y menor estabilidad registrada y,
- d) Se escoge de las probetas anteriormente separadas, la que contenga un porcentaje de material bituminoso más elevado y provoque un porcentaje de vacíos mínimo de 4.0%.

Se deberá tener en cuenta que si el contenido máximo de asfalto seleccionado en el punto (d), resulta ser el máximo registrado en el punto (a), será necesaria la preparación de nuevas probetas con porcentajes más elevados de asfalto (los incrementos se realizarán en intervalos de 0.5%) ya que se deberá asegurar mediante un nuevo análisis que el seleccionado es el más óptimo o que caso contrario, una de las nuevas mezclas creadas tendrá mejores rendimientos.



*Ilustración 6. Pirámide de determinación de contenido óptimo de asfalto. Fuente: Instituto de Asfalto (2005)*

## **CAPÍTULO 2: Ensayos de laboratorio. Equipos**

En este capítulo se describen los diferentes equipos del laboratorio de asfaltos de la Universidad Católica de Cuenca, brindando sobre estos: datos generales, indicaciones para su instalación, normas de seguridad, funcionamiento del equipo durante la ejecución del ensayo, calibración, entre otras indicaciones.

## 2.1 Descripción general de los equipos

### 2.1.1 Equipo multiusos automático ensayos CBR – Marshall

#### 2.1.1.1 Descripción

Para la descripción de este equipo, se basa la investigación en (Pinzuar LTDA, 2002), quien nos dice que el equipo multiusos automático de ensayos CBR - Marshall es un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta ensayada y mide la carga y deformación.

Como el nombre de este equipo lo indica, su sistema se automatiza y facilita el manejo, desempeño, precisión y registro de datos de ensayos, garantizando rapidez en los ensayos Marshall, Triaxiales y CBR. La configuración de este equipo permite la selección automática de las velocidades para los ensayos, claro está, en función de las normas aplicadas en cada ensayo. Se presume de su facilidad para registrar datos y resultados de cálculo de manera computarizada. En caso de operación mecánica, la prensa reversible funciona con la acción de un motor eléctrico servo controlado, con el fin de permitir un avance controlado de la velocidad y su retorno inmediato para iniciar un nuevo ensayo. La interfase entre el usuario y la máquina se produce a través del tablero de control, mismo que posee un indicador digital de fuerza y desplazamiento.

Mientras se realizan los ensayos, el desplazamiento, la penetración y la deformación de determinan por el avance del tornillo, lo cual certifica que los datos obtenidos son exactos. La fuerza que el equipo aplica a la muestra durante los ensayos, se controla de manera automática y con extrema precisión gracias a sus celdas de carga intercambiables, lo cual avala resultados exitosos en la realización de ensayos desde suelos, arcillas muy blandas, hasta suelos de alta resistencia.

La presencia de un computador en el equipo y un software especializado en la captura de datos en tiempo real, permite graficar y generar reportes en hojas de cálculo; previo al ensayo, se registrarán los datos de la muestra. La impresión de los resultados se realiza con cualquier impresora compatible con la computadora.

A continuación se presentan las especificaciones técnicas para operación del equipo:

<b>Rango de fuerza</b>	Rango bajo: 0-5 kN: compresión Rango alto: 0-50 kN: compresión
<b>Clase de exactitud</b>	0.5 % desde el 10% para cada rango
<b>Rango de desplazamiento (penetración, elongación)</b>	50 mm
<b>Exactitud de la medición desplazamiento</b>	0.5 % $\pm$ 0.05mm de desplazamiento
<b>Velocidad de desplazamiento:</b> Marshall CBR Inconfinada 2.8"	50.8 mm/min (2 plg/min) 1.27 mm/min (0.05 plg/min) 1.4224 mm/min (0.0056 plg/min)
<b>Celdas de carga</b>	2 celdas de tipo "S", tensión/compresión Rango bajo: 0-5 kN Rango alto: 0-50 kN
<b>Operación</b>	220 VAC/110 VAC monofásica (según modelo) 1200 W, Polo a tierra obligatorio
<b>Dimensiones</b>	Totales 1000x1700x600 mm <sup>3</sup> Útiles 30x40x40mm <sup>3</sup>
<b>Peso</b>	132kg

Tabla 42. Especificaciones técnicas del equipo multiusos automático para ensayos CBR-Marshall. Fuente: Pinzuar LTDA (2002)

### 2.1.1.2 Instalación

Debido a su peso, esta máquina deberá ser manipulada bajo condiciones de seguridad física adecuadas. Para su correcto funcionamiento del equipo se deberá:

- a) Constatar que la máquina esté nivelada e instalada sobre una superficie de trabajo lo suficientemente resistente, estable y espaciosa,
- b) Tener una distancia de al menos 20 cm por la parte trasera del equipo, separado de cualquier pared u equipos de alrededor,

- c) Verificar su correcta nivelación mediante sus soportes nivelables antes de que la máquina entre en funcionamiento y,
- d) Revisar la seguridad del lugar y verificar la nula existencia de peligros.

Para que la máquina pueda prevenirse de accidentes y daños se tendrá la obligación de:

- a) Verificar la correcta instalación el equipo,
- b) Revisar la firmeza de las columnas, la posición y seguridad de las tuercas y el travesano,
- c) Verificar que el voltaje y la frecuencia eléctrica son las especificadas en el manual,
- d) Conectar el equipo a la red eléctrica, presionar el botón de encendido general y esperar 15 minutos antes de iniciar los ensayos,
- e) Constatar que el plano no haya tenido desplazamientos, caso contrario, bajarlo por completo con el pulsador de bajada,
- f) Colocar el dispositivo de medición auxiliar y activar el pulsador que corresponda al ensayo que se requiera realizar; para detener el ensayo se utilizará el mismo pulsador y finalmente,
- g) Regresar el plato de carga a su posición inicial (desplazamiento cero).

Para evitar daños en los equipos, se deberá: revisar de manera periódica las columnas y tuercas de sujeción, asegurándose que las mismas estén estables y apretadas, asegurar que la correa se conserve tensionada, verificar el buen estado de los microswitch y comprobar el engrasado de los mecanismos de sin fin y corona cada seis meses.

### **2.1.1.3 Seguridad**

En caso de que el equipo presente falla, el mantenimiento se realizará por personal debidamente capacitado para este fin, el cual se cerciorará de que el equipo se encuentre desconectado de la

toma de energía eléctrica antes de realizar cualquier manipulación; en caso de que para el mantenimiento se requiera el uso de energía eléctrica, solamente el personal técnico certificado podrá realizar este trabajo. Será prudente constatar que las manos del técnico se encuentren secas o libres de cualquier sustancia líquida que pudiere afectar el equipo o la seguridad del manipulador. Antes de la conexión del equipo a la energía eléctrica, habrá que verificar que la toma de corriente cumpla con las exigencias especificadas en la tabla anterior.

En caso de que durante el funcionamiento del equipo se detecte algún inconveniente y sea necesario detener inmediatamente el mismo, se cuenta con un botón de parada de emergencia (botón N°6 en la siguiente imagen), el cual detendrá automática e inmediatamente la operación mediante el corte total de alimentación eléctrica.



*Ilustración 7. Tablero de indicación y control del equipo multiusos automático para ensayos CBR-Marshall. Fuente: Pinzuar LTDA (2002)*

En cuanto a la imagen anterior, las partes del tablero son según (Pinzuar LTDA, 2002): “(1) Indicador digital de fuerza, esfuerzo, desplazamiento, flujo, penetración, tiempo, velocidad, deformación, tipo de ensayo y rango de trabajo, (2) Teclado de membrana con funciones tale como:

entrada de datos numéricos, entrada a menú principal, confirmar entrada, restaurar pantalla, bajar o subir plato de carga, selección de tipo de ensayo, etc., (3) Encendido general, formado por un interruptor con piloto, (4) Puerto USB, (5) Fusible y (6) Parada de emergencia”.

#### **2.1.1.4 Software**

Esta herramienta permite la documentación adecuada, exacta, precisa, rápida y confortable de los ensayos realizados mediante el registro de parámetros, resultados de ensayos y el suministro de herramientas de cálculo, reportes y consultas inmediatas.

Este software se especializa en el registro de ensayos: CBR, Compresión inconfiada, Ensayos triaxiales y Ensayos de compresión Marshall; todos los ensayos siguen las normativas vigentes según ASTM e INVIAS.

Permite el llenado automático de hojas de cálculo con los datos obtenidos de los ensayos, conforme éstos se vayan desarrollando, permitiendo observar en tiempo real las curvas y cálculos de resultados; posteriormente el usuario estará en la posibilidad de completar el documento con las respectivas observaciones. Es importante que si se desea guardar la hoja de cálculo con los datos de los ensayos, se lo haga con un nombre diferente y en una diferente ubicación que la designada por defecto.

#### **2.1.1.5 Ensayos**

Este equipo coloca automáticamente en cero sus medidores y variables internas al momento de encendido el mismo y los mantiene así mientras la lectura de la fuerza no cambie. Cuando se pretenda iniciar con el registro de datos (desde la colocación de la muestra a ser ensayada), se recomienda que se ponga en cero nuevamente todos los medidores, lo cual permite un chequeo, verificación y validación de datos más preciso y fácil. Es importante que mientras se ejecute un

determinado ensayo, el operador esté siempre alerta ante posibles sobrepasos de los límites de carga máxima, ya que el equipo permite la detección de este fenómeno mediante un mensaje de advertencia, pero no detiene la máquina automáticamente, por lo que será deber del usuario el hacerlo.

Cuando se pretenda iniciar un ensayo, habrá que definir en el equipo los parámetros básicos tanto del ensayo como de la muestra ensayada, incluidas algunas características de la máquina de ensayo. Esta acción se realizará inmediatamente luego de que se haya seleccionado el tipo de ensayo que se va a realizar, observando en la pantalla ciertos parámetros configurados por defecto y otros con necesidad de registro para la documentación completa del ensayo; una vez registrados los parámetros, se dará clic en “INICIAR” para guardar los datos (en caso de parámetros erróneos, el equipo se encargará de informarlo). Los parámetros mencionados serán:

<b>Parámetro</b>	<b>Registro</b>
Fecha	Automático
Hora	Automático
Número de ensayo	Automático
Identificación de la muestra	Manual en sistema alfanumérico
Ítem N°	Manual en sistema numérico
Nombre del cliente	Manual hasta 50 caracteres
Nombre del proyecto	Manual hasta 50 caracteres
Locación	Manual hasta 25 caracteres
Nombre del material	Manual hasta 50 caracteres
Descripción del material	Manual hasta 150 caracteres
Fecha de muestreo	Formato: año-mes-día (aammdd)

Tabla 43. Parámetros necesarios para el inicio de los ensayos. Fuente: Pinzuar LTDA (2002)

#### **2.1.1.5.1 Ensayo Marshall**

Se coloca el comparador de carátula digital en el soporte de molde de estabilidad y se conecta el cable de interfase, verificando que su lectura aparece en la pantalla de trabajo. Para este ensayo, se requiere el ingreso de datos de identificación de la muestra, con un máximo de 18 ítems y registro de la altura de estas. Una vez que el ensayo se encuentra en curso, los datos de deformación

se registran como un flujo (mm) y la fuerza como estabilidad (kN) o estabilidad corregida para el caso de probetas con altura diferente a 63.5mm. La carga es aplicada lentamente a la probeta mediante dos cabezales (superior e inferior), aumentando la misma y la lectura del indicador de cuadrante. Una vez que la probeta falla, se obtiene la carga máxima aplicada a través del medidor del valor de Estabilidad Marshall.

#### **2.1.1.5.2 Ensayo CBR**

Se coloca el comparador de carátula digital en el trípode mediante un sujetador magnético y se conecta el cable de interfase. En cuanto a la identificación de la muestra, es necesario identificar el N° de ítem; el equipo permite el ensayo de 3 ítems o muestras. Una vez que el ensayo entra en acción, inicia el registro (en mm) de penetración del pistón en la muestra, así como de la fuerza aplicada (en kN); el esfuerzo se calcula para un pistón estándar de 1935.48 mm<sup>2</sup>.

#### **2.1.1.5.3 Ensayo de compresión inconfiada**

Se coloca el comparador de carátula digital rosando el plato de carga mediante un sujetador magnético y se coloca el cable de interface. Al registrar la muestra, se ingresarán datos referentes a los diámetros de la muestra (lo cual permitirá el cálculo del área promedio) y su altura (lo cual facilitará el cálculo de la corrección del esfuerzo). Los ensayos registran la deformación de la muestra (en mm) y la fuerza aplicada (en kN); el esfuerzo corregido se determina desde el valor promedio del área y la altura inicial de la muestra.

#### **2.1.1.5.4 Ensayos triaxiales**

Se coloca el comparador de carátula digital rosando el plato de carga mediante un sujetador magnético y se coloca el cable de interfase. Se deberán registrar datos de la muestra referentes a su diámetro (con el fin de calcular el área promedio) y su altura (con el fin de calcular la corrección del esfuerzo). La ejecución del ensayo da como resultado el registro de la deformación de la

muestra (en mm) y la fuerza aplicada (en kN); se calculan el esfuerzo corregido en función del valor del área promedio y la altura inicial de la muestra.

### **2.1.1.6 Calibración**

En lo que a calibración del equipo respecta, será absolutamente necesario que esta acción se realice solamente por personal técnico calificado, quienes emplearán patrones de fuerza y longitud adecuados, controlando la velocidad de forma manual. En cuanto a los comparadores de carátula, su calibración se realizará en un laboratorio de metrología. Si los resultados de la calibración no son satisfactorios, se recomienda el uso de un patrón de calibración, aplicando cargas (repetidas) y observando si la lectura se repite.

## **2.1.2 Molde de estabilidad**

### **2.1.2.1 Descripción**

Basado en (Pinzuar LTDA, 2002), el molde de estabilidad es un instrumento que se usa conjuntamente con el equipo de ensayo Marshall, cuyo fin es el de actuar como una mordaza para facilitar la compactación de la mezcla. Sus dimensiones varían según el ensayo Marshall, siendo éstas las siguientes:

Para el ensayo Marshall 4”: su diámetro interno será de 101.6mm (4plg), al altura y ancho del molde será de 76.2mm y su peso será igual a 8kg.

Para el ensayo Marshall 6”: su diámetro interno será de 152.4mm (6plg), la altura del molde será de 66.7mm y su ancho de 108mm y finalmente, el peso del molde será de 15kg.

### **2.1.3 Máquina de los ángeles**

#### **2.1.3.1 Descripción**

Según lo descrito por (Pinzuar LDTA, 2013), este equipo se desarrolló para cumplir con las normas ASTM, INVIAS y NTC; iniciando con la descripción de la máquina de los ángeles, se dice que es un equipo utilizado en el laboratorio de asfaltos con el fin de establecer la resistencia a la abrasión de los agregados. Los componentes principales de esta máquina, son un tambor de diámetro y longitud internas igual a 711 mm 508 mm respectivamente y el sistema controlador digital automático programable, encargado de activar o desactivar el motor cuya potencia es igual a 1 HP, permitiendo el giro del tambor (gracias a este control, el tambor se detiene automáticamente una vez que completa su ciclo de vueltas); dicho tambor se encuentra ensamblado sobre un soporte metálico mediante ejes y rodamientos.

El equipo contiene un juego de 12 esferas cuyos pesos están entre 390g y 445g; su capacidad es de un total de 10 kg, lo cual se reparte en 5 kg para la muestra de agregados y 5 kg para la carga de las esferas. El tambor rota a una velocidad de 30 rpm hasta 33 rpm y contiene una tapa adaptada para no permitir el paso de polvo (cierre para su retención). En cuanto a su alimentación eléctrica, se deberá conectar a corriente alterna de 110 VAC/60 Hz o de manera opcional a 220 VAC / 50 Hz.

#### **2.1.3.2 Instalación**

El sitio sobre el cual se asentará el equipo (piso de laboratorio nivelado), deberá permitir su anclaje y estabilidad, sin que se generen vibraciones y/o movimientos de ningún tipo cuando el ensayo se encuentre en curso, Se deberá conectar a una fuente de energía que cumpla con las características ya mencionadas en el numeral anterior, dicha fuente de poder, tendrá polo a tierra y capacidad de carga de 20 A.

Debido a su peso, la máquina de los ángeles será transportada por un número adecuado de personas y siguiendo todos los lineamientos de seguridad física. La instalación del equipo se realizará dejando una distancia mínima de 20 cm medida desde la pared u otro equipo, hasta el perímetro de la máquina.

La instalación a la fuente de energía para la máquina, deberá ser verificada con el objetivo de asegurar su correcto funcionamiento, ya que de no ser así, el equipo sufrirá daños y el personal correrá riesgos eléctricos.

### **2.1.3.3 Seguridad**

En cuanto a la seguridad del equipo, se tendrán en cuenta las siguientes especificaciones:

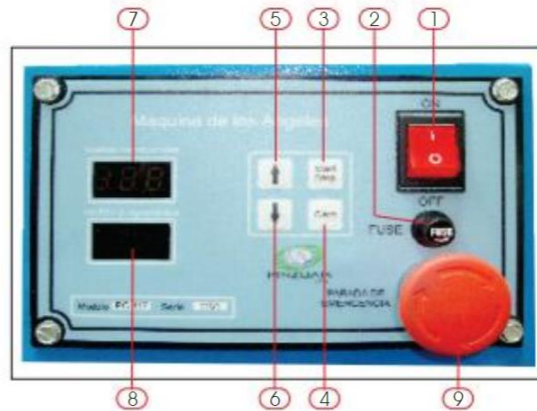
- a) Verificar que la alimentación eléctrica es la misma que se indicó en el numeral anterior,
- b) En caso de mantenimiento, el equipo deberá desconectarse de la alimentación eléctrica antes de iniciar con su manipulación,
- c) Para el uso del equipo se seguirán las especificaciones descritas en las respectivas normas aplicables para el ensayo de abrasión, ya que el uso inadecuado de la máquina podría traducirse en daños a la misma o lesiones al usuario,
- d) Cuando se observe un daño en el equipo, se apagará el mismo inmediatamente y se procederá a desconectarlo de la toma de corriente,
- e) El equipo se operará luego de la verificación de que las manos del usuario no contengan ninguna sustancia líquida,
- f) Será importante la revisión de todos los avisos de seguridad (“PRECAUCIÓN” o “PELIGRO”) establecidos en el manual de usuario del equipo, ya que los mismos nos advierten de posibles peligros que el operador o la máquina podrían sufrir,
- g) Si se planea realizar mantenimiento, se asegurarán todas las piezas móviles,

- h) Se deberá verificar que el espacio alrededor del equipo es el adecuado para que el mismo funcione de manera correcta, garantizando la certeza de los datos obtenidos en los ensayos, tal como se describió anteriormente,
- i) Se deberán utilizar elementos de seguridad personal cada vez que se realice un ensayo en el equipo y finalmente,
- j) Se adecuará la instalación de la máquina en un sitio cuyo diseño permita disminuir la contaminación auditiva (por ejemplo, un cuarto de aislamiento acústico), ya que dicha contaminación generada por este equipo es muy alta.

#### **2.1.3.4 Contador**

El contador digital que posee la máquina de los ángeles, consta de las siguientes partes: (1) Interruptor de encendido, el cual controla el encendido general de la máquina, (2) fusible de protección, el cual protege al contador ante un posible problema eléctrico, (3) Tecla para iniciar o parar el ensayo sin reiniciarlo (en caso de que el ensayo fue detenido, esta misma tecla permite que continúe), (4) Tecla para terminar el ensayo/borrar número de vueltas dadas; si se está llevando a cabo un ensayo, esta tecla terminará el mismo y en caso de que no se esté realizando ninguna acción, borrará el contador de vueltas, (5) Tecla para ajustar el número programado de forma ascendente, el cual permite incrementar el contador que determina la duración del ensayo, (6) Tecla para ajustar el número programado de porfa descendente, el cual realiza la misma función que el número (5), pero en forma descendente, (7) Pantalla de indicación de número de vueltas dadas, el cual inicia en cero y aumenta cada vez que se completa una vuelta hasta llegar a cumplir con el número programado, (8) Pantalla de indicación del número programado, la cual muestra el número de giros que el tambor deberá completar antes de detener el ensayo, y (9) Paro de

emergencia, el cual una vez presionado, permite detener el ensayo en caso de observarse cierta anomalía, para posteriormente retirar de forma segura el enchufe de la toma de energía.



*Ilustración 8. Partes del contador digital de la máquina de los ángeles. Fuente: Pinzuar (2002)*

## 2.1.4 Equipo para ensayos RICE

### 2.1.4.1 Descripción

(Pinzuar LTDA, 2013) describe el uso de este equipo para básicamente la realización de ensayos de determinación de gravedad específica y densidad de materiales asfálticos u otros materiales. El recipiente del equipo tiene una capacidad de 10000 ml, mismo que está hecho de policarbonato. El equipo RICE consta de una bomba de vacío con un motor de 1/6 HP y 1680 rpm, trampa de agua, picnómetro en acrílico con 6000 ml de capacidad, vacuómetro graduado de 0 a 30 in Hg (700 mm Hg), mangueras y conexiones. El desplazamiento de aire libre se genera a una velocidad de 85 lt/min o  $3\text{pie}^3/\text{min}$ . El equipo funciona a una temperatura que varía desde 0 a 78°C y con corriente alterna de 220 VAC o 110 VAC/60Hz.

### 2.1.4.2 Seguridad

Son varios los cuidados de seguridad que al momento de manipular el equipo se deberán tener, especialmente centrados al cuidado de este, ya que sus piezas podrían resultar con daños. Se deberá

tener especial cuidado en no golpear la tapa del recipiente ni permitir la caída de material sobre la misma para evitar rupturas, al momento de realizar mantenimiento al picnómetro, no se deberá limpiar con gasolina ni ningún tipo de solvente, se deberá restringir por completo el paso de agua a través del vacuómetro hasta la llave de cierre, se tendrá especial cuidado de no introducir ningún tipo de partículas extrañas a la bomba de vacío, llave de cierre o al filtro, la tapa del picnómetro no se deberá retirar si está en vacío, halando del vacuómetro y por último, para iniciar con un ensayo se halará el drenaje (con la bomba apagada) de la unidad de mantenimiento, sosteniéndola por un mínimo de 5 segundos para asegurar el sello, repitiendo la misma acción cuando la unidad de mantenimiento se encuentra con agua en el vaso recolector.



*Ilustración 9. Drenaje para sello y máximo nivel de agua del vaso recolector en el equipo de ensayos RICE. Fuente: Pinzuar (2002)*

### **2.1.4.3 Ensayos**

Para la realización de ensayos con este equipo, se deberán seguir los siguientes lineamientos:

- a) Verificar la limpieza del recipiente, asegurándose de que el mismo esté libre de residuos de ensayos anteriores,
- b) Quitar la tapa del recipiente e introducir la muestra,

- c) Añadir agua en función del ensayo que se vaya a realizar y la norma vigente que se esté aplicando,
- d) Verificar la ubicación del empaque de sellado y colocar la tapa del recipiente,
- e) Mediante la llave de cierre, facilitar el paso libre de aire,
- f) Verificar la fijación de los acoples de la manguera que conecta la bomba con el picnómetro,
- g) En función de la norma que se esté aplicando, permitir la disminución de la presión con la activación de la bomba,
- h) Desactivar la llave de cierre (cerrarla),
- i) Detener la bomba de vacío,
- j) En caso de que se necesite una válvula de admisión, colocar una manguera en el recipiente de agua, permitiendo la entrada de esta al recipiente del picnómetro,
- k) Una vez finalizado el ensayo, liberar la presión de vacío mediante el paso de aire con la válvula, y finalmente,
- l) Destapar el recipiente que contiene a la muestra, retirarla, limpiar el recipiente y continuar con el desarrollo del ensayo.

## **2.1.5 Mesa vibratoria**

### **2.1.5.1 Descripción**

Tal como su nombre lo indica y según lo descrito por (Pinzuar LTDA, 2002), este equipo tiene por objetivo la generación de vibraciones, mismas que a su vez lograrán reducir el aire contenido en una muestra en ensayos RICE y permitirán generar asentamientos en muestras sueltas y obtener densidades compactadas en laboratorio.

La base del equipo está formada por soportes antideslizantes; su plataforma es cuadrada, de acero inoxidable y con dimensiones de 30cm de lado; el sistema de resortes presentes en dicha

plataforma permite que la muestra a ser ensayada se sujete firmemente de forma rápida. La operación de este equipo se genera a 110VAC, 50/60Hz o de manera opcional, se permite su conexión a 220VAC.

## **2.1.6 Equipo para ensayo de flotabilidad**

### ***2.1.6.1 Descripción***

El equipo para ensayo de flotabilidad cumple con sus objetivos al trabajar vinculado con una balanza electrónica y una canasta de densidades, mediante la cual se logran determinar la gravedad específica y la densidad de los agregados analizados. Basado en (Pinzuar LTDA, 2002), las dimensiones del equipo son de 50cm x 80cm x 110cm y la canasta puede lograr un recorrido vertical de 45cm. El equipo tiene un peso total de 35kg. La balanza es de tipo electrónica y su capacidad es de 15kg, dividido en escalas de 1g; el pesaje se realiza por debajo.

## **2.1.7 Canasta para densidades**

### ***2.1.7.1 Descripción***

Según (Pinzuar LTDA, 2013), las canastas para densidades son recipientes formados por malla N°6 o N°8, y son construidos para el manejo de agregados que se pesan con agua y se usan conjuntamente con el equipo para ensayo de flotabilidad (para la determinación de peso y densidad en función de la teoría de Arquímedes). Su diámetro es de 8plg (203.2mm), al igual que su altura.

## **2.1.8 Horno eléctrico programable digital**

### ***2.1.8.1 Descripción***

En función de lo descrito por (RC INGTEC, 2019), se puede decir que la tecnología presente en este horno permite que el usuario pueda garantizar la temperatura de trabajo en tiempos relativamente cortos, con exactitud y de manera homogénea en todo el interior del horno,

certificando que los ensayos tendrán mayor precisión en los resultados. Su pantalla táctil permite programar funciones específicas para cada trabajo.

El horno permitirá al usuario obtener temperaturas que varían desde los 5°C hasta los 200°C con un error de  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ; en cuanto a la homogeneidad de la temperatura, el sistema de circulación forzada de aire permite que esta sea posible y la misma se puede verificar en la pantalla táctil a través de la gráfica de temperatura de la cámara vs. tiempo, pudiéndose programar dicho tiempo en minutos o segundos.

A más de esto, el horno permite revisar parámetros de temperatura exterior, voltaje (en los sensores y sistema de control y medición) y corriente de entrada. El manejo del horno se facilita aún más mediante la programación, la cual permite la activación y desactivación de este de manera automática a través de la configuración de fecha y hora. Para su funcionamiento se requiere de alimentación eléctrica de 220VAC o en su defecto, 110VAC.

### **2.1.8.2 Instalación**

Siguiendo las indicaciones de (Pinzuar LTDA, 2013), la superficie sobre la cual se asentará el horno, deberá ser plana, nivelada y estable con el fin de evitar vibraciones. El sitio en el cual el horno permanecerá, no deberá exponerse a la luz directa del sol, a fuentes de calor, a humedad, a polución ni a temperaturas extremas. Se buscará el sitio más adecuado para la colocación del horno en cuanto a sus dimensiones (el volumen del horno es de 300lt y sus dimensiones son: 880mm x 950mm x 940mm)

Previo al encendido del horno, se verificará en el mismo la correcta colocación de las parrillas y la tapa protectora.

### 2.1.8.3 Seguridad

La fuente de energía para el horno deberá cumplir con los estándares indicados anteriormente; a más de esto, se recomienda el uso de un estabilizador de voltaje con el fin de evitar posibles daños eléctricos en el horno.

Una vez que se pretenda utilizar el horno, se iniciará conectándolo a la fuente de energía y accionándolo mediante la muletilla en la posición “ON”. Siempre se verificará que la puerta del horno esté cerrada antes de iniciar un proceso con el mismo.

Si se pretende abrir el horno cuando éste se encuentra a altas temperaturas, el usuario no deberá acercarse de manera frontal ya que podría recibir una ola de calor; la apertura se realiza lateralmente. De igual manera, para seguridad del usuario se recomienda el uso de insumos de seguridad, especialmente guantes de protección de calor para la interacción muestras-horno.

El ventilador de la cámara deberá estar libre, sin el contacto con ningún objeto. El ventilador externo se revisará frecuentemente para asegurar su correcto funcionamiento.

Las parrillas del interior del horno son un total de 3 y cada una soporta una carga igual a 10kg (el horno soporta una carga total de 40kg), por lo que es importante que no se exceda en el peso de la muestra que se esté tratando. De igual manera, no se colocará ninguna especie de carga sobre el horno para evitar daños del mismo.

Se deberá cuidar que en el horno no se coloquen químicos u otros reactivos que pudieran activarse con el calor. El horno deberá estar exento de golpes y no se usará para enfriamientos acelerados de agua u otros líquidos ya que podrían dañar el equipo.

Una vez que finaliza la operación del horno, se retirarán todos los residuos del interior.

## **2.1.9 Baño maría inoxidable digital**

### **2.1.9.1 Descripción**

En el laboratorio de asfaltos, muchas de las veces se requiere tratar una muestra con calentamientos a temperaturas constantes (como por ejemplo, en el desarrollo del ensayo Marshall). Es aquí en donde entra en juego el equipo para baño maría, el cual según (Pinzuar LTDA, 2013), contiene para su manejo, un sistema de medición y control programable de temperatura, lo cual garantiza exactitud en los ensayos. La temperatura de trabajo de este equipo oscila entre 40°C y 90°C, con una estabilidad de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . La alimentación eléctrica del equipo será de 110VAC 50/60Hz o de manera opcional, 220VAC

### **2.1.9.2 Instalación**

El equipo se deberá colocar sobre una superficie plana, nivelada y estable, diseñada para soportar el peso de éste cuando se encuentre en funcionamiento, es decir, cuando las muestras estén dentro de él. El espacio a su alrededor deberá ser suficiente para su manejo cómodo, fácil, eficiente y seguro. Se deben evitar todos los golpes a la máquina.

La conexión a la fuente de energía se realizará una vez que el agua esté dentro de la tina, procediendo a encenderlo y programarlo a la temperatura de trabajo. Es recomendable que una vez que se da por terminado el ensayo, el equipo sea apagado y desconectado de su alimentación eléctrica.

## **2.1.10 Tamizadora eléctrica para finos**

### **2.1.10.1 Descripción**

En base a (Pinzuar LTDA, 2013) este equipo funciona mediante giros circulares continuos a razón de 60Hz, lo cual asegura la distribución de una muestra en función del tamaño máximo de

sus partículas (ensayo de granulometría). El tiempo de acción de la tamizadora se controla con su temporizador digital integrado. Tiene capacidad para un máximo de 7 tamices de diámetro igual a 8plg, sin contar el fondo y la tapa. La toma de corriente se permite de una fuente de energía de 110VAC o 220VAC con conexión a tierra.

La tamizadora contendrá los siguientes botones en su tablero:



*Ilustración 10. Partes del tablero de la tamizadora. Fuente: Pinzuar*

- (1) Interruptor de encendido, el cual se encarga del encendido general del equipo.
- (2) Fusible de protección, el cual evita daños en el equipo en caso de un cortocircuito o una descarga estática o atmosférica.
- (3) Tecla para iniciar o detener el ensayo sin reiniciarlo, la cual permite en primera instancia iniciar un ensayo y, mediante un segundo clic, detiene el ensayo momentáneamente; un tercer clic hará que el ensayo continúe desde el punto en el que se detuvo.
- (4) Tecla para terminar el ensayo / borrar tiempo transcurrido, la cual mediante un clic, permite que el ensayo finalice (en caso de que se encuentre en ejecución), caso contrario, volverá a cero el contador de tiempo transcurrido.

- (5) Tecla para ajustar el tiempo programado de forma ascendente, la cual permite al usuario aumentar el tiempo de duración del ensayo.
- (6) Tecla para ajustar el tiempo programado de forma descendente, la cual permite reducir el tiempo de duración del ensayo.
- (7) Indicador de tiempo transcurrido, en donde se podrá observar cuánto tiempo ha pasado desde el inicio del ensayo; el ensayo se detiene cuando el tiempo transcurrido es igual al tiempo programado.
- (8) Indicador de tiempo programado, en donde se podrá observar cuánto tiempo durará el ensayo (valor modificado por el operador con los botones (5) y (6)).
- (9) Paro de emergencia, el cual es un botón que al ser presionado y, en caso de observarse alguna anomalía, corta el paso de energía eléctrica, deteniendo el ensayo (en caso de que se esté ejecutando alguno) automáticamente y/o apagando el equipo.

#### ***2.1.10.2 Instalación***

El sitio de empalme del equipo deberá tener características de rigidez, estabilidad y nivelado, teniendo en cuenta el espacio necesario para el desarrollo adecuado de éste (la separación entre la este equipo y la pared u otros equipos será mínimo de 20cm). Se debe proteger de la exposición al sol, humedad, agua, temperaturas extremas y polución extrema para evitar daños.

Al momento de transportar el equipo, se tendrá especial cuidado ya que éste tiene un peso elevado que hace imposible su transporte por una sola persona. El transporte se realiza desde la base de la tamizadora y no desde el marco de tamizado, ya que este último podría sufrir daños.

#### ***2.1.10.3 Seguridad***

El primer punto a tener en cuenta es el verificar el voltaje de la toma de corriente y el de la máquina; si se observa alguna especie de falla mientras se realiza un ensayo, se procederá a apagar

inmediatamente el equipo y a su posterior desconexión de la fuente de energía; en caso de que se requiera realizar mantenimiento (se contactará al personal técnico adecuado, el cual realizará el mantenimiento del equipo con todas las medidas de seguridad), se deberá asegurar que el equipo está separado de la fuente de energía antes de manipular su carcasa u otro componente; es importante tener las manos libres de cualquier líquido antes de manipular el equipo y; finalmente verificar que las partes móviles del equipo se encuentren debidamente sostenidas antes de empezar un ensayo y antes y después de un mantenimiento.

La seguridad del usuario es muy importante, por lo que se recomienda prestar mucha atención a las etiquetas de seguridad y precaución con el fin de evitar lesiones al personal.

#### ***2.1.10.4 Operación***

Para accionar el equipo se seguirán los siguientes pasos: (a) conectar el equipo a la fuente de energía y presionar la tecla de encendido, (b) Colocar los tamices y fijarlos al marco de tamizado a través de las platinas de aluminio colocadas sobre las varillas verticales, (c) programar el tiempo de duración del ensayo y finalmente (d) iniciar el ensayo, el cual concluirá cuando el tiempo programado termine.

Cuando el ensayo finalice, verificar siempre que los implementos utilizados queden completamente limpios

### **2.1.11 Extractor Centrífugo de asfaltos de 1500g**

#### ***2.1.11.1 Descripción***

En el análisis de una mezcla asfáltica, el extractor centrífugo tiene un fin muy particular, el cual consiste en la determinación del porcentaje de material bituminoso en dicha mezcla. Para el caso del extractor centrífugo descrito por (Cotecno, 2020), éste se diseñó a prueba de explosiones, lo

cual garantiza la seguridad del usuario. El tazón de aluminio que lo conforma, es de tipo desmontable, lo cual permite el manejo rápido de la muestra. Contiene una perilla de control, con la cual se determina la velocidad de giro, pudiendo llegar a generar hasta 3600rpm y, un freno eléctrico, el cual detiene el proceso de centrifugación en pocos segundos una vez completada la operación. El equipo tiene integrada una taza de vertido de solvente. La ubicación del equipo se realizará en un sitio con buena ventilación.

### ***2.1.11.2 Instalación***

La descripción de (Pinzuar LTDA, 2013) indica que una buena instalación del extractor centrífugo, consta de brindarle al mismo el espacio necesario para su correcto funcionamiento, en un piso firme, estable y nivelado; se tendrá un espacio libre de al menos 20cm a la redonda del equipo.

En cuanto a la instalación eléctrica, el equipo trabaja a 110VAC o 220VAC con conexión a tierra para garantizar que la seguridad.

### ***2.1.11.3 Seguridad***

Como todo equipo de laboratorio, este tiene precauciones de seguridad que aseguran una larga vida útil del equipo, así como el bienestar del usuario. Basando esto en (Pinzuar LTDA, 2013), se puede decir que las normas de seguridad a seguir indican que:

- a) Se verificará que el voltaje del equipo coincida con el de la fuente de energía,
- b) La carcasa del equipo la removerá solamente personal técnico certificado y se hará cuando se requiera mantenimiento del equipo previa desconexión de la fuente de energía,

- c) Cuando se observe un error o anomalía en el equipo, antes, durante o después de un ensayo, éste deberá ser apagado y posteriormente separado de fuente de energía para iniciar las respectivas revisiones,
- d) Las manos del o los usuarios estarán siempre libres de sustancias líquidas mientras se opere el equipo,
- e) Se prestará atención a todas las advertencias y mensajes de precaución o peligro con el fin de evitar daños al equipo y lesiones al personal y finalmente,
- f) Se deberán asegurar todas las piezas móviles del equipo antes de iniciar con un ensayo y antes y después de finalizar la etapa de mantenimiento del extractor.

#### **2.1.11.4 Ensayos**

Para el correcto funcionamiento del equipo, se deberá asegurar el cumplimiento de los siguientes pasos para su operación:

- a) Soltar las abrazaderas de cierre para retirar la cubierta,
- b) Retirar la taza del eje conjuntamente con la tapa,
- c) Las muestras se obtendrán de una mezcla asfáltica y la misma deberá ser blanda, es decir, deberá ser trabajable; en caso de que no lo sea, la muestra se calentará en un horno evitando los excesos (es importante no calentar la muestra en la taza del extractor), para posteriormente proceder con el cuarteo y obtener una muestra con una masa apropiada para la ejecución de la prueba,
- d) Distribuir la muestra sobre la taza de manera uniforme, sin aplastar las partículas (si la muestra fue precalentada, se dejará enfriar la misma),
- e) Pesar la taza que contiene la muestra a ser ensayada,

- f) Una vez colocada la muestra en la taza, en el borde de la misma (previa verificación de su limpieza), colocar el anillo filtrante, luego de que este haya sido secado y pesado,
- g) Tapar la taza y asegurarla atornillando la tuerca sin excederse ya que podría generarse deformaciones en la tapa,
- h) Colocar la taza en el extractor y posteriormente colocar la cubierta y las abrazaderas en su lugar, asegurándolas para el arranque del equipo (las abrazaderas se asegurarán de tal manera que produzcan solamente una ligera tensión para evitar daño en las mismas),
- i) Durante el desarrollo del ensayo, tener listo un recipiente para la retención del solvente que se expulsa del equipo,
- j) Verter el solvente a través del orificio de llenado con las siguientes consideraciones: para una muestra precalentada, esperar de 2 a 32 minutos para su absorción y para una muestra no precalentada esperar de 10 a 15 minutos,
- k) Abrir la perilla de velocidad de manera gradual hasta que se observe líquido a través del tubo de descarga, manteniendo esta velocidad hasta que la descarga sea nula; si al momento de iniciar el ensayo la perilla se encuentra abierta, el sistema del equipo acelerará automáticamente hasta llegar a las revoluciones indicadas por la perilla,
- l) Una vez que no se observe fluidos en el tubo de descarga, se deberá colocar la perilla en cero,
- m) Verter el solvente y continuar con el proceso anteriormente descrito hasta que la descarga tenga un color ámbar pálido, finalizando el proceso una vez obtenido el mencionado color,
- n) Retirar la cubierta y la taza y lavar la superficie inferior de la tapa en el recipiente de solvente y finalmente,

- o) Retirar el anillo de filtro y cepillar el mismo para eliminar los residuos sólidos adheridos, colocando dichos residuos en la taza.

Como una nota importante, se sabe que se deberá tener especial cuidado en no acelerar demasiado la velocidad del equipo o en no apretar excesivamente la tuerca de la tapa, ya que esto puede traducirse en pérdida de partículas finas.

## **2.1.12 Moldes para briquetas de asfalto**

### ***2.1.12.1 Descripción***

La descripción de los moldes para las briquetas de asfalto en el presente documento, se basa en (Pinzuar LTDA, 2013); las briquetas son especímenes creados con una mezcla asfáltica, moldeada y compactada; el molde será previamente engrasado con el fin de evitar que la mezcla se pegue a las paredes del mismo. La compactación se realiza perpendicularmente a la mezcla mediante un martillo de 10Lb y mediante volteo. Los moldes para briquetas de asfalto están compuestos por tres partes: molde, collar y placa base.

Las dimensiones de cada parte están en función del diámetro de la biqueta que se pretenda ensayar; para el caso de una biqueta de 4plg (101.6mm), el molde tendrá un diámetro interno de 101.6mm y una altura de 76.2mm, el collar tendrá un diámetro interno de 104.8mm y altura de 69.8mm y la placa base tendrá 120.5mm y 14mm de diámetro y altura respectivamente; para las briquetas de 6plg (152.4mm) el molde tendrá dimensiones de 152.4mm de diámetro interno y 114.3mm de altura, el collar tendrá 155.6mm de diámetro interno y 82.6mm de altura, finalmente, la placa base tendrá 171.5mm y 12.7mm de diámetro y altura respectivamente.

## **2.1.13 Pedestal de compactación Marshall**

### ***2.1.13.1 Descripción***

Los ensayos de estabilidad Marshall requieren de una previa preparación de la muestra a ensayar mediante su preparación y/o compactación de la mezcla en el laboratorio, siendo el pedestal de compactación Marshall muy útil para esta última acción. Según (Pinzuar LTDA, 2013), el uso pedestal de compactación de asfaltos para este trabajo, permite lograr muestras mucho más confiables en la repetitividad de los ensayos y en mayor cantidad.

### ***2.1.13.2 Instalación***

La colocación del molde y martillo se hace manualmente, primeramente subiendo el martillo y continuando con la colocación del molde con base y collar y su sujeción con el aro superior. Una vez completado este proceso, se coloca el papel filtro de fondo y se inicia con la colocación de la mezcla, golpeándola con una espátula por 15 ocasiones en todo su perímetro y 10 ocasiones en el interior; luego se coloca el martillo sobre la mezcla.

La acción del aro sujetador inferior es importante, ya que el mismo logra que el martillo no se desplace a los lados al mismo tiempo que le sirve de guía; una vez que los golpes del martillo hacia la mezcla al primer lado terminan, este mismo sujetador ayuda al usuario para que sea fácil retirar el molde y darle la vuelta para continuar con el proceso.

### ***2.1.13.3 Ensayos***

Para la realización de la compactación, se necesitará que el molde, placa de base, collar y base del martillo de compactación estén limpios y calientes, lo cual se logra con su preparación (conjuntamente con la preparación de la mezcla) mediante un baño de agua o su sometimiento a

temperaturas entre 93.3°C y 148.9°C (200°F y 300°F) dentro de un horno (el baño de agua se realizará a temperaturas dentro del mismo rango).

#### **2.1.13.4 Seguridad**

Resulta prudente que para el cuidado del equipo se tense la cadena aproximadamente cada 5000 golpes.

El espacio entre este y otros equipos o este equipo y paredes o cualquier objeto existente a sus alrededores deberá asegurar el funcionamiento sin problemas del pedestal de compactación y asegurar la seguridad del usuario.

#### **2.1.14 Martillo de compactación Marshall**

##### **2.1.14.1 Descripción**

Anteriormente se describieron algunos equipos necesarios para la realización de ensayos Marshall llegando a indicar en los procesos de estos ensayos, la necesidad de la compactación de la muestra. La compactación se realiza mediante impacto y bajo estándares establecidos en las normas vigentes. El cumplimiento de estos estándares se logra con el uso del martillo de compactación, el cual fue diseñado teniendo en cuenta diámetros, pesos, alturas y tipo de ensayo Marshall a realizar.

Basados en (Pinzuar LTDA, 2013), las características del martillo de compactación son:

<b>Ensayo</b>	<b>Diámetro de Base de impacto</b>	<b>Peso de martillo</b>	<b>Altura de caída</b>	<b>Peso</b>
Marshall 4"	100.3mm	4535g	457.2mm	9.5kg
Marshall 6"	149.4mm	10210g	457.2mm	17kg

*Tabla 44. Características del martillo de compactación. Fuente: Pinzuar LTDA*

## **2.1.15 Viga Benkelman**

### ***2.1.15.1 Descripción***

Según lo descrito por (Pinzuar LTDA, 2013), la Viga Benkelman se desarrolló con el fin de determinar estáticamente la deflexión elástica recuperada del pavimento flexible y radios de curvatura, según lo determinado por las especificaciones técnicas de las normas vigentes. Consta para su funcionamiento de dos brazos multiplicadores y dos comparadores de carátula análogos con capacidad de 25mm y división de escala de 0.01mm.

## **CAPÍTULO 3: Ensayos de laboratorio. Procedimientos**

El contenido de este capítulo describe todas las indicaciones necesarias para que el desarrollo de los diferentes ensayos obtenidos a través de la Norma Ecuatoriana Vial, generen resultados verídicos y verificables. Una descripción más detallada se podrá encontrar al revisar directamente las normas mencionadas en cada ensayo.

### 3.1 Generalidades

Los materiales utilizados en la construcción de cualquier obra civil, deben cumplir con requerimientos de calidad que aseguren su buena calidad y correcto desempeño, resguardando la inversión del contratante, así como la seguridad de los usuarios. Se sabe entonces que todos los materiales deberán pasar por ciertos ensayos antes de su utilización. Para el caso de las vías pavimentadas, se analizarán tanto la subrasante, así como la subbase, base y capa de rodadura.

Los ensayos de laboratorio para los materiales de una mezcla asfáltica, así como para la mezcla asfáltica en sí, son aspectos demasiado importantes ya que los datos obtenidos de estos procedimientos, muestreos y pruebas, sirven como indicadores de la calidad de dichos componentes y mezcla, es decir, nos proporcionarán información para deducir si el producto final cumplirá o no con las especificaciones de diseño. Queda claro entonces que tanto el muestreo como los ensayos deberán seguir sus respectivos lineamientos al pie de la letra, obteniendo resultados verídicos y comprobables. Las recomendaciones del (Instituto de Asfalto, 2005), indican que las muestras a ser ensayadas se deberán tomar de manera diaria en cantidades representativas en relación a la carga total utilizada en la mezcla; para el caso de las mezclas sin compactar, serán 2 por día en tamaños de 20Lb (9.0kg) y para las mezclas compactadas, serán 2 muestras de 15Lb (6.8kg) por día.

Para el estudio de las mezclas en caliente, se deberán realizar pruebas de calidad y verificación del cumplimiento de las especificaciones de diseño; dichas pruebas serán: Pruebas de extracción, Pruebas de análisis granulométrico y Pruebas de Análisis de estabilidad y densidad.

#### 3.1.1 Pruebas de Extracción

La descripción detallada de esta prueba se podrá encontrar en la normativa AASHTO T 168. El objetivo de esta prueba será la identificación del contenido asfáltico de una mezcla y el suministro

de agregado para el análisis granulométrico; se podría decir que esta prueba es la cúspide del total de pruebas realizadas tanto a los agregados como al material bituminoso que forman la mezcla, por lo que nos brinda características o especificaciones, indicadores de la calidad de la mezcla.

### **3.1.2 Pruebas de análisis granulométrico**

Una descripción detallada de esta prueba, se encuentra en la normativa AASHTO T 11 o T 27. Son pruebas que se deben realizar al agregado extraído (numeral 3.1.1) con el fin de verificar que la graduación de los agregados cumpla con las especificaciones de diseño.

### **3.1.3 Pruebas de análisis de estabilidad y densidad**

Estas pruebas se encuentran dentro de la normativa AASHTO T 209, T 245, T 246 y T 247. Una vez terminado el pavimento, las pruebas de densidad son útiles para garantizar que la mezcla fue correctamente compactada, es decir, cumpliendo con la condición que se mencionó en un numeral anterior del presente documento: La compactación en obra será como mínimo igual a la densidad máxima teórica o a la densidad obtenida en ensayos de laboratorio. Es necesario también la realización de ensayos a la mezcla en caliente a través de la toma de muestras en la planta de producción con el fin de verificar su calidad.

Con el cumplimiento de los requerimientos normados luego de la aplicación de cada ensayo, es decir con el control de calidad, se asegura que el diseño vial obtendrá condiciones perfectas para la vía, asegurando que los usuarios viajen seguros y cómodos, optimizando por lo tanto tiempo y dinero.

Para cumplir con los objetivos descritos, el presente documento contiene los pasos a ejecutar durante la realización de ensayos para el análisis de laboratorio de las muestras de base, subbase y

mezclas asfálticas, realizando una comparación entre las normas ecuatorianas y las normas del “Instituto Nacional de Vías de Colombia”.

## **3.2 Ensayos**

### **3.2.1 Granulometría**

#### **3.2.1.1 Generalidades**

En función de lo descrito por (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) las mezclas asfálticas fabricadas in-situ, atravesarán ensayos de granulometría del árido grueso utilizado con ligantes viscosos, o el utilizado con ligantes fluidos, mismas que se realizarán una vez por cada 500m<sup>3</sup> o fracción de material. Para este mismo tipo de mezclas asfálticas, los ensayos de granulometría del árido fino empleado con ligantes viscosos, tendrá una frecuencia de un ensayo por cada 100m<sup>3</sup> o fracción de material; en caso del árido fino utilizado con ligantes fluidos, el ensayo se realizará una vez por cada m<sup>3</sup> o fracción de material.

El (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica también que en el caso de tratamientos superficiales, los áridos que conforman la mezcla se ensayarán una vez por cada 100m<sup>3</sup> o fracción de material.

Las mezclas bituminosas en caliente tendrán también ciertas frecuencias a cubrir en cuanto a la granulometría de sus materiales según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013). Para el caso del filler o polvo mineral, se realizará un ensayo cada 100m<sup>3</sup> de material y hablando de la mezcla de áridos y filler, su granulometría se comprobará con dos ensayos por cada 1000Tm de mezcla o dos ensayos por día.

Las mezclas bituminosas en frío se analizarán en base a lo descrito por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), con la ejecución de dos ensayos por cada 1000Tm de mezcla

o dos ensayos por día; el polvo mineral será analizado a razón de un ensayo por cada  $100\text{m}^3$  de material.

Pasando ahora a las superficies de rodadura de hormigón asfáltico en caliente, descritas de igual manera por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su norma “NEVI-12”, volumen 3, sus diferentes agregados serán analizados mediante ensayos granulométricos antes de la preparación de la mezcla, tomando una muestra por cada  $200\text{m}^3$  de material. Una vez que se esté trabajando con mezclas asfálticas para este tipo de superficies de rodadura, los ensayos granulométricos se cubrirán con un total de dos por día de trabajo, tomando las muestras de la vía (cuando se coloque la mezcla) o directamente de la planta.

Si de subbases de grava se trata, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su volumen 3 de la “Norma Ecuatoriana Vial” indica, que la verificación de su calidad granulométrica se realizará una vez por día.

Para el caso de subbases de suelo estabilizado con cal, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica en su norma, volumen 3 que el análisis granulométrico se realizará tomando una muestra por cada  $750\text{m}^3$  de material.

Para el caso de las bases de agregados, el volumen 3 de la norma NEVI-12 del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), indica que su granulometría deberá ser verificada con ensayos luego de la toma de muestras, a razón de una vez por jornada.

Los ensayos de granulometría comprueban la calidad de los áridos analizados en base a los ensayos descritos en la norma INEN 696 (AASHTO T-11 y T-27); dicha norma se describe a continuación:

La norma NTE INEN 696:2011 “Áridos. Análisis Granulométrico en los Áridos, Fino y Grueso”, tiene como fin la determinación del método para la identificación de la distribución de la granulometría de una muestra de áridos por tamizado. El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) establece en esta norma que los resultados que se obtienen con su aplicación, servirán para comprobar el cumplimiento de las graduaciones de agregados tanto finos como gruesos, con lo dispuesto en cada proyecto u obra civil. Los alcances de esta norma no cubren en su totalidad los diferentes tamaños que un agregado pueda contener, siendo necesaria la revisión de la norma NTE INEN 697 para el análisis granulométrico de partículas cuyos tamaños permitan el paso de la muestra o parte de ella a través del tamiz de  $75\mu\text{m}$  (tamiz N°200).

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), indica que análisis de laboratorios y la experiencia de quienes realizaron dichos análisis, muestran que mientras más similares sean las muestras en cuanto a su tamaño, menor será la desviación estándar al comparar resultados de diferentes laboratorios; en la gran mayoría de casos comparados, el análisis muestra desviaciones estándar menores a 1%. Luego de comparar los promedios de porcentajes pasantes por cada tamiz de una muestra de 500g con una muestra de 300g, se observa una variación poco significativa (décimas o centésimas de diferencia).

### **3.2.1.2 Equipos**

Lo que el presente ensayo busca, es la separación por tamaño de las partículas que conforman una muestra de agregados, mismas que estarán en condiciones secas y de masa conocida. Dicha separación se realiza a través de un número determinado de tamices con aberturas normadas y ordenados de forma descendente de arriba hacia abajo. Los resultados del ensayo se expresan en porcentajes.

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) indica en la norma NTE INEN 696:2011 que, para que el ensayo se cumpla bajo medidas estrictas de seguridad y confiabilidad de resultados, se deberán utilizar los siguientes equipos:

- Balanzas para árido fino con precisión de al menos 0.1g (la capacidad de lectura mínima de la balanza será al menos de 0.1g) o, con capacidad para pesar como mínimo el 0.1% de la muestra; esto dependerá de cuál de estos dos valores sea el mayor.
- Balanzas para agregado grueso o para mezclas de agregado grueso y fino con precisión de la menos 0.5g o de 0.1% del peso de la muestra (el mayor entre los dos).
- Tamices normalizados en función de NTE INEN 154:2013, mismos que no deben permitir pérdidas durante el ensayo.
- Agitador de tamices mecánico que produzca movimiento, rebote y caída de las partículas.
- Horno que permita alcanzar temperaturas uniformes de 110°C ( $\pm 5$ ).

### 3.2.1.3 Muestreo

Basando el análisis en NTE INEN 695:2010 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010), las muestras pueden ser tomadas de diferentes sitios, cumpliendo cada uno con una característica determinada descrita a continuación:

- **Muestreo de áridos desde contenedores o una cinta de descarga:** El número de muestras que se tomarán será de al menos 3, que se elegirán de forma aleatoria y en porciones similares y luego se combinarán las mismas para tener una sola; la masa total deberá ser igual o mayor a la requerida por del ensayo de granulometría. Las porciones de muestra se deberán tomar de toda la sección transversal del material en descarga.

- **Muestreo desde la cinta transportadora:** El número de muestras a ser tomadas seguirán lo especificado en el párrafo anterior, para lo cual será necesario que la banda transportadora se detenga para facilitar la inserción de dos separadores a un intervalo que permita lograr la masa adecuada de muestra. Es importante tomar todo el material de la cinta, por lo que se recomienda que el material fino y polvo se recolecten con una brocha.
- **Muestreo desde el almacenamiento o desde unidades de transporte:** Este método es poco recomendable, por lo que si es posible, la muestra nunca se tomará de un sitio de almacenamiento o unidades de transporte, ya que podrían ser poco representativas. El número de muestras tomadas resultará de un análisis minucioso y deberán ser representativas para que los resultados obtenidos en los posteriores ensayos sean confiables.
- **Muestreo en las vías (bases y subbases):** El número de muestras a tomar será igual a 3 y se lo realizará de forma aleatoria; sus masas deberán ser similares o iguales y posterior a su toma, se mezclarán para formar una sola muestra representativa para el ensayo de granulometría. Cada área designada para la selección de muestras será identificada y marcada de tal forma que no se descarte ningún material subyacente.

La norma NTE INEN 696:2011 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), indica que las muestras para el ensayo de granulometría de los agregados finos (será necesaria la toma de cuatro muestras), deberán tener una masa de al menos 300g cada una, una vez que la muestra haya sido secada.

Al mismo tiempo, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) indica que para el caso del agregado grueso o de la mezcla de agregado grueso y fino, la muestra cumplirá con las

características de las siguientes tablas, la primera descrita en esta misma norma y la segunda descrita en la norma NTE INEN 695:2010; el tamaño correcto de muestra será el mayor de los dos:

Tamaño nominal máximo. Aberturas cuadradas, en mm	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo (kg)
9.5	1
12.5	2
19.0	5
25.0	10
37.5	15
50.0	20
63.0	35
75.0	60
90.0	100
100.0	150
125.0	300

Tabla 45. Tamaño de muestras para el ensayo granulométrico de árido grueso o la mezcla de áridos grueso y fino. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Tamaño del árido <sup>1</sup> , en mm	Masa mínima de la muestra in situ <sup>2</sup> , kg	Volumen mínimo de la muestra in situ, litros
<b>Áridos finos</b>		
2.36	10	8
4.75	10	8
<b>Áridos gruesos</b>		
9.5	10	8
12.5	15	12
19.0	25	20
25.0	50	40
37.5	75	60
50	100	80
63	125	100
75	150	120
90	175	140

<sup>1</sup> Los áridos procesados utilizarán el tamaño nominal indicado en la respectiva norma; en caso de la falta de esta indicación, se utilizará el tamaño máximo.  
<sup>2</sup> En caso de que la muestra requerida sea una mezcla de agregados grueso y fino, la masa mínima será igual a la masa mínima de agregado grueso mas 10kg.

Tabla 46. Tamaño de muestra para el ensayo granulométrico de árido grueso o la mezcla de áridos grueso y fino. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)

#### 3.2.1.4 Ensayo

Los pasos a seguir para el desarrollo del ensayo se describen en la norma NTE INEN 696:2011 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) y se resumen a continuación:

- a) Primeramente, habrá que asegurar que la muestra esté libre de humedad, lo cual se logra con un horno que permita obtener una temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5$ ). Habrá que aclarar que cuando el propósito del análisis granulométrico es el control rápido de la calidad de los materiales, específicamente de los agregados gruesos, no será necesario que la muestra esté totalmente seca, ya que la experiencia demuestra que para este caso, los resultados no se afectan mayormente a menos que los agregados gruesos sean de absorción alta, tengan un grado de contenido de finos (que pasen el tamiz N°4) considerable o que el tamaño máximo de los áridos sea menor a 12.5mm.
- b) Se continúa con la elección de los tamices necesarios para cumplir con la granulometría que se busca analizar. Es importante aclarar que mientras más tamices se utilicen, mayor precisión tendrá el ensayo y los datos serán mayores, lo cual puede ser beneficioso para la determinación del módulo de finura o para la regulación de la cantidad de material sobre un tamiz.
- c) La muestra a ser ensayada se coloca sobre el tamiz superior y posterior a aquello se inicia la agitación de la muestra mediante la activación de la tamizadora por un tiempo tal que permita que no más del 1% de la masa del material retenido en uno de los tamices, atraviese por este durante un minuto de tamizado manual continuo. El tamizado manual se realiza colocando uno de los tamices sobre una bandeja inferior y tapándolo; con el tamiz levemente inclinado, se golpea un lado de este de manera enérgica y con movimientos verticales hacia arriba contra la mano a una velocidad aproximada de 150 golpes por

minuto; el tamiz se girará aproximadamente una sexta parte de una vuelta completa en intervalos de 25 golpes.

- d) Se deberá controlar la cantidad de material sobre cada uno de los tamices, asegurando que todas las partículas de la muestra puedan llegar al fondo de éste por varias veces durante todo el proceso de tamizado. Cuando se utilizan tamices con aberturas menores a 4.75mm (N°4), el porcentaje de material retenido sobre cualquier tamiz deberá ser menor a 7kg/m<sup>2</sup> en la superficie de tamizado (equivalente a 200g en un tamiz normalizado de diámetro efectivo igual a 190.5mm); si las aberturas de los tamices utilizados son iguales y/o mayores a 4.75mm (N°4), la masa retenida no excederá el producto de 2.5 por la abertura del tamiz (en mm) y por el área efectiva de tamizado (en m<sup>2</sup>). A continuación se muestran las cantidades máximas retenidas permitidas sobre diferentes tamices; en la segunda, tercera y cuarta columna de la tabla, se presentan diámetros de tamices circulares, en la quinta se muestra dimensiones de un tamiz cuadrado y en la última de un tamiz rectangular:

Tamaño de abertura del tamiz (mm)	Tamiz de dimensiones nominales				
	Ø=203.2mm <sup>1</sup>	Ø=254mm <sup>1</sup>	Ø=304.8mm <sup>1</sup>	350x350mm	372x580mm
	Área de tamizado (m <sup>2</sup> )				
	<b>0.0285</b>	<b>0.0457</b>	<b>0.0670</b>	<b>0.1225</b>	<b>0.2158</b>
125	Ver <sup>2</sup>	Ver <sup>2</sup>	Ver <sup>2</sup>	Ver <sup>2</sup>	67.4
100	Ver <sup>2</sup>	Ver <sup>2</sup>	Ver <sup>2</sup>	30.6	53.9
90	Ver <sup>2</sup>	Ver <sup>2</sup>	15.1	27.6	48.5
75	Ver <sup>2</sup>	8.6	12.6	32.0	40.5
63	Ver <sup>2</sup>	7.2	10.6	19.3	34.0
50	3.6	5.7	8.4	15.3	27.0
37.5	2.7	4.3	6.3	11.5	20.2
25.0	1.8	2.9	4.2	7.7	13.5
19.0	1.4	2.2	3.2	5.8	10.5
12.5	0.89	1.4	2.1	3.8	6.7
9.5	0.67	1.1	1.6	2.9	5.1
4.75	0.33	0.54	0.8	1.5	2.6

<sup>1</sup> El cálculo del diámetro efectivo resulta de sustraer 12.7mm al diámetro nominal.  
<sup>2</sup> El número de aberturas completas de estos tamices es menor a 5, por lo que no se utilizan en el ensayo de tamizado, a menos que se indique lo contrario.

Tabla 47. Retención máxima permitida de material sobre un tamiz. Valores en kg. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Un método para impedir el exceso de material en un tamiz individual, consiste en la colocación de tamices intermedios entre el tamiz que pudiera contener exceso de material y el superior a este. Un segundo método consiste en la división de la muestra total, ensayándola por partes y combinando los resultados de cada tamiz al final. Finalmente, un tercer método se basará en la utilización de tamices con áreas efectivas de tamizado más grandes.

- e) Revisar que se dé cumplimiento a los requisitos mencionados en los pasos anteriores, caso contrario, continuar con el proceso de tamizado, siguiendo lo especificado en el literal (c).
- f) En caso de no disponer de un tamizador mecánico, las partículas de dimensiones superiores a 75mm se tamizarán a mano de una en una (es decir, se hará pasar cada partícula por cada tamiz de forma descendente, hasta que se demuestre que su diámetro es más grande que un determinado tamiz) sin forzarlas.
- g) Una vez concluido el tamizado, se requiere registrar las masas contenidas en cada tamiz, para lo cual se hará uso de las especificaciones en cuanto a las balanzas de la sección de “Equipos” del presente documento. Habrá que verificar la similitud entre la masa con la que originalmente se inició el ensayo y la sumatoria de las masas de cada tamiz luego de finalizado el proceso de tamizado, siendo 0.3% el error máximo permisible.
- h) Anteriormente se explicó que la norma NTE INEN 696:2011 no cubre el ensayo de muestras cuyas partículas tengan dimensiones inferiores a  $75\mu\text{m}$  (tamiz N°200), por lo que, si previamente estas partículas fueron analizadas, sus masas se agregarán a la obtenida mediante el presente ensayo para asegurar lo descrito en el literal (g). El método de análisis de las partículas más finas que el tamiz N°200 se indica a continuación.

La norma NTE INEN 697:2010 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010), indica que para el análisis de este tipo de áridos, se requerirá el uso de: balanzas con precisión de 0.1g o del

0.1% de la masa total a ser ensayada, la mayor entre estos dos valores; dos tamices, siendo el inferior el tamiz N°200 y el superior el tamiz de 1.18mm (N°16); un recipiente para la contención de la muestra y agua y que al mismo tiempo permita su agitación sin perder ninguna parte de la muestra y finalmente; un horno cuya capacidad le permita mantener una temperatura constante de 110°C ( $\pm 5$ ).

El muestreo se basará en la norma NTE INEN 695:2010 (numeral 3.2.1.3 del presente documento); para el caso de análisis de una muestra conjuntamente por el método de ensayo descrito por NTE INEN 696:2011 y el indicado en NTE INEN 697:2010, la muestra se mezclará completamente para posteriormente reducirla a una cantidad adecuada para los ensayos, tal como se especifica en la norma NTE INEN 696:2011.

El análisis de las partículas más finas que el tamiz N°200 se realizará mediante lavado con agua potable, a menos que se especifique lo contrario. El desarrollo de dicho ensayo se indica en la norma NTE INEN 697:2010 y es resumido a continuación:

- a) Con la utilización del horno, la muestra se secará hasta que su masa sea constante; la masa utilizada en el ensayo tendrá una aproximación de 0.1% en relación a la masa necesaria según lo especifica la norma correspondiente.
- b) Cuando el análisis que se está realizando requiere la aplicación de las normas NTE INEN 696:2011 y la NTE INEN 697:2010 y, se requiera que el árido que pasa por el tamiz N°200 se analice sobre una parte de la muestra que pasa un tamiz más pequeño que el tamaño máximo nominal del agregado, la muestra se separará por el tamiz designado y se determinará su masa con una aproximación del 0.1%; dicha masa será la nueva masa seca original utilizada para los respectivos cálculos.

- c) Una vez que se asegure el cumplimiento de los pasos anteriores, la muestra se colocará en el recipiente descrito anteriormente (equipos necesarios para el ensayo) y se agregará agua potable hasta cubrirla.
- d) La muestra se agitará fuertemente de manera tal, que asegure la separación completa entre partículas gruesas y las partículas que atraviesan el tamiz N°200. Una vez finalizado este proceso, se colocará el agua de lavado sobre el tamiz más grueso de la organización de tamices que se utilizan en el ensayo.
- e) Se añadirá agua una vez mas a la muestra en el recipiente y se repite el proceso de agitación, repitiendo este paso y el anterior hasta que el agua de lavado se observe clara.
- f) Una vez terminado el lavado, los restos de la muestra que fueron depositados en la organización de tamices, se regresarán al recipiente original mediante el enjuague de los tamices con una boquilla rociadora.
- g) Posteriormente se requiere secar la muestra, lo cual se realizará con la ayuda del horno hasta que la masa se la muestra se muestre constante, con una aproximación de 0.1% de la masa original.

### 3.2.1.5 Cálculos

Para el caso de los áridos de dimensiones inferiores a la abertura del tamiz N°200 (NTE INEN 697:2010), la cantidad de material que pasa dicho tamiz mediante lavado se calcula como sigue:

$$A = \frac{B - C}{B} * 100$$

En donde:

$A$  – material más fino que pasa el tamiz con aberturas de  $75\mu\text{m}$  mediante lavado (en porcentaje)

$B$  – masa seca original de la muestra (en gramos)

$C$  – masa seca de la muestra luego del lavado (en gramos)

Para el caso del ensayo bajo la norma NTE INEN 696:2011, el cálculo de resultados se basa en la determinación de porcentajes que atraviesan, porcentajes totales que se retienen o porcentajes en fracciones de diferentes tamaños. En el caso de muestras en las que se aplique las normas NTE INEN 696:2011 y NTE INEN 697:2010, será necesario agregar la masa del material más fino que el tamiz N°200 en el presente cálculo; la masa seca total se representará por la masa de la muestra antes del lavado.

Tal como lo especifica el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), en el caso en el que se requiera el cálculo del módulo de finura, éste es realizado a través de la “sumatoria de los porcentajes totales de material que es más grueso que cada uno de los siguientes tamices (porcentajes retenidos acumulados) y dividiendo la suma para 100”.

### **3.2.1.6 Informe de resultados**

Una vez que todos los cálculos hayan sido realizados, los mismos deberán plasmarse en un registro para su presentación. Este registro o informe deberá contener al menos los siguientes datos, tal como lo indica el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011):

- Fechas de muestreo y ensayo de la muestra.
- Nombres de laboratorio y laboratorista encargados de la ejecución del ensayo.
- Datos que sirvan para identificar la muestra.

- Porcentaje total de: material pasante de cada tamiz, material retenido en cada tamiz o material retenido entre tamices consecutivos<sup>1</sup>. Los valores deberán ser redondeados (al valor más cercano) y expresados como números enteros, exceptuando el caso en el que el porcentaje de material que pasa el tamiz N°200 sea menor a 10%, ya que de ser este el caso, la precisión de los datos será de 0.1%.
- Valor del módulo de finura (cuando sea necesario) con precisión de 0.01.
- Datos extras que permitan identificar completamente la muestra y el ensayo<sup>2</sup>.

En este documento se presenta como “Anexo c”, un formato para la exposición de datos del ensayo de granulometría, basado en (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

---

<sup>1</sup> Si se trata de los áridos analizados mediante la norma NTE INEN 697:2010, se registrará el porcentaje de material más fino que pasa el tamiz N°200 mediante lavado, con aproximación de 0.1%. Si los datos indican un valor igual o superior al 10%, el valor se expresará como un número entero (redondeado al valor más cercano).

<sup>2</sup> En el caso de los áridos analizados mediante la norma NTE INEN 697:2010, su informe de resultados deberá contener una especificación del procedimiento utilizado durante el ensayo y los cálculos.

## 3.2.2 Límite Líquido

### 3.2.2.1 Generalidades

El LL se identifica como el punto exacto (de contenido de agua) en el que un suelo cambia de estado plástico a estado líquido. El LL es una de las características que se deben comprobar mediante ensayos a los materiales para verificar su calidad. En lo que se refiere a capas de rodadura granulares, y superficies de agregados no tratados, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que la mezcla granular utilizada deberá tener un LL máximo de 35.

Si se pretende comprobar que las subbases de grava o subbases de áridos tienen un LL aceptable, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su volumen 3 indica que se ensayarán muestras a razón de una vez por cada día de trabajo. Los resultados deberán indicar un LL máximo de 25 para asegurar la calidad del material.

Las bases de agregados cumplirán con las mismas condiciones de ensayos descritos en el caso de las subbases de grava, es decir, se analizará su límite líquido una vez por día. Para la porción de la muestra de bases que atraviesa el tamiz N°40, su LL deberá ser menor que 25 para que dicha base se pueda considerar de buena calidad.

Todos estos requerimientos se verifican con la realización de pruebas de laboratorio, mismos que en función de lo descrito por (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en el volumen 3 de la norma NEVI-12, se realizarán aplicando la norma NTE INEN 691, la cual contiene las indicaciones para la realización del ensayo a través del secado del suelo a temperaturas de 60°C, secado al aire o en estado natural.

Para iniciar con el estudio de la norma NTE INEN 691 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981), se establece que el ensayo aquí descrito se realiza únicamente con las

partículas de material que atraviesan por el tamiz de  $425\mu\text{m}$  (tamiz N°40). Su ejecución, a más de determinar el LL, permite la obtención del índice de flujo.

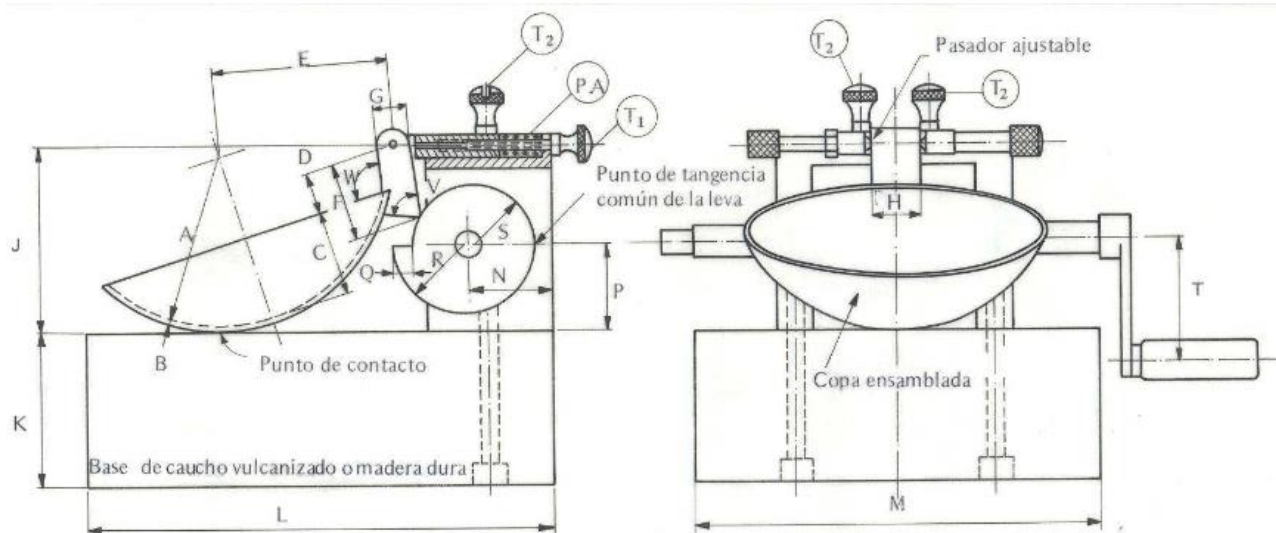
La determinación del LL en la presente norma, se basa en el método de la Copa de Casagrande, el cual, en resumen, determina el número de golpes necesarios para provocar la fluencia de un suelo en condiciones normalizadas.

### 3.2.2.2 Equipos

En este numeral se presenta la descripción de los equipos e insumos necesarios para la realización del ensayo de determinación del Límite Líquido de una muestra, para lo cual se tomará en cuenta: lo mencionado por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981) en la norma NTE INEN 691 y el hecho de que la determinación de valores correctos y verídicos dependerá del cumplimiento de las normas en cuanto a las dimensiones de los instrumentos:

- **Copa de Casagrande:** dispositivo mecánico construido de bronce o acero inoxidable en forma de copa con dimensiones específicas y normadas, con base de caucho vulcanizado o madera dura. Su forma y dimensiones se especifican en la *ilustración 11*.
- **Acanaladores:** su material de construcción será bronce o acero inoxidable y su calibración se basa en lo indicado en la *ilustración 12*.
- **Plato o fuente de mezclado:** Recipiente cuya forma y dimensiones permitan formar una mezcla homogénea de la muestra.
- **Espátulas:** sus dimensiones serán tales que permitan realizar con ellas el mezclado de la muestra en el plato mencionado anteriormente y permitir el cortado de la misma; su fabricación deberá ser en acero inoxidable.

- **Disco de evaporación:** se utilizan de manera opcional y se podrán usar como discos de evaporación los vidrios de relojes de tamaño apropiado o en su defecto, una tela impermeable.
- **Equipo para determinación de contenido de agua:** el cual cumplirá con lo especificado en la norma NTE INEN 690 (Ver el numeral 3.2.3.5 del presente documento).
- **Botella de lavado:** botella de plástico o vaso de precipitación con agua destilada.
- **Calibrador:** construido de metal o acero inoxidable.

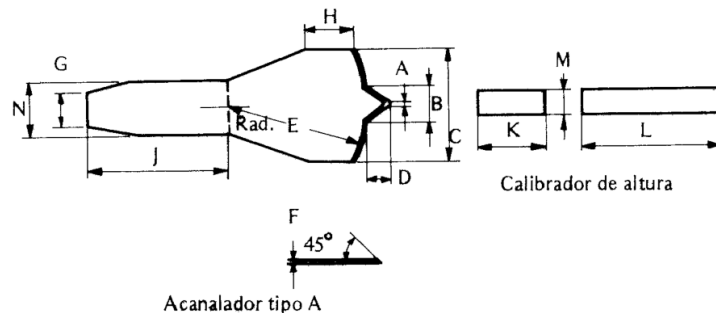


Letra	A	B	C	D	E	F	G	H	J
mm	54 ± 0,5	2 ± 0,5	27 ± 0,5	12,5 ± 0,5	56 ± 0,5	25 ± 0,5	10 ± 0,5	16 ± 0,5	60 ± 0,5
Letra	K	L	M	N	P	Q*	R*	S*	T
mm	50 ± 5	150 ± 5	130 ± 5	27 ± 1	28 ± 0,5	6,0	22 ± 0,5	19 ± 0,5	40 ± 5

Letra	V	W
Grados	75 ± 5	100 ± 3

\* La leva está fabricada de dos secciones semicirculares con un punto de tangencia común. Las dimensiones esenciales tienen tolerancia.

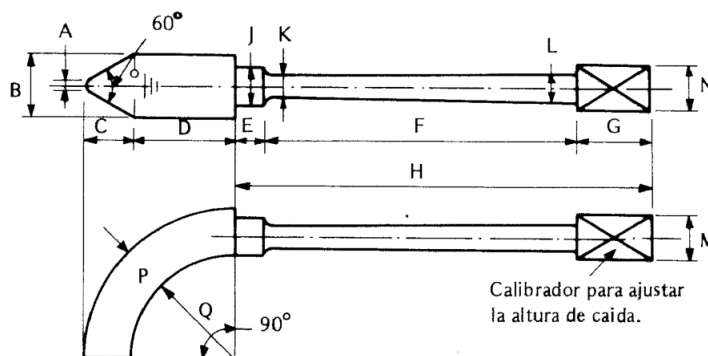
Ilustración 11. Copa de Casagrande. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981)



Letra	A	B	C	D	E	F
mm	$2 \pm 0.1$	$11 \pm 0.25$	$40 \pm 0.25$	$8 \pm 0.25$	$51 \pm 0.25$	$1.6 \pm 0.1$

Letra	G	H	J	K	L	M	N
mm	$10.0 \pm 0.5$	20	50	25	50	$10 \pm 0.25$	20

Las dimensiones esenciales tienen tolerancia.



Letra	A	B	C	D	E	F	G	H
mm	$2 \pm 0,10$	$13,5 \pm 0,25$	$10 \pm 0,25$	22	6	68	16	90

Letra	J	K	L	M	N	P	Q
mm	8	5	6	$10 \pm 0,25$	$10 \pm 0,25$	$10 \pm 0,25$	$22 \pm 0,25$

Las dimensiones esenciales tienen tolerancia. Las tolerancias indicadas son para propósitos de fabricación.

Ilustración 12. Acanaladores. Dimensiones normadas. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981)

La Copa de Casagrande y el acanalador deberán ser inspeccionados antes de iniciar el ensayo, con el fin de verificar que se encuentren limpios, secos y en excelentes condiciones de trabajo, garantizando su funcionamiento. Su caída se precisará de manera que, al momento que la copa se encuentre en su altura máxima, el calibrador de 10mm pueda atravesar de manera exacta entre ésta y la base.

### 3.2.2.3 *Muestreo*

Para el ensayo de determinación del límite líquido, la muestra deberá tener una masa de aproximadamente 250g (valor que deberá ser registrado), la cual según el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981) deberá someterse a evaporación o a adición de agua, en función de las necesidades, para formar una mezcla homogénea en forma de una pasta moldeable con los dedos. Luego de la formación de la pasta o su manipulación, se deberá cubrir el plato de mezclado con el vidrio de evaporación o la tela impermeable, lo cual evita que el agua se pierda.

Cuando la muestra tomada presente partículas gruesas, muchas de las veces los resultados de los ensayos son más verídicos si se retiran las mismas.

Algunos tipos de suelos arcillosos, necesitan de 16 a 24 horas dentro de un recipiente hermético para asegurar su homogenización con el agua agregada. Una vez transcurrido este periodo de tiempo, la muestra se mezcla por aproximadamente 10 minutos o más.

### 3.2.2.4 *Ensayo*

Para el desarrollo del presente ensayo se seguirán las indicaciones descritas por el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981) mediante la norma NTE INEN 691:

- a) La pasta generada en el muestreo se colocará dentro de la copa, se extenderá con la espátula de manera cuidadosa, buscando que no se formen burbujas de aire.
- b) Se verificará el paralelismo de la muestra colocada en la copa con la base de la misma, logrando que la profundidad de la muestra sea de 10mm medidos en la sección de la copa de mayor profundidad, y retirando el material excesivo de ésta para colocarlo en el plato de mezclado. Ver *ilustración 13, parte (1)*.

- c) Utilizar el acanalador para formar un canal en la muestra del paso anterior sin que ésta se desprenda de la copa<sup>3</sup>; el canal se formará de manera perpendicular a la articulación de la copa y normal a la superficie de la misma. Ver *ilustración 13, parte (2)*.
- d) Posteriormente colocar la copa con la muestra acanalada sobre el dispositivo mecánico, manteniendo limpias y secas la parte inferior de la copa y la superficie de la base e iniciar los giros del manubrio a razón de 2 revoluciones por segundo.
- e) Contar y registrar el número de golpes generados que logran que 10 mm de las dos partes de la muestra acanalada entren en contacto al fondo del canal. Dicho contacto se deberá generar por fluencia del suelo y no por deslizamiento de la muestra sobre la copa. La distancia se medirá con el extremo del acanalador o con un calibrador. Ver *ilustración 13, parte (3)*.
- f) Si el número de golpes que logra cumplir lo descrito en el literal (e) está entre 35 y 45, la mezcla se devolverá al plato mezclador y se repetirá el proceso descrito desde el literal (a) hasta el literal (e) hasta lograr obtener el mismo número de golpes (con un error de máximo un golpe) que cierren el canal en tres ensayos consecutivos. Si el rango de golpes está fuera del mencionado, se agregará agua o se secará al aire libre la muestra y se repetirán todos los pasos descritos anteriormente hasta conseguir dicho rango de golpes.
- g) Una vez cumplidas las condiciones anteriores, de la parte del canal que se juntó, se toma una muestra de aproximadamente 10g, se sitúa en un envase y se procede a establecer su contenido de agua (ver la sección 3.2.3.5 del presente documento).

---

<sup>3</sup> Para evitar el desprendimiento de la muestra de la copa, se permite realizar el canal con hasta seis pasadas con el acanalador desde atrás hacia adelante o viceversa, tocando el fondo de la copa en la última pasada. Siempre se tratará de formar el canal con el menor número de pasadas posible.

- h) Repetir todos los pasos anteriores con un número de al menos cuatro veces con la misma muestra, agregando agua destilada en diferente cantidad para cada repetición. El objetivo de este punto es lograr que con cada vez que se añada agua, el canal se cierre con menos golpes, obteniendo variaciones de golpes desde 45 hasta 5 (esto quiere decir que entre cada ensayo deberá existir una variación de 10 golpes), permitiendo conseguir dos ensayos por debajo de 25 golpes y dos sobre los 25 golpes<sup>4</sup>. Cada vez que se añada agua, la muestra se mezclará durante 5 minutos.

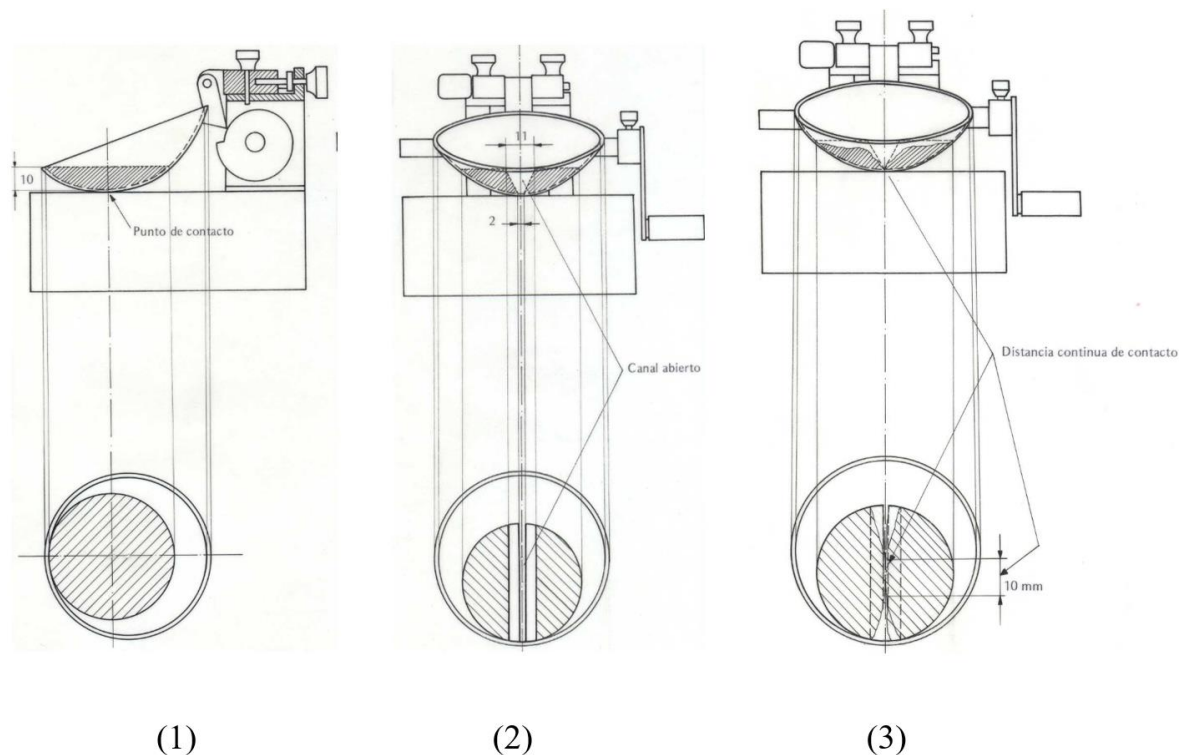


Ilustración 13. Representación gráfica del ensayo de límite líquido. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981)

### 3.2.2.5 Cálculos

En función de lo descrito por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981), el cálculo del límite líquido está relacionado de manera directa con el ancho y profundidad del canal de la

<sup>4</sup> Los rangos aceptables de golpes para cada uno de estos ensayos serán como sigue: primer ensayo de 45 a 35 golpes, segundo ensayo de 35 a 25 golpes, tercer ensayo de 25 a 15 golpes y cuarto ensayo de 15 a 5 golpes.

muestra de suelo en la copa y el número de golpes que la copa recibe para lograr un contacto de 10mm entre las partes de la muestra. Una vez finalizados los ensayos, los datos se registran en un formato que contenga datos de identificación de la muestra, representación gráfica en una escala semilogarítmica, de contenidos de agua versus número de golpes; dentro del gráfico se unen los cuatro puntos con una línea recta que permita formar una curva de flujo.

La determinación del LL se basa en la obtención de valores intermedios de la curva de flujo y se representa por la cantidad de agua perteneciente a la intersección de la curva de flujo y un número igual a 25 golpes (representados en la ordenada de la gráfica); el valor obtenido deberá redondearse al entero más cercano.

El cálculo del índice de flujo resulta de la prolongación de la curva de flujo hasta hacerla intersecar con los números de 10 y 100 de golpes (representados en la ordenada de la gráfica). Su valor se obtiene al calcular la pendiente de la curva de flujo con los límites (número de golpes) mencionados o de la aplicación de la siguiente ecuación:

$$I_f = \frac{w_1 - w_2}{\log 10 \frac{N_2}{N_1}}$$

En donde:

$I_f$  – índice de flujo

$w_1$  – contenido de agua, en % correspondiente a  $N_1$  de golpes

$w_2$  – contenido de agua, en % correspondiente a  $N_2$  de golpes

### 3.2.2.6 *Informe de resultados*

Para el caso de algunos suelos, se podrá observar que al momento de realizar el ensayo, las dos partes de la muestra acanalada se juntan por deslizamiento de la muestra en lugar de por su fluencia; cuando al ejecutar el ensayo se atravesase por esta situación, la solución será añadir más agua a la mezcla y realizar por una siguiente ocasión el ensayo; esta acción se repetirá hasta observar el flujo de la muestra. Si posterior a esto se sigue observando el deslizamiento de la muestra con un mínimo de 25 golpes, en el informe se comunicará que “el límite líquido no puede determinarse” ya que el ensayo resulta inaplicable.

El informe deberá contener información general de la muestra ensayada, los resultados obtenidos, el método utilizado, la condición del suelo analizado<sup>5</sup>, período de reposo, etc. Unos formatos guías, basados en (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981), se presentan como anexos para la presentación de resultados del límite líquido (Anexo d) y para la presentación del LL a más de otros ensayos (Anexo f)

---

<sup>5</sup> Es decir, se deberá indicar si el suelo estuvo en estado natural, si fue secado al aire, secado al horno o si su estado es desconocido.

### 3.2.3 Índice de plasticidad

#### 3.2.3.1 Generalidades

Las capas de rodadura granulares están formadas por una capa estabilizada de grava y arcilla o arena y arcilla, misma que deberá presentar homogeneidad y al mismo tiempo, no presentar impurezas o materiales vegetales. Su IP no deberá superar a 9% según lo establece el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013).

Las capas de rodadura de agregados no tratados generalmente son colocadas sobre la subrasante. Para este fin, las partículas finas (mezcla de arena y arcilla o arena y limo) deberán tener un índice de plasticidad de máximo 9, según lo descrito por (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013).

Los agregados finos de las mezclas asfálticas utilizadas como superficies de rodadura de hormigón asfáltico en caliente, antes de realizada la mezcla deberán cumplir con las características de plasticidad que la norma establece, siendo necesaria la realización de ensayos a muestras de estos agregados a razón de uno por cada 200m<sup>3</sup> de material, según lo establecido por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013). Los ensayos mencionados deberán comprobar que la muestra analizada y por ende todo el material utilizado en una obra presenta características de “No Plasticidad” (para el caso de los materiales que pasan por el tamiz N°40) o una plasticidad máxima de 4 o “No Plásticas” para el caso de las partículas que pasan el tamiz N°200 cuando la altitud en donde se construirá la obra sea menor a 3000m.s.n.m y mayor a 3000m.s.n.m, respectivamente.

Para el caso de las subbases de grava, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en la norma NEVI-12, volumen 3, indica que la verificación del índice de plasticidad se realizará con

una frecuencia de una vez por día. Los ensayos realizados a la parte de muestra que pasa el tamiz N°40 deberán verificar que el índice de plasticidad sea menor que 6.

Las subbases de suelo estabilizado con cal, deberán cumplir con ciertos requisitos en cuanto al índice de plasticidad (su valor se encontrará entre 10% y 50%), analizando dicha característica mediante ensayos de laboratorio a razón de una muestra por cada 750m<sup>3</sup> de material, tal como lo indica el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en el volumen 3 de su norma.

Hablando de las capas de bases de agregados, se deberán tomar muestras y analizarlas en el laboratorio a razón de una vez por jornada de trabajo, tal como lo indica (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013); el valor obtenido mediante los ensayos de plasticidad, no deberá sobrepasar de 6.

Las bases de hormigón asfáltico mezclado en sitio, se colocan sobre la capa de subbase; uno de los ensayos para definir su calidad es la determinación del índice de plasticidad, y mediante el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) se indica que de la muestra a ser analizada, la parte que pasa el tamiz N°40, tendrá máximo un IP igual a 4.

Ahora, en función de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), para el caso de las bases de áridos estabilizadas con cemento, su índice de plasticidad no deberá exceder de 9.

Basados en lo descrito por la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su volumen 3, el índice de plasticidad se obtiene con el uso de las normas NTE INEN 691 y NTE INEN 692.

Según lo establece el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981), la norma NTE INEN 692 tiene por objetivo el análisis de la calidad de materiales, mediante el ensayo de únicamente la parte de material analizado que atraviesa el tamiz de 425µm (tamiz N°40). El resultado final de este

ensayo servirá para la posterior determinación del índice de plasticidad, la tenacidad, liquidez y consistencia de la muestra.

La aplicación del ensayo de la norma NTE INEN 692, se realizará por tres veces, cada una sobre una porción diferente de muestra y cada muestra se formará con igual cantidad de material. Para su correcto desarrollo se requiere la determinación del contenido de agua de la muestra, lo cual se realiza con la aplicación de la norma NTE INEN 690.

### ***3.2.3.2 Instrumentos***

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981) establece que para el desarrollo de este ensayo se requiere: un plato o fuente de mezclado (para mezclar la muestra), espátula (flexible y propia para mezclado y cortado de la muestra), placa de rolado (generalmente de vidrio o mármol, o cualquier superficie lisa y no absorbente; sus dimensiones aproximadas serán de 15cm por 20cm), varilla de calibración (se utiliza de manera opcional, fabricada de acero inoxidable de 3mm de diámetro o aproximadamente 10mm de largo), equipo para determinar el contenido de agua y recipiente con agua destilada.

### ***3.2.3.3 Preparación de la Muestra***

Es importante que las muestras a ensayar cumplan con ciertos requerimientos que aseguren la calidad y credibilidad de los resultados de los ensayos, por lo cual la norma NTE INEN 692 brinda algunas indicaciones a considerar: el tamaño de la muestra será de 100g aproximadamente y se formará por material que atraviesa la malla N°40; cuando sea necesario, la muestra deberá ser

humedecida o evaporada para posteriormente mezclarla en el plato con el uso de la espátula hasta conseguir una pasta homogénea, plástica y moldeable<sup>6</sup>.

Cuando se requiera realizar la determinación del límite líquido y el límite plástico de manera conjunta, la muestra a usarse será de 30g lo suficientemente homogénea y plástica<sup>7</sup> al iniciar el ensayo del límite líquido.

#### 3.2.3.4 *Ensayo*

Los procedimientos descritos a continuación, se basan en la norma NTE INEN 692 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981):

- a) En la muestra dispuesta del modo que se indicó en el numeral 3.2.3.3 se toman aproximadamente 10g y con la ayuda de las manos se forma una esfera, se amasa y se hace rodar entre las palmas de las manos durante un periodo de tiempo que permita la aparición de fisuras superficiales en la esfera, asegurando de esta manera que el suelo tiene suficiente secado.
- b) La esfera del literal anterior se hará rodar con la punta de los dedos sobre la placa de rolado. Se busca la formación de un cilindro de diámetro igual a 3mm luego de completar de 5 a 15 movimientos, haciendo girar la muestra hacia adelante y hacia atrás; la velocidad de giro será de aproximadamente 80 o 90 movimientos por minuto.
- c) En caso de no lograr la formación del cilindro de 3mm antes de que el mismo se desmenuce, se deberá añadir agua a la muestra y se volverá a realizar los pasos de los literales (a) y (b).

---

<sup>6</sup> Existen ciertos suelos arcillosos cuya homogenización requiere reposo de la muestra en una cámara húmeda durante 16 a 24 horas para posteriormente volver a mezclarla durante aproximadamente 10 minutos o más (en casos especiales, el mezclado podrá durar hasta 40 minutos). En caso de que el ensayo se esté realizando en muestras de suelo en condición natural y se observa que la misma está demasiado húmeda, se dejará secar al aire libre hasta que la consistencia sea adecuada.

<sup>7</sup> La muestra tomada deberá tener la capacidad de formar una esfera y permitir su manipulación sin que esta se adhiera a los dedos.

- d) Ahora, si con la manipulación se llega a formar el cilindro de 3mm de diámetro y éste no presenta fisuras o signos de desmenuzamiento, se volverá a formar la esfera con las palmas de las manos y se repetirá el proceso del literal (b). Este proceso se realizará de forma repetitiva hasta que se logre crear un cilindro de 3mm de diámetro que presente fisuras, se corte o se desmenuce exactamente al llegar al diámetro mencionado, tanto longitudinal como transversalmente. La varilla de acero inoxidable mencionada en el numeral 3.2.3.2 puede utilizarse como guía para conseguir el diámetro de 3mm en la muestra analizada.
- e) Las partes del cilindro desmenuzado se recogen en un recipiente y se procede a determinar su contenido de agua a través de la norma NTE INEN 690.
- f) Todos los procedimientos de ensayo descritos, se repetirán con dos nuevas muestras con el fin de obtener mayores resultados.

Como una nota importante, se aclara que en algunos tipos de suelos resulta complicado determinar el punto final del límite plástico debido a su gran dureza; cuando se presente esta situación, las porciones desmenuzadas del rollo formado se deberán juntar, amasar y formar nuevamente una esfera; se vuelve a rodar la esfera y si el rollo formado no se desmenuza inmediatamente, significa que la muestra no ha logrado el punto final del límite plástico. Para suelos poco plásticos se observa un desmenuzamiento antes de alcanzar el diámetro de 3mm; en este caso se determina el límite líquido en el primer punto de rotura del cilindro.

#### **3.2.3.5 Cálculos**

El valor del límite plástico se toma como un promedio de las medidas de contenido de agua descritas en la norma NTE INEN 690 tal como sigue:

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1982) hace referencia en su norma NTE INEN 690 al método de establecimiento del contenido de agua mediante el secado al horno. Primero se indica

que antes de iniciar el secado, específicamente para el presente ensayo, la muestra deberá ser de al menos una masa igual a 25g.

El procedimiento de secado consiste en:

- a) Registrar inicialmente la masa del recipiente ( $m_1$ ) en el cual se realizará el secado; dicho recipiente no deberá contener humedad y estará libre de impurezas.
- b) Colocar la muestra de suelo a ser analizada sobre el recipiente previamente pesado y determinar su masa ( $m_2$ ) con una balanza de 0.01g de precisión.
- c) Colocar el recipiente que contiene la muestra, dentro del horno para su secado a una temperatura constante de  $105^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5$ ) hasta que la masa sea constante. La experiencia demuestra que el proceso de secado puede durar entre 16 y 24 horas y que en caso de duda, la muestra deberá secarse hasta que en dos periodos sucesivos de secado (intervalos de 4 horas), se observe que no hay cambio en la masa y de haberla, la diferencia no será mayor al 1%.
- d) Finalmente, una vez que transcurra el periodo de tiempo indicado, retirar la muestra del horno y registrar su masa ( $m_3$ ).

Con estas tres masas determinadas, se procede a calcular el contenido de agua de la muestra en porcentaje con la aplicación de la ecuación:

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} * 100$$

En donde:

$w$  – contenido de agua

$m_1$  – masa del recipiente (en gramos)

$m_2$  – masa del recipiente más el suelo húmedo (en gramos)

$m_3$  – masa del recipiente más el suelo seco (en gramos)

La norma NTE INEN 692 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981) indica que una vez que se haya calculado el valor del límite plástico y se cuente con datos referentes al límite líquido, se procede con el cálculo del índice de plasticidad<sup>8</sup> (IP) el cual resulta de restar el límite plástico del límite líquido:

$$I_p = W_L - W_P$$

En donde:

$I_p$  – índice de plasticidad

$W_L$  – límite líquido

$W_P$  – límite plástico

Para los casos en los que sea necesario el cálculo de Índice de tenacidad, Índice de liquidez e Índice de consistencia, se aplicarán las siguientes fórmulas:

---

<sup>8</sup> Si mediante ensayos se establece que no es posible encontrar el valor de  $W_P$ , el  $I_p$  se registrará como No Plástico (NP). Si se determina que  $W_P$  y  $W_L$  son iguales o el  $W_P$  es mayor, el  $I_p$  se registrará como cero.

$$I_T = \frac{I_P}{I_f}$$

$$I_L = \frac{w - W_P}{I_P}$$

$$I_C = \frac{W_L - w}{I_P}$$

En donde:

$I_T$  – índice de tenacidad

$I_L$  – índice de liquidez

$I_C$  – índice de consistencia

$I_f$  – índice de flujo

### 3.2.3.6 Informe de resultados

Una vez que el ensayo haya finalizado y se tengan los resultados de las tres muestras analizadas, se presentarán dichos resultados en el respectivo informe como datos de límite plástico. En caso de que su determinación haya sido imposible de lograr, el suelo se registrará como suelo “No Plástico”.

Dentro de la hoja de resultados se colocarán también datos referentes a la información de la muestra, tales como su origen, estado natural, tipo de secado (al aire o al horno), etc. En este documento se presenta como “Anexo e” y “Anexo f”, una sugerencia para la presentación de resultados de este ensayo, solo y cuando forme parte de otros ensayos respectivamente; estos formatos se basan en (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1981).

### 3.2.4 Índice de Vacíos

#### 3.2.4.1 Generalidades

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) en su norma NTE INEN 858:2010 establece que la determinación del índice de vacíos de un agregado, parte de la determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) del mismo, analizando la muestra en condición compactada o suelta.

La norma mencionada permite al laboratorista la determinación de las dos características mencionadas tanto para agregados finos o gruesos, así como para la combinación de ellos. Para su aplicación, la norma requiere que las partículas de áridos tengan dimensiones que no superen los 125mm.

El presente procedimiento de ensayo permite obtener el peso volumétrico en condición seca, por lo que se deduce que no se aplica para muestras tomadas de una unidad de transporte o en el almacenamiento cuando se busque la determinación del grado de compactación.

#### 3.2.4.2 Equipos

Para la determinación del peso volumétrico y posterior cálculo del índice de vacíos, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) establece en su norma NTE INEN 858:2010 la utilización de los siguientes equipos:

- **Balanza:** aparato para medición de masas con precisión de 0.1% de la masa a ensayar y graduaciones de al menos 0.05kg.
- **Varilla de compactación:** varilla con diámetro de 16mm y 600mm de longitud aproximadamente; recta, lisa y de acero con puntas semiesféricas.
- **Molde:** recipiente cilíndrico de metal con asas para su manipulación. Debe ser impermeable u con fondo y parte superior rectas y uniformes. Deberá tener rigidez

elevada y sus dimensiones serán: altura igual al diámetro o altura nunca menor al 80% ni mayor al 150% del diámetro. Su capacidad y espesor serán según lo indican las siguientes tablas:

Tamaño máximo nominal del árido, en mm	Capacidad nominal del molde, en m <sup>3</sup> (L)
12.5	0.0028 (2.8)
25.0	0.0093 (9.3)
37.5	0.014 (14)
75.0	0.028 (28)
100.0	0.070 (70)
125.0	0.100 (100)

NOTA: En caso de no cumplir con el volumen indicado, el mismo deberá ser de al menos el 95%

Tabla 48. Capacidad de los moldes para ensayo de índice de vacíos. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)

Capacidad del molde	Espesor mínimo del metal		
	Fondo	38mm superiores de la pared	Resto de la pared
Menor que 11L	5.0mm	2.5mm	2.5mm
De 11L a 42L (incluido)	5.0mm	5.0mm	3.0mm
Sobre 42L a 80L (incluido)	10.0mm	6.4mm	38mm
Sobre 80L a 133L (incluido)	13.0mm	7.6mm	5.0mm

NOTA: Para el caso de los moldes de capacidad nominal superior a 28L, éstos serán fabricados de acero para asegurar su rigidez.

Tabla 49. Requisitos de moldes para ensayo de índice de vacíos. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)

- **Pala o cucharón:** sus dimensiones deberán permitir el llenado del molde con los agregados a ser analizados.
- **Equipo de calibración:** este equipo estará presente a más de la balanza.
- **Placa de vidrio:** sus dimensiones serán: espesor mayor o igual a 6mm y diámetro que supere al menos en 25 mm al diámetro del molde que se vaya a calibrar.
- **Grasa:** de automóviles o similar.
- **Termómetro:** su rango deberá cubrir por lo menos temperaturas entre 10°C y 32°C, permitiendo realizar lecturas de al menos cada 0.5°C.

### 3.2.4.3 Calibración

Pasa asegurar la veracidad de los resultados de laboratorio con la ejecución del ensayo, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) indica que los moldes se calibrarán como mínimo una vez por año o cuando se identifique dudas en su precisión. Para esto, se seguirán los siguientes pasos:

- a) Registrar la masa de la placa de vidrio y el molde con una aproximación de 0.05kg.
- b) Se expondrá el borde del molde a la grasa (capa fina), lo cual evitará que existan fugas de agua.
- c) El molde deberá llenarse con agua a temperatura ambiente, colocando en la parte superior la placa de vidrio con el fin de eliminar burbujas de aire y exceso de agua, limpiando y secando el exceso de agua desbordado sobre el vidrio.
- d) Registrar la masa de agua, molde y placa de vidrio con aproximación de 0.05kg.
- e) Proceder con la determinación de la densidad del agua, para lo cual se deberá inicialmente medir su temperatura con aproximación de 0.5°C y aplicar la siguiente tabla:

Temperatura, en °C	Densidad, en kg/m <sup>3</sup>
15.0	999.19
17.0	998.86
19.0	998.46
21.0	998.08
23.0	997.62
25.0	997.13
27.0	996.59
29.0	996.02
31.0	995.41

- f) Proceder con el cálculo del volumen  $V$  del molde y de ser necesario, el factor  $F$  del mismo. El volumen se expresará en metros cúbicos; en caso de moldes pequeños, se podrá expresar en litros para comodidad del laboratorista.

#### **3.2.4.4 Muestreo**

La toma de muestras se ejecutará según lo descrito por el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) en la norma NTE INEN 695:2010. Ver numeral 3.2.1.3 del presente documento.

El tamaño de muestra tomada para el ensayo deberá ser de aproximadamente 125% a 200% en relación con a la masa realmente necesaria para llenar el molde. Se evitará la segregación y se secará la muestra en un horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5$  hasta obtener una masa constante.

#### **3.2.4.5 Ensayo**

La selección del procedimiento a aplicar para la ejecución del ensayo, depende de ciertas particularidades: se usará el procedimiento de paladas para el cálculo del peso volumétrico cuando en las indicaciones se especifique, se utilizará el procedimiento por varillado para el cálculo del peso volumétrico compactado cuando los áridos presenten dimensiones nominales de 37.5mm o menos y finalmente, se utilizará el proceso de sacudidas cuando los áridos tengan dimensiones nominales mayores a 37.5mm y menores a 125mm.

Los tres procedimientos mencionados son descritos en el presente documento según la norma NTE INEN 858:2010 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010):

- **Procedimiento por paladas**

Consiste en el llenado del molde con la muestra de agregados, usando la pala o cucharón, hasta que el mismo rebose. El llenado se realizará desde una altura de 50mm o inferior, medida desde la parte superior del molde. Habrá que cuidar la muestra con el fin de evitar su segregación. Una vez colocada la muestra en el molde, se deberá nivelar su superficie con una regleta o con los dedos, haciendo que las proyecciones de los agregados equilibren los vacíos que se puedan observar en

la superficie. Finalmente se registra con una aproximación de 0.05kg la masa del molde y la masa del molde más la muestra.

#### ▪ **Procedimiento por varillado**

Para la ejecución de este proceso, el molde deberá ser llenado hasta aproximadamente una tercera parte del total de su volumen, el material se nivelará con los dedos y posteriormente se utilizará la varilla de compactación para realizar golpeo por 25 ocasiones<sup>9</sup>, mismos que se distribuirán sobre toda la superficie. Se procede con el llenado del volumen restante del molde y nuevamente con la varilla de compactación, se darán 25 golpes a la muestra distribuyéndolos por toda la superficie.

Finalmente, los espacios vacíos dentro del molde (desde el nivel de la muestra luego de los 25 golpes hasta el borde superior del molde) se rellenarán con material hasta rebosar para por una tercera ocasión, realizar el golpeo (25 golpes)<sup>10</sup>. La superficie final de la muestra se nivelará con los dedos o una regleta para que las proyecciones de agregado sobre la superficie equilibren de manera aproximada los vacíos grandes de la superficie. Se registrará la masa del molde y la masa del molde más la muestra con una aproximación de 0.05kg.

#### ▪ **Procedimiento por sacudidas**

Primeramente, el molde deberá ser colocado sobre una base firme, como por ejemplo, piso de hormigón. El molde se llenará en tres etapas; en cada etapa se colocará dentro de éste una cantidad de muestra equivalente a aproximadamente la tercera parte del volumen del molde. El molde se

---

<sup>9</sup> En esta primera etapa de golpeo, la varilla no deberá golpear la parte inferior del molde de manera fuerte.

<sup>10</sup> En el caso de la segunda y tercera capa colocadas, los golpes que reciben no deberán sobrepasarla de ninguna forma, es decir, la varilla de compactación no deberá llegar hasta la capa inmediatamente inferior. Se golpeará de tal manera que se cumpla lo mencionado anteriormente, pero produciendo golpes vigorosos.

tomará de los lados y se levantará hasta aproximadamente unos 50mm sobre la base o piso y posteriormente se dejará caer de manera seca y vigorosa, logrando que las partículas se adapten solas y presenten compactación entre ellas. Cada capa se compactará permitiendo que el molde caiga 50 veces, 25 en cada lado.

La superficie de la muestra deberá ser nivelada con los dedos o con una regleta para que las proyecciones de agregado presentes nivelen o equilibren de manera aproximada los vacíos grandes de la superficie. Registrar la masa del molde y la masa del molde más la muestra con una aproximación de 0.05kg.

#### 3.2.4.6 Cálculos

Sin importar el procedimiento utilizado, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) indica que el cálculo de la masa unitaria (peso volumétrico) se realizará a través de una de las siguientes expresiones:

$$M = (G - T)/V$$

$$M = (G - T) * F$$

En donde:

$M$  – masa unitaria (peso volumétrico o densidad Bulk) del árido, en  $\text{kg}/\text{m}^3$

$G$  – masa del árido más el molde, en kg

$T$  – masa del molde, en kg

$V$  – volumen del molde, en  $\text{m}^3$

$F$  – factor del molde,  $1/\text{m}^3$

El volumen del molde y factor de molde se calculan respectivamente como sigue:

$$V = (W - M)/D$$

$$F = D/(W - M)$$

En donde:

$W$  – masa del agua, placa de vidrio y molde, en kg

$M$  – masa de la placa de vidrio más molde, en kg

$D$  – densidad del agua para la temperatura de medición, en kg/m<sup>3</sup>

En función del valor de masa unitaria, se puede calcular este mismo valor en condición Saturada Superficialmente Seca (SSS) con la aplicación de la siguiente expresión:

$$M_{SSS} = M * [1 + (A - 100)]$$

En donde:

$M_{SSS}$  – masa unitaria (peso volumétrico o densidad Bulk) en condición SSS, en kg/m<sup>3</sup>

$A$  – % de absorción, determinado de acuerdo a NTE INEN 857 o NTE INEN 856

De igual manera que la anterior, en función de la masa unitaria se puede llegar a la obtención del índice de vacíos con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\text{Vacíos, \%} = \frac{[(S * M) - D_a] * 100}{(S * D_a)}$$

En donde:

$S$  – gravedad específica en condición seca

$D_a$  – densidad del agua,  $998\text{kg/m}^3$

#### **3.2.4.7 Informe de resultados**

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) indica que la información recolectada con la ejecución del ensayo, se presentará de manera escrita, conteniendo al menos datos referentes a: Fechas de muestreo y de ensayo, Nombres de laboratorio y laboratorista, Identificación de la muestra, Datos de masa unitaria (peso volumétrico) con aproximación de  $10\text{kg/m}^3$ , datos de contenido de vacíos con aproximación de 1% y finalmente, otros datos que permitan identificar la muestra ensayada.

## 3.2.5 Adherencia

### 3.2.5.1 Generalidades

El (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica hay ciertos requerimientos de calidad que los materiales utilizados en la construcción de vías deberán cumplir; para el caso de las mezclas asfálticas en caliente para superficies de rodadura y para los tratamientos bituminosos superficiales, su adherencia deberá ser mayor a 95.

Cuando se habla de los agregados finos utilizados en las capas de rodadura de mezclas asfálticas en caliente, su adhesividad estará en función de la altitud sobre la cual se pretenda construir la vía; si la altura es menor a 3000m.s.n.m, la adhesividad de este agregado deberá ser de al menos 4% y, si la altura es superior a 3000m.s.n.m, la adhesividad será mínimo 6%.

El (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017) establece que para la determinación de la adherencia, adhesividad o afinidad entre los agregados y el asfalto, se deberá aplicar el procedimiento utilizado en la norma ASTM D 3625.

(ASTM International, 2001) indica en su norma ASTM D 3625-96 que el ensayo que la misma describe, consta de procedimientos rápidos que permiten establecer la adherencia entre las partículas de agregados y el material bituminoso de las mezclas mediante la observación visual de los efectos que el agua hirviendo genera en dicha mezcla.

### 3.2.5.2 Equipos

Los equipos indicados por (ASTM International, 2001) para el desarrollo de este ensayo constan de:

- a) **Pala o cuchara:** debe permitir al usuario retirar una cantidad grande de la muestra.

- b) **Vasos de vidrio:** su capacidad podrá estar entre 1000ml y 2000ml; el material utilizado en su construcción deberá ser resistente al calor, por lo que a mas del vidrio, se permite utilizar vasos de metal.
- c) **Agua destilada:** para la ejecución de un ensayo se requerirá el uso de 500ml de agua destilada, por lo que se requerirá una cantidad adecuada en función del número de ensayos que se pretenda ejecutar.
- d) **Dispositivo de calentamiento de agua:** deberá permitir la distribución homogénea del calor; podrá conformarse por un quemador a gas, cocina, horno u otro equipo que cumpla con este requerimiento.
- e) **Termómetros:** Su capacidad deberá ser tal que permita como mínimo realizar mediciones de temperatura desde  $-2^{\circ}\text{C}$  hasta  $300^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.5.3 *Muestreo*

El muestreo consiste en alistar en laboratorio el hormigón asfáltico a analizar o en la toma de una muestra directamente en la planta de producción; cualquiera sea el caso, la muestra no deberá ser compactada. Para la realización del ensayo en el caso de hormigón asfáltico producido en caliente, antes de agregar el agua hirviendo, la muestra producida en laboratorio o tomada en la planta de producción, deberá tener una temperatura inferior a la temperatura de ebullición del agua y superior o igual a  $85^{\circ}\text{C}$ ; para el caso de las mezclas producidas en frío, la adición de agua hirviendo se realizará una vez que la muestra, ya sea producida en laboratorio o tomada de la planta de producción, alcance la temperatura del ambiente o la supere.

### 3.2.5.4 *Ensayo*

(ASTM International, 2001) indica que una vez cubiertos los requerimientos anteriormente mencionados, el ensayo procederá como se indica a continuación:

- a) En un recipiente (descrito en el “literal b)” del numeral 3.2.5.2 del presente documento) libre de suciedad y/o partículas extrañas, colocar el agua destilada en una cantidad de 500ml.
- b) Calentar el recipiente contenedor del agua hasta un punto tal que el agua destilada contenida en su interior alcance el punto de ebullición.
- c) Sin retirar el recipiente de la fuente de calor, colocar en este una masa aproximada de 250g de mezcla asfáltica; toda la muestra deberá mostrarse sumergida en el agua.
- d) Mantener el recipiente con la muestra y agua hirviendo en la fuente de calor por un período de tiempo igual a 10 minutos, sin manipular la muestra en exceso.
- e) Una vez concluido el período de tiempo especificado, el recipiente se retirará de la fuente de calor y se procederá a eliminar la grasa y/o betún que se encuentren libres en la superficie del agua.
- f) Se procede a enfriar el contenido del recipiente hasta la temperatura del ambiente, eliminar el agua y vaciar la muestra húmeda sobre una toalla de papel blanco.
- g) De manera visual, identificar en el agregado fino y grueso el recubrimiento de material bituminoso sobre estos.
- h) Al instante siguiente de la distribución de la muestra en el papel, se inicia con la identificación mediante observación, de las áreas con recubrimiento; si este es delgado, traslúcido y pardusco, el agregado se considera completamente recubierto; el análisis visual realizado con la ayuda de una luz de baja magnitud puede generar mejores resultados.

### **3.2.5.5 Cálculos**

Basados en la descripción y desarrollo del ensayo descritos en los numerales anteriores, se deduce que la ejecución de este no necesitará la realización de cálculos, ya que se basa solamente en la observación visual de los agregados de las mezclas ensayadas.

### **3.2.5.6 Informe de resultados**

Este deberá presentar en su contenido todos los datos concernientes al reconocimiento de la muestra y de los resultados; algunos de los datos a contener en el mismo serán: fecha de muestreo, fecha de ejecución del ensayo, nombres de laboratorio y laboratorista, nombre/número de la muestra y demás datos necesarios para su identificación, datos obtenidos mediante observación en la ejecución del ensayo y todas las indicaciones necesarias para la interpretación de los resultados por parte del lector.

## 3.2.6 Partículas Planas, Alargadas o Planas y Alargadas

### 3.2.6.1 Generalidades

Para el caso del agregado grueso utilizado en las superficies de rodadura de hormigón asfáltico en caliente y, según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), los índices de aplanamiento y alargamiento se revisarán mediante ensayos ejecutados en un número de muestras igual a uno por cada  $500\text{m}^3$  de agregado grueso.

Según lo descrito por (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), los agregados para mezclas asfálticas densas en caliente, cumplirán para su calidad, con un contenido máximo de 10% de partículas planas y alargadas, relación 5:1. Si se trata de mezclas asfálticas con graduación abierta, este contenido será máximo de 50%, relación 2:1. En las mezclas asfálticas de graduación densa, si su relación es 3:1, tendrán un porcentaje de partículas planas y alargadas máximo de 20%; si su relación es 5:1 el porcentaje será máximo de 5%; se debe tener claro que en este caso el análisis se realiza sobre la combinación de agregados de diseño.

En cuanto a mezclas asfálticas discontinuas, es decir, mezclas cuya granulometría presenta acentuación en cuanto al contenido de agregados finos, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que la combinación de agregados (gruesos más finos) presentará un porcentaje máximo de 10% de contenido de partículas planas y alargadas, relación 5:1.

La ejecución de esta prueba se fundamenta en la norma ASTM D 4791-10 de (ASTM International, 2010), misma que basa la importancia de este ensayo en el hecho que las partículas planas y alargadas interfieren negativamente en la consolidación y colocación de los materiales en obra. Su ejecución, al final indicará si las partículas cumplen con las especificaciones del proyecto y determinará la forma dominante del agregado grueso.

Será importante poder identificar las dimensiones de la partícula, por lo que se toma del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) la siguiente ilustración, en donde se indica el largo (máxima dimensión), ancho (dimensión intermedia) y espesor (dimensión más) de una partícula.

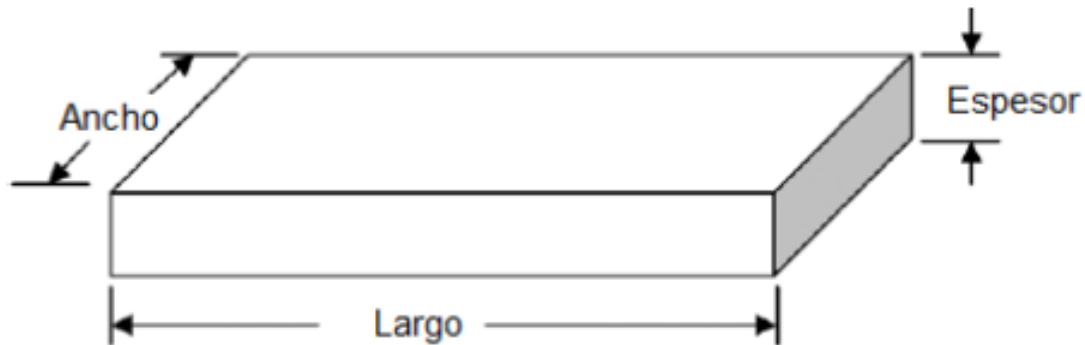
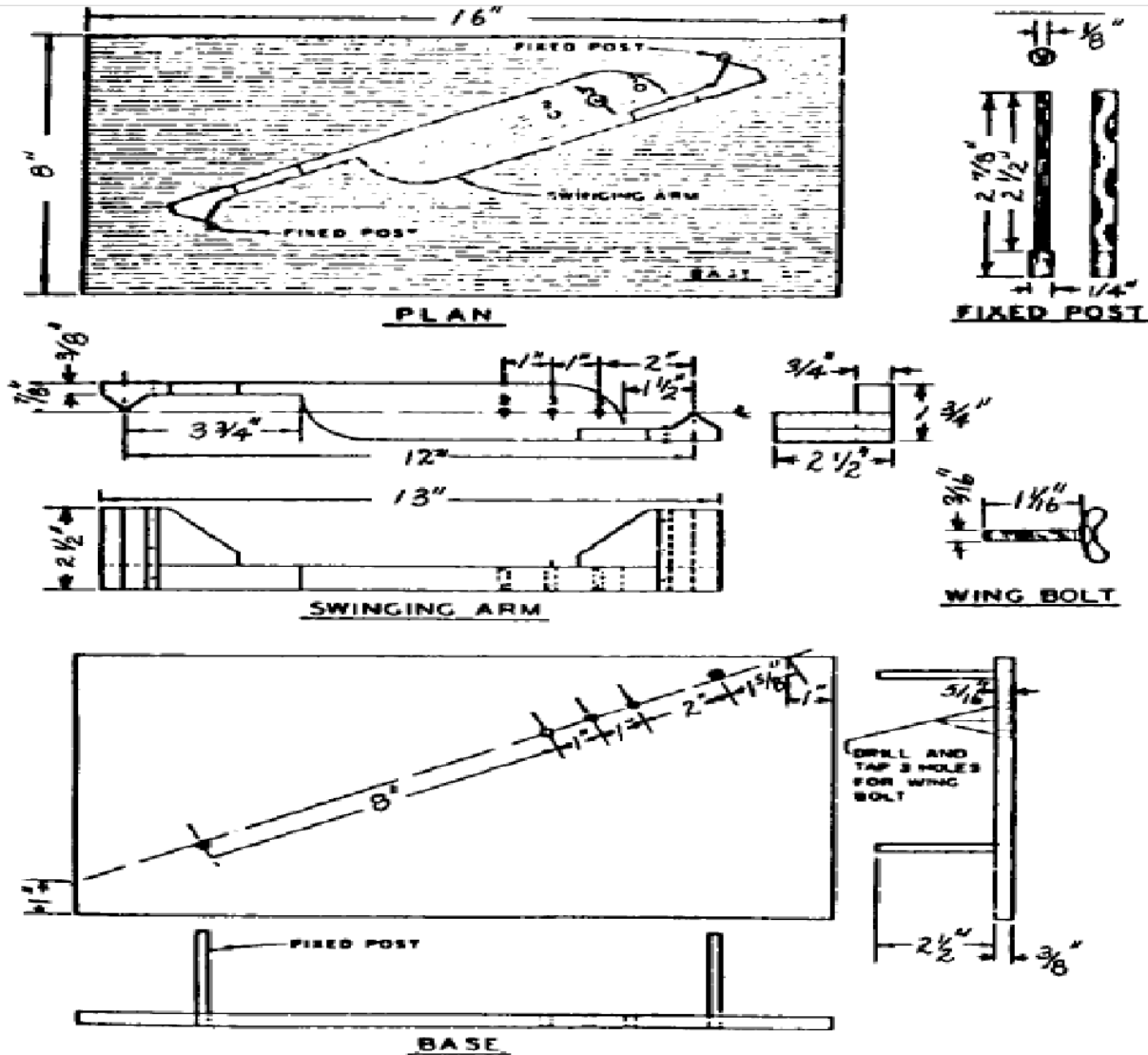


Ilustración 14. Dimensiones de una partícula de agregado. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

### 3.2.6.2 Equipos

(ASTM International, 2010) indica la necesidad de los siguientes equipos para desarrollar el presente ensayo:

- a) **Dispositivo calibrador:** se forma de una base plana, dos postes fijos y un brazo giratorio colocado entre los postes; la abertura entre el brazo y los postes siempre será constante, pudiéndose ajustar el eje para obtener la abertura deseada en el ensayo. A continuación (Ilustración 15) se muestra un ejemplo de este dispositivo, mismo que permite obtener relaciones de 1:2, 1:3, 1:4 y 1:5.
- b) **Balanza:** su capacidad será suficiente para cumplir los requisitos del ensayo y su exactitud será de 0.5% de la masa de la muestra de ensayo.



*Ilustración 15. Dispositivo Calibrador utilizado en el ensayo de determinación de partículas planas. Fuente: (ASTM International, 2010)*

### 3.2.6.3 Muestreo

La obtención de la muestra se realiza por cuarteo (descrito en el numeral 1.6.1.1 del presente documento) luego del mezclado completo del material; el material obtenido luego del cuarteo debe ser secado hasta obtener una masa constante, misma que cubrirá los requisitos de la siguiente tabla:

Tamaño nominal máximo de aberturas cuadradas		Masa mínima de la muestra de ensayo	
mm	plg	kg	lb
9.5	3/8	1	2
12.5	1/2	2	4
19.0	3/4	5	11
25.0	1	10	22
37.5	1 1/2	15	33
50.0	2	20	44
63.0	2 1/2	35	77
75.0	3	60	130
90.0	3 1/2	100	220
100.0	4	150	330
112.0	4 1/2	200	440
125.0	5	300	660
150.0	6	500	1100

Tabla 50. Masa requerida para el ensayo de determinación de partículas planas. Fuente: (ASTM International, 2010)

#### 3.2.6.4 Ensayo

El procedimiento a realizar para la correcta determinación de los datos en el presente ensayo se describe a continuación y se basa en las indicaciones de (ASTM International, 2010):

- a) Cuando el ensayo requiera la determinación exacta de la masa de la muestra, la misma deberá ser sometida a secado a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que presente una masa constante en mediciones simultáneas.
- b) La muestra se tamizará hasta obtener fracciones de agregado que cumplan con lo especificado en la tabla del numeral 3.2.12.3.b del presente documento para posteriormente reducir un mínimo de 10% (de la masa original) las fracciones mayores a 9.5mm (3/8plg) o 4.75mm (N°4); el objetivo de la reducción es obtener una muestra que se conforme por un aproximado de 100 partículas para cada fracción.
- c) Con el uso del calibrador, colocando el mismo en la relación requerida, cada partícula de cada fracción deberá someterse al ensayo y clasificada según sus características como: (1) Partículas planas, (2) Partículas alargadas o (3) Partículas ni planas ni alargadas.

- (1) Partículas planas: la abertura mayor entre el brazo y el poste se definirá igual al ancho de las partículas, mismas que se identificarán como planas si su espesor le permite atravesar la abertura más pequeña.
  - (2) Partículas alargadas: la abertura mayor entre el brazo y el poste será igual a la longitud de la partícula, misma que se definirá como alargada si su ancho le permite atravesar la abertura menor.
- d) Cuando se dé por finalizada la clasificación de todas las partículas, se registra la masa o el número de partículas, según los requerimientos, presentes en cada grupo.
- e) Se procede a ensayar todas las partículas de cada grupo obtenido en la clasificación anterior (con el calibrador colocado en la relación requerida) y a clasificarlas nuevamente en como:
- (1) Partículas planas y alargadas o (2) Partículas ni planas ni alargadas.
- (1) Partículas planas y alargadas: para el calibrador representado en la ilustración 16, su abertura más grande deberá ser igual a la longitud de la partícula, la cual se clasifica como plana y alargada si al momento de medir su espesor, atraviesa por completo la abertura más pequeña. En el caso del calibrador de la ilustración 17, la partícula es plana y alargada si su dimensión mínima (del calibrador) se ubica de tal manera que cuando la partícula se oriente para medir su espesor, esta última logre atravesar entre el poste y el brazo y al momento de medir su longitud, su paso a través de la abertura no es posible.

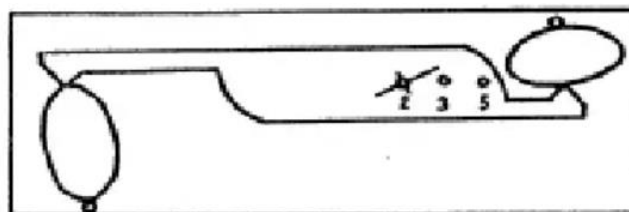
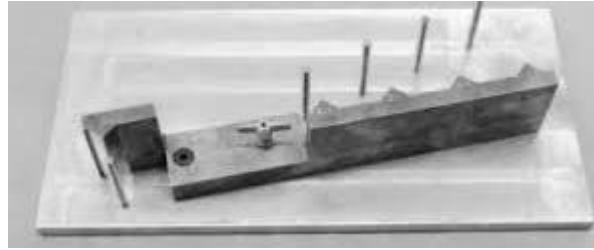


Ilustración 16. Calibrador A. Fuente: (ASTM International, 2010)



*Ilustración 17. Calibrador B. Fuente: (ASTM International, 2010)*

- (2) Partículas ni planas ni alargadas: las partículas se clasifican dentro de este grupo si no cumplen con las condiciones descritas en el numeral anterior.
- f) Finalmente, una vez que la clasificación se haya completado, se procede a registrar la masa o el número de partículas de la muestra dentro de cada grupo, según sean las necesidades.

### **3.2.6.5 Cálculos**

En función de la malla más pequeña que se haya usado (9.5mm o 4.75mm), se determinará el porcentaje de partículas planas y alargadas para cada malla con aproximación de 1%

### **3.2.6.6 Informe de resultados**

(ASTM International, 2010) indica que el reporte de los resultados deberá incluir los siguientes datos con el fin de que el lector pueda interpretarlos:

- a) Identificación del agregado (número de muestra).
- b) Granulometría de la muestra ensayada.
- c) Masa o número de partículas planas y/o alargadas en cada fracción de muestra.
- d) Masa total y porcentajes de masa en cada tamiz calculados.
- e) Relación utilizada en el ensayo.
- f) Otros datos para la correcta interpretación de resultados.

### 3.2.7 Partículas fracturadas (angularidad)

#### 3.2.7.1 Generalidades

Los agregados utilizados en la fabricación de superficies de rodadura de mezclas asfálticas en caliente deberán analizarse en cuanto a sus partículas fracturadas según lo especifica el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su norma NEVI-12 volumen 3, con una frecuencia de ensayos de uno por cada 500m<sup>3</sup> de material. Los agregados gruesos de este tipo de capa de rodadura deberán cumplir con lo descrito en la siguiente tabla:

Tráfico en millones de ejes equivalentes	Espesor de capa	
	≤ 100mm	> 100mm
Tráfico ≤ 3	65/40	50/30
3 < Tráfico < 30	85/50	60/40
Tráfico > 30	100/80	90/70
La expresión "65/40" hace referencia a que el 60% de la muestra deberá tener una cara fracturada y el 40% deberá tener dos caras fracturadas.		

Tabla 51. Requisitos de caras fracturadas para agregados gruesos. Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Los ensayos de angularidad para los agregados finos utilizados en la fabricación de superficies de rodadura de mezclas asfálticas en caliente, se efectuarán según el volumen 3 de la norma NEVI-12 del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), en un número de ensayos igual a uno por cada 1000m<sup>3</sup> de agregado. Según el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), el valor de angularidad para estos agregados deberá ser de 45%.

En cuanto a los tratamientos superficiales bituminosos, el manual NEVI-12 del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), indica que sus áridos gruesos tendrán una angularidad de modo que al menos el 75% de sus partículas tengan dos o más caras fracturadas.

Por lo descrito por (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), los agregados gruesos de la mezcla asfáltica, deberán presentar una angularidad tal que al menos el 85% de éste tenga una cara fracturada y mínimo el 80% tenga dos caras fracturadas.

#### **3.2.7.1.1 ASTM C 1252-03**

La determinación de angularidad de los agregados finos se basa en la norma ASTM C 1252-03 de (ASTM International, 2003) mediante el cálculo del contenido de vacíos del árido fino no compactado. El cálculo del contenido de vacíos se puede hacer por tres métodos, dos de ellos tendrán una gradación definida y el otro se aplicará para muestras cuyas porciones se definen en cada tamiz. La aplicación de los métodos de ensayo A y B permitirán obtener el porcentaje de caras fracturadas según la forma y textura de las partículas; los resultados indican que mientras mayor sea el porcentaje de vacíos, mayor será la angularidad, al mismo tiempo que las partículas serán menos esféricas y/o su textura más áspera y viceversa. Para el caso del método C, su determinación se basa en la inclinación, forma y textura de la partícula.

Se deberá tener en cuenta que en lo que al contenido de vacíos respecta, la aplicación del método A, es decir, el análisis de una muestra graduada no dará los mismos resultados que la aplicación del método B, es decir, análisis de la misma muestra separándola por tamaños de partículas. Con esto se deduce que la aplicación de los métodos A, B y C, podrán utilizarse de manera conjunta, únicamente para comparar la forma y textura de la muestra.

La (ASTM International, 2003) brinda algunos consejos para seleccionar de manera correcta el método a aplicar, mismos que se describen a continuación:

- a) La aplicación del método A con el uso de una muestra clasificada estándar, sirve de manera efectiva cuando se requiere una prueba rápida, permitiendo identificar la forma de la partícula.
- b) La aplicación del método B con el uso de una muestra separada por tamaño de sus partículas requiere un tiempo mayor que el método anterior, pero permite obtener datos acerca de la forma y textura de los diferentes tamaños de partículas.
- c) La aplicación del método C apunta a la utilización de una parte adicional de agregado fino o una cantidad adicional de material aglutinante para llenar vacíos entre las partículas.
- d) El cálculo de contenido de vacíos no compactados proviene de la densidad relativa seca, la forma de la partícula y su textura, estando todo esto en función del volumen de cada fracción de la muestra.

#### **3.2.7.1.2 ASTM D5821-95**

Para el caso de los agregados gruesos, el análisis de caras fracturadas se basa en la norma ASTM D 5821-95 de (ASTM International, 1995), la cual dicta el procedimiento para la determinación en porcentajes de peso de la muestra de agregados con una o más caras fracturadas.

#### **3.2.7.2 Equipos**

##### **3.2.7.2.1 ASTM C 1252-03**

Para el caso de los agregados finos, (ASTM International, 2003) indica que se requerirá el uso de los siguientes equipos e insumos:

- a) **Tubo cilíndrico de cobre:** su altura será de aproximadamente 89mm, tendrá un diámetro de alrededor de 39mm y una capacidad de aproximadamente 100ml. La parte inferior del presente cilindro, será de metal acoplado al tubo y tendrá alrededor de 6mm de espesor.

- b) **Placa base metálica:** se conforma por dos discos concéntricos cuya utilidad es sujetar y dar firmeza al tubo de cobre; los radios de dichos discos serán de 38mm y 60mm y sus alturas de 3.5mm y 6.5mm respectivamente.
- c) **Embudo:** construido de cobre, sus diámetros inferior y superior serán de 12.7mm  $\pm$ 0.6mm y 54mm respectivamente; entre ambas caras habrá una altura de 38mm, lo cual provoca que la inclinación lateral del embudo sea de 61.5°.
- d) **Aro acrílico:** trabaja conjuntamente con el soporte del embudo, colaborando con la sujeción del tubo cilíndrico de vidrio durante el desarrollo del ensayo; sus dimensiones serán: diámetro interno de 60mm, diámetro externo de 70mm y altura de 10mm.
- e) **Soporte del embudo:** se conforma por un aro acrílico y dos láminas acrílicas, unidas entre sí a través de cuatro barras de aluminio; su manejo deberá permitir que el embudo se mantenga firme y colineal con los ejes (dentro de un ángulo de 4° y un desplazamiento de 2mm). Al colocar el embudo en el soporte, se verificará que entre la abertura inferior del mismo y la parte superior del cilindro, haya una distancia de 115mm  $\pm$ 2mm.
- f) **Placa de vidrio:** deberá ser cuadrada; sus lados medirán aproximadamente 60mm cada uno y el espesor de esta será mínimo de 4mm.
- g) **Bandeja:** construida de plástico o metal, su tamaño deberá permitir que el soporte del embudo se mantenga firme dentro de ésta con el fin de evitar pérdidas cuando se observe rebosamiento de la muestra sobre el cilindro.
- h) **Espátula:** construida de metal, tendrá una cuchilla de longitud aproximada de 100mm y 20mm de ancho; sus bordes deberán ser rectos y conjuntamente con en el extremo deberá observarse un ángulo recto.

- i) **Balanza:** con capacidad mínima que permita soportar la carga del material ensayado y con precisión de  $6g \pm 1g$ .

### 3.2.7.2.2 *ASTM D 5821-95*

Para el análisis de los agregados gruesos, (ASTM International, 1995) indica el requerimiento de los siguientes insumos y equipos:

- a) **Balanza:** su capacidad deberá ser tal que permita la determinación de las masas requeridas en el ensayo con una sensibilidad de 0.1g.
- b) **Tamices:** la selección de los tamices se basa en los tamaños de las partículas que conforman la muestra que se pretende analizar; dicha selección requerirá el uso de tamices normalizados con aberturas de: 37.5mm (1 1/2plg), 25.4mm (1plg), 19mm (3/4plg), 12.5mm (1/2plg) y 9.5mm (3/8plg)
- c) **Espátula:** puede usarse para este efecto una espátula de albañil; su objetivo es colaborar con la separación del agregado.
- d) **Bandejas:** la textura del fondo de las bandejas será plana y sus tamaños serán variados, en función de lo requerido por el ensayo.
- e) **Horno:** su capacidad será tal que pueda alcanzar una temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.7.3 *Muestreo*

#### 3.2.7.3.1 *ASTM C 1252-03*

Para el caso de los agregados finos, (ASTM International, 2003) indica que la muestra se obtendrá del agregado proveniente de una muestra de concreto bituminoso, mediante tamizado o con la aplicación de las normas ASTM D 75 y C 702.

Cuando se pretenda realizar un análisis con los métodos A y B, se utilizará el tamiz de abertura igual a 150 $\mu$ m (tamiz N°100) o el de 75 $\mu$ m (Tamiz N°200) para lavar la muestra, misma que posteriormente será secada y tamizada con el fin de conseguir las diferentes porciones de muestra para el ensayo, en recipientes separados. La aplicación del método C de ensayo, solicita que la muestra sea secada de acuerdo a la norma ASTM C 136.

Es importante que antes de iniciar con el ensayo, el cilindro de cobre sea calibrado, para lo cual en primera instancia, se colocará una capa fina de grasa en el borde superior de este y con la ayuda de la balanza, registrar el peso del cilindro más la grasa y más la placa de vidrio. Posteriormente se llenará el cilindro con agua desionizada (agua hervida) a una temperatura entre 18°C y 24°C y se colocará la placa de vidrio sobre el borde superior del cilindro eliminando las burbujas de aire atrapadas en el interior; se procede a eliminar el agua que haya rebosado del cilindro y a registrar la temperatura del agua y la masa del cilindro, más la placa de vidrio, más la grasa y más el agua. Finalmente, se retira el agua y la grasa del cilindro, dejándolo totalmente seco y limpio para poder registrar su masa (masa del cilindro solamente). Con los datos tomados, se procede a calcular el volumen del cilindro con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$V = \frac{1000 * M}{D}$$

En donde:

$V$  – volumen del cilindro<sup>11</sup>, en ml

---

<sup>11</sup> Si el volumen del cilindro supera los 100ml, se deberá ajustar el mismo hasta que su volumen sea exactamente 100ml; esto con el fin de evitar cálculos extras en el ensayo.

$M$  – masa neta del agua, en g

$D$  – densidad del agua, en  $\text{kg/m}^3$

Antes de iniciar con el desarrollo del ensayo, será necesario preparar la muestra en función del método que se pretenda utilizar; (ASTM International, 2003) indica lo siguiente:

- a) **Método A, Muestra de graduación o granulometría estándar:** se obtiene de la combinación de fracciones comprendidas entre los tamices N°8 y N°100; dicha combinación cumplirá con ciertas características presentadas a continuación con variaciones de masa de máximo  $\pm 0.2\text{g}$ :

Tamiz pasante	Tamiz retenido	Peso (g)
N°8	N°16	44
N°16	N°30	57
N°30	N°50	72
N°50	N°100	17

Tabla 52. ASTM C 1252-03. Fracciones individuales para el método A. Fuente: (ASTM International, 2003)

- b) **Método B, Fracciones de tamaños individuales:** para este método se deberán ensayar de manera separada las fracciones de muestra retenidas en los tamices N°16, N°30 y N°50; el cálculo de la angularidad final resulta de determinar el valor medio entre las angularidades individuales de cada fracción. A continuación se presenta la cantidad de muestra requerida para cada fracción a ensayar, misma que no podrá variar en más de  $\pm 0.1\text{g}$ :

Tamiz pasante	Tamiz retenido	Peso (g)
N°8	N°16	190
N°16	N°30	190
N°30	N°50	190
N°50	N°100	190

Tabla 53. ASTM C 1252-03. Fracciones individuales para el método B. Fuente (ASTM International, 2003)

- c) **Método C, Gradación de la muestra natural u original:** para este método, se tomará una muestra de características granulométricas iguales a las que se utilizarán en obra; la muestra a ensayar se formará por el material comprendido entre los tamices N°16 y N°100.

### **3.2.7.3.2 ASTM D 5821-95**

En cuanto al muestreo del agregado grueso, (ASTM International, 1995) indica que se deberá verificar que el material que se pretenda utilizar en el ensayo presente rugosidad, ya que es una característica que brinda efectos positivos en cuanto a la deformación del hormigón asfáltico, es decir, mientras mayor sea la rugosidad de los agregados gruesos, menor desplazamiento habrá entre la superficie de uno y otro agregado.

Para la adquisición de la muestra de ensayo se deberá aplicar el método de cuarteo al total de la misma para lograr reducirla a un menor tamaño que permita el desarrollo del ensayo. Cuando la muestra sea seleccionada, se deberá homogeneizar la misma con la ayuda de la espátula para lograr obtener datos óptimos y con mayor acercamiento a la realidad.

La selección de la masa de la muestra a analizar se basa en el tamaño del agregado, siendo necesaria: una masa de 2500g de áridos de tamaños de 37.5mm (1 1/2plg), una masa de 2000g de agregados de tamaños de 25.4mm (1plg), una masa de 1500g cuando la dimensión del agregado es de 19mm (3/4plg), una masa de 1200g cuando el tamaño del agregado es de 12.5mm (1/2plg) y finalmente, una masa de 300g cuando el tamaño del agregado es de 9.5mm (3/8plg).

### **3.2.7.4 Ensayo**

#### **3.2.7.4.1 ASTM C 1252-03**

(ASTM International, 2003) indica que una vez seleccionado el método de ensayo y cumplidas las especificaciones anteriores, el procedimiento será el siguiente:

- a) El material seleccionado para el ensayo se mezcla de manera homogénea con la espátula.
- b) Colocar el cilindro de cobre y el embudo sobre el soporte.
- c) Obstruir la parte inferior del embudo con el fin de evitar el paso de material y colocar la muestra en el embudo, nivelándola o enrazándola con la espátula.
- d) Dejar caer la muestra del embudo hasta el interior del cilindro.
- e) Una vez que todo el material del embudo logró atravesarlo, el exceso de material sobre el cilindro se limpia con la espátula colocando la parte ancha de la cuchilla en posición vertical, permitiendo el contacto leve entre la espátula y el borde del cilindro.
- f) Habrá que tener cuidado de no generar vibración o alguna acción que pueda causar compactación de la muestra mientras se ejecuta lo descrito en el literal (e).
- g) Si se observa la presencia de material en el exterior del cilindro, éste deberá ser limpiado para posteriormente registrar la masa del cilindro más la muestra; la medición se registrará con precisión de 0.1g.
- h) Ninguna partícula de la muestra deberá ser rechazada, ya que será necesario realizar una segunda y tercera prueba al material; para esto, toda la muestra deberá volver a la bandeja y se repetirán todos los pasos anteriores
- i) Finalmente, se deberá registrar el peso del cilindro de cobre cuando se encuentre vacío.

#### **3.2.7.4.2 ASTM D 5821-95**

(ASTM International, 1995) indica el procedimiento a ejecutar para el desarrollo del ensayo de caras fracturadas (angularidad) del agregado grueso; dicho procedimiento se resume a continuación:

- a) La muestra obtenida de la manera indicada en el numeral 3.2.7.3.2, pasará por un proceso de tamizado con el fin de clasificar la muestra en función del tamaño de sus partículas; se

utilizarán los tamices de las siguientes denominaciones: 37.5mm (1 1/2plg), 25.4mm (1plg), 19mm (3/4plg), 12.5mm (1/2plg) y 9.5mm (3/8plg).

- b) Del total de la muestra, todo el material retenido por el tamiz de 37.5mm (1 1/2plg) y todo el pasante del tamiz de 9.5mm (3/8plg) deberá descartarse.
- c) Una vez tamizada la muestra y seleccionada la parte del material que se utilizará en el ensayo, se procede a lavar esta parte de la muestra, lo cual permite una fácil identificación de las caras fracturadas.
- d) La muestra será secada a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa se presente constante.
- e) La masa de la muestra seca se identificará y registrará como la “masa total de la muestra” para los futuros cálculos.
- f) Posteriormente, la muestra se extenderá sobre una superficie seca, limpia, plana y extensa, tal que permita la identificación visual de las partículas con caras fracturadas.
- g) Se identifica como cara fracturada, a la superficie fracturada a través de procesos mecánicos (caras fracturadas de origen natural no se tomarán en cuenta), misma que deberá tener un área de al menos el 25% del área total de la superficie del agregado.
- h) Finalmente, se registra la masa de las partículas que presenten caras fracturadas como “Peso de agregado con caras fracturadas” para los posteriores cálculos.

### **3.2.7.5 Cálculos**

#### **3.2.7.5.1 ASTM C 1252-03**

Básicamente, (ASTM International, 2003) indica que el cálculo de la angularidad del agregado fino, consiste en la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\%a = \frac{V - \left(\frac{W_{agr}}{G_{sb}}\right)}{V} * 100$$

En donde:

$\%a$  – angularidad; vacíos sin compactar, en %

$V$  – volumen del cilindro, en ml

$W_{agr}$  – peso neto del agregado, en g

$G_{sb}$  – densidad relativa seca Bulk (gravedad específica) del agregado fino, en g/ml

Si la determinación de la angularidad se basó en la aplicación del método A o el método C, se promediarán todos los vacíos no compactados y se reporta el resultado como  $a_m$ . Si se utilizó el método B, las angularidades separadas se registrarán como  $a_1$ ,  $a_2$ , y  $a_3$  y la angularidad final será el promedio de estas tres, registrando el valor encontrado como  $a_m$ .

### 3.2.7.5.2 ASTM D 5821-95

Basando los cálculos en lo descrito por (ASTM International, 1995), el porcentaje de caras fracturadas será igual a la relación entre el peso de agregado de caras fracturadas y el peso total de agregado, multiplicado por 100; la ecuación se presenta a continuación:

$$\% \text{ de caras fracturadas} = \frac{A}{B} * 100$$

En donde:

$A$  – peso del agregado de caras fracturadas

$B$  – peso total del agregado

La aplicación de esta fórmula deberá verificar que el porcentaje de caras fracturadas sea al menos igual a 60%, lo cual indica que el agregado es de buena calidad; en caso de que el porcentaje calculado indique un valor inferior al 60%, el material será rechazado.

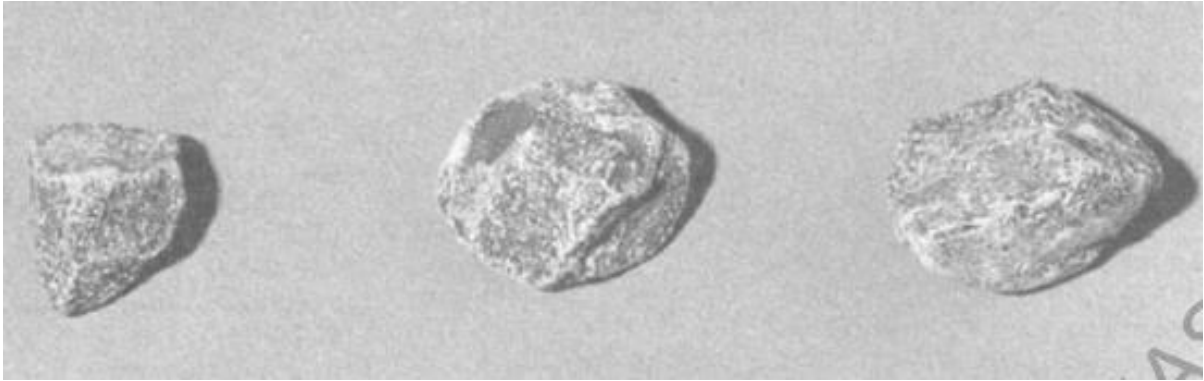
Como una manera de facilitar la identificación de caras fracturadas o no fracturadas, a continuación se presentan unas ilustraciones tomadas del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) en las cuales se muestran algunas partículas analizadas y sus características:



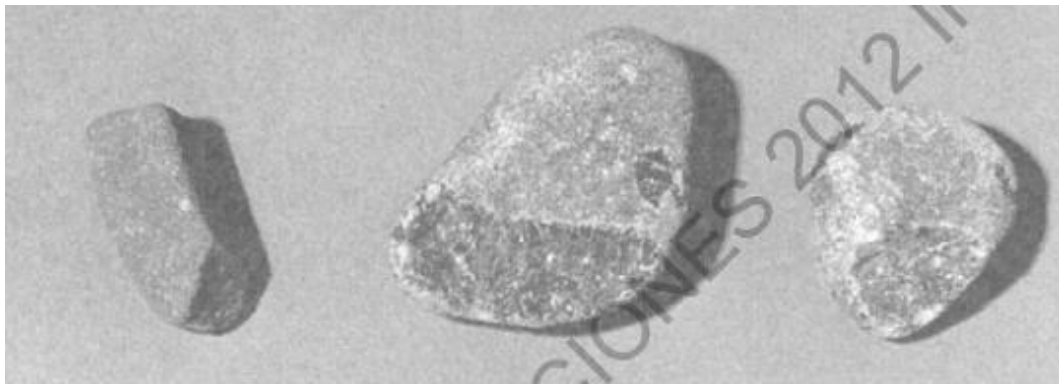
Ilustración 18. Partículas fracturadas: bordes agudos, superficies rugosas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)



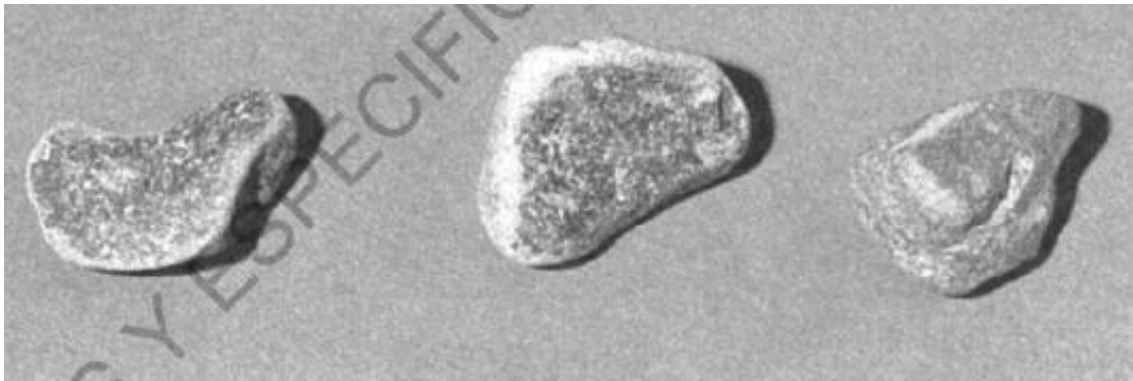
Ilustración 19. Partículas fracturadas: bordes agudos, superficies lisas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)



*Ilustración 20. Partículas fracturadas: bordes redondeados, superficies rugosas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)*



*Ilustración 21. Partícula fracturada flaqueada por dos partículas no fracturadas (solo desportilladas). Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)*



*Ilustración 22. Partículas no fracturadas: bordes redondeados, superficies lisas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)*



*Ilustración 23. Partículas no fracturadas: partículas redondeadas, superficies lisas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)*

### **3.2.7.6 Informe de resultados**

#### **3.2.7.6.1 ASTM C 1252-03**

Para la presentación de los resultados, es recomendable registrar en el informe: Fechas de muestreo y ensayo de la muestra, Nombres de laboratorio y laboratorista, datos referentes a la identificación de la muestra, método aplicado, vacíos no compactados (en función del método aplicado) con aproximación de 0.1%, densidad relativa y todos los datos que se consideren importantes para la interpretación de los resultados.

En el presente documento se presenta como “Anexo g” un formato guía para la presentación de resultados.

#### **3.2.7.6.2 ASTM D 5821-95**

(ASTM International, 1995) recomienda que el informe de resultados del ensayo, contenga datos referentes a la identificación de la muestra, laboratorio, laboratorista, fechas de muestreo y ensayo, peso inicial y final de la muestra ensayada, porcentaje de caras fracturadas y todos los datos necesarios para la interpretación correcta de los resultados. En el presente documento se presenta como “Anexo h” un formato recomendable para la presentación de resultados.

### 3.2.8 Equivalente de arena.

#### 3.2.8.1 Generalidades

Hablando de las subbases de grava y bases granulares utilizadas en un proyecto, la Norma Ecuatoriana Vial en su complementario II, descrita por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2013), indica que el ensayo referente al equivalente de arena, se realizará por dos ocasiones por cada  $1000\text{m}^3$  de material con el fin de verificar la calidad del material.

El (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2013) indica que para la realización de este ensayo con las bases, se tomará una muestra de los áridos que atraviesen la malla de 4.75mm y como resultado se deberá obtener mínimo un valor de 35%.

El equivalente de arena para mezclas asfálticas densas en caliente, tiene requerimientos que van en función del número de ejes equivalentes de carga de diseño para carreteras; según el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), cuando dichos ejes equivalentes se presentan en un número menor a 3 millones, el equivalente de arena será mínimo de 40%, para valores entre 3 y 30 millones de ejes equivalentes, el equivalente de arena será mínimo 45% y cuando el número de ejes equivalentes supere los 30 millones, el equivalente de arena será mínimo 50%.

Las superficies de rodadura de mezclas asfálticas en caliente, cumplirán con las siguientes características en cuanto al equivalente de arena según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013): Si el número de ejes equivalentes es menor o igual a 3 millones, el equivalente de arena será mínimo 45%, Si el número de ejes equivalentes es mayor a 3 y menor a 30 millones, el equivalente de arena será mínimo 50 y finalmente, si el número de ejes equivalentes es mayor a 30 millones, el equivalente de arena será mínimo 55%. El ensayo deberá realizarse a razón de un

ensayo por cada 1000m<sup>3</sup> de material, tomando la muestra de la tolva en frío o tres ensayos por cada 1000m<sup>3</sup> suministrados a la obra.

El árido fino para hormigón asfáltico de gradación abierta deberá tener según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), un equivalente de arena mínimo de 50%; la misma situación sucede con las mezclas asfálticas discontinuas.

La Norma Ecuatoriana Vial 12 del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica en su volumen 3 que el ensayo de equivalente de arena se realizará aplicando el “Método de Ensayo Estándar para Valor de Equivalente de arena de Suelos y Agregado Fino” descrito por (ASTM International, 2002) en su norma ASTM D2419-02.

El método de ensayo mencionado, tiene como fin la determinación de la relación entre arcilla o finos plásticos y el polvo en suelos granulares y áridos finos (agregados que atraviesan el tamiz de 4.75mm (tamiz N°4)); el equivalente de arena se puede definir como la medida del contenido de contaminación de limo o arcilla presente en el árido fino.

### 3.2.8.2 Equipos

Los equipos y reactivos necesarios para el desarrollo de esta prueba se describen en la norma ASTM D 2419-02 de (ASTM International, 2002); dichos equipos se describen a continuación:

- a) **Cilindro graduado:** construido de plástico transparente, contiene tapones de hule, tubo irrigador, una pesa y un sifón acoplados.
- b) **Molde de medida:** deberá ser cilíndrico con un diámetro de alrededor de 57mm (2.25plg) y capacidad volumétrica de 85ml  $\pm$ 5ml.
- c) **Tamiz:** su abertura normalizada será de 4.75mm (Tamiz N°4).
- d) **Embudo:** su objetivo será permitir el paso de la muestra al cilindro graduado.

- e) **Botellas:** para el presente ensayo se requiere el uso de dos recipientes con capacidad de 3.8 litros (1 galón).
- f) **Recipientes planos:** su utilidad será permitir el mezclado fácil de la muestra.
- g) **Cronómetro:** para permitir la toma de datos en cuanto al tiempo.
- h) **Agitador mecánico para equivalente de arena:** tendrá la capacidad de sujetar el cilindro horizontalmente y para generar movimientos paralelos a la longitud del cilindro; su capacidad de movimiento será de  $203.2\text{mm} \pm 1.0\text{mm}$  ( $8\text{plg} \pm 0.04\text{plg}$ ) a una velocidad de  $175\text{rpm} \pm 2\text{rpm}$ .
- i) **Agitador Equivalente de Arena operado manualmente:** deberá tener la capacidad de generar movimientos oscilatorios, de tal manera que se produzcan 100 revoluciones en  $45\text{seg} \pm 5\text{seg}$ ; su longitud de movimiento será de  $12.7\text{cm} \pm 0.5\text{cm}$  ( $5\text{plg} \pm 0.2\text{plg}$ ).
- j) **Horno:** su temperatura deberá permanecer constante y alcanzar por lo menos  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- k) **Papel filtro:** Watman N°2V o equivalente.
- l) **Solución Stock:** para su preparación con formaldehído se usará: Cloruro de calcio anhidro de grado técnico (454g (1.0 lb)), Glicerina USP (2050g (1640ml)) y Formaldehído al 40% en volumen (47g (45ml)); si se desea preparar la solución con glutaraldehído se requiere: Cloruro de calcio hidratado de grado A.C.S (577g (1.27 lb)), Glicerina USP (2050g (1640ml)) y Pentanedial (glutaraldehído) al 50% en agua (59g (53ml)); la preparación con Kathon CG/ICP se hará con: Cloruro de calcio dihidratado de grado A.C.S (577g (1.27 lb)), Glicerina USP (2050g (1640ml)) y Kathon CG/ICP (63g (53ml)). La preparación de una de estas soluciones se hará colocando el primer reactivo en 1.89L de agua destilada; posteriormente se enfría y se adiciona la glicerina y el tercer reactivo, se produce una mezcla homogénea y se diluye para formar una cantidad igual a 3.78L (1gal). En el caso de la

preparación de la solución con formaldehído, la mezcla del cloruro de calcio con agua destilada deberá ser pasada por un papel filtro antes de continuar con los siguientes pasos.

- m) **Solución de trabajo de cloruro de calcio:** se deberá preparar con 3.8L de agua destilada o desmineralizada y 85ml  $\pm$ 5ml (medida tomada con un medidor de lata) de cloruro de calcio.

### 3.2.8.3 *Muestreo*

(ASTM International, 2002) indica que el desarrollo del presente ensayo, demanda una muestra de al menos 1500g, misma que se formará por material pasante del tamiz de 4.75mm (N°4); de la fracción gruesa de la muestra tomada, se romperán algunos grumos sin generar degradación apreciable; se deberá también eliminar cierta cantidad de revestimiento de los agregados gruesos a través del secado superficial y la frotación de los agregados. Este material obtenido anteriormente, deberá agregarse a la fracción fina de la muestra. Finalmente, se preparará la muestra para el ensayo de la siguiente manera:

- a) **Procedimiento A:** Si se observa la falta de humedad en la muestra, se agregará cierta cantidad de agua a la misma, de tal modo que se impida la segregación y se mantenga el flujo libre del material. Con el medidor de lata se tomarán cuatro muestras, colocando en el mismo una cantidad superior a su capacidad y golpeando el medidor contra una superficie plana, resistente y nivelada por cuatro ocasiones o más con el fin de que la muestra dentro del medidor se presente consolidada y con una superficie a nivel del medidor o ligeramente redondeada sobre el borde del mismo. Seguidamente se determina y registra la masa o el volumen de las cuatro muestras. Se continúa colocando el material en muestra original, cuarteándola y obteniendo una nueva muestra, adecuada para llenar el medidor. Con la ayuda del horno se seca la muestra hasta que su masa se muestre constante y posteriormente dejar enfriar la muestra.

b) **Procedimiento B:** en caso de que se observe falta de humedad, agregar agua a la muestra hasta obtener un material sin segregación y con flujo libre; posteriormente cuartear una muestra entre 1000g y 1500g de material y mezclarla por un periodo de tiempo aproximado de 1 minuto, verificando que se haya obtenido la humedad apropiada<sup>12</sup>. Si a la muestra original se le agregó agua, se le deberá dejar reposar por 15 minutos cubierta con una tapa o paño húmedo que no deberá tocar la muestra. Transcurrido este tiempo, el material volverá a ser mezclado y se formará un cono del cual se tomará la muestra con el medidor, haciéndole correr de abajo hacia arriba hasta sobrellenarlo. Con la palma de la mano, presionar el material del medidor hasta su consolidación y proceder a nivelarlo con un enrasador hasta el borde del medidor.

#### 3.2.8.4 Ensayo

Según lo indicado por (ASTM International, 2002), una vez obtenida la muestra se deberá:

- a) Ajustar el sifón a una botella con 3.8L de cloruro de calcio; colocar la botella a una altura de  $90\text{cm} \pm 5\text{cm}$  medida desde la base de la superficie de trabajo.
- b) Iniciar con el sifonado hasta que en el cilindro graduado entre una cantidad de  $102\text{mm} \pm 3\text{mm}$  ( $4\text{plg} \pm 0.1\text{plg}$ ) de solución de trabajo de cloruro de calcio.
- c) Colocar una de las muestras en el cilindro graduado a través del embudo.
- d) Se procede a golpear el fondo del cilindro levemente contra la palma de la mano con el fin de eliminar burbujas de aire atrapado y permitir que la muestra se humedezca por completo.
- e) Dejar reposar la muestra de 10 a 11 minutos y posteriormente tapan el cilindro graduado, invertir levemente su posición y agitarlo para aflojar la muestra. Una vez que el material

---

<sup>12</sup> La verificación de humedad se logra colocando una parte del material en la palma de la mano, apretándola y observando que se amolde sin cortarse; se deberá evitar los excesos de agua.

fue aflojado, mover la muestra mediante agitación; dicha agitación puede ser mediante un agitador mecánico (con el agitador mecánico de equivalente de arena por un tiempo de  $45s \pm 1s$ ), agitador manual (se asegura el tapón y se ajusta el contador a cero; se realizarán aproximadamente 100 golpes) o por agitación manual (con el cilindro en posición horizontal se agita el cilindro por aproximadamente 90 ciclos (ida y vuelta) en un tiempo de 30 segundos; los movimientos para la agitación deberán cubrir una longitud de  $23cm \pm 3cm$ ).

- f) Una vez que se deja de agitar el cilindro, éste se coloca sobre la mesa de trabajo y se retira el tapón.
- g) Colocar dentro del cilindro el tubo irrigador y remover la abrazadera de la manguera.
- h) Con el irrigador lavar el material que pueda estar pegado sobre las paredes del cilindro.
- i) Remover el material que pueda estar pegado al fondo del cilindro mediante giros del tubo irrigador (ingresando dicho tubo de manera regular hasta el fondo del cilindro), lo cual permite que las partículas finas se sobrepongan sobre las gruesas.
- j) Los giros se detendrán una vez que se observe que la solución alcance los 38cm (15plg) del cilindro graduado (mientras se retira la manguera se deberá asegurar que el nivel llegue exactamente hasta los 38cm).
- k) Dejar reposar la muestra en el cilindro por 20 minutos  $\pm 15s$ . La medición del tiempo inicia cuando el tubo es removido por completo del cilindro.
- l) Registrar la altura de la arcilla en suspensión; si luego de concluido el tiempo no es posible registrar este valor, dejar pasar el tiempo necesario para que dicha lectura pueda ser tomada, registrar este valor y el tiempo que se requirió para tomarlo. Si el tiempo supera los 30 minutos, será necesario repetir en ensayo por tres ocasiones.

- m) Continuar con el procedimiento colocando la pesa dentro del cilindro, haciendo que su pie rebose con la superficie de la arena y evitando golpear el indicador sobre el borde superior del cilindro.
- n) Registrar la lectura de la arena quitándole 25.4cm (10plg) a la altura del borde superior del indicador que se encuentra tocando el lado interno del cilindro.

### 3.2.8.5 Cálculos

(ASTM International, 2002) indica que los cálculos se realizan a través de la relación entre la lectura de arena y la lectura de arcilla de la siguiente manera:

$$SE = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} * 100$$

En donde:

*SE* – equivalente de arena, en %; el valor del equivalente de arena se deberá reportar como un número entero (su inmediato superior)

### 3.2.8.6 Informe de resultados

Para la presentación de resultados se recomienda que se identifique: datos de la muestra, nombre del laboratorio y laboratorista, fecha de muestreo, fecha de realización del ensayo, métodos aplicados en el ensayo, resultados obtenidos en los cálculos y todos los datos necesarios para que el lector pueda identificar e interpretar los resultados del ensayo.

### 3.2.9 Relación de Soporte de California (CBR)

#### 3.2.9.1 Generalidades

El (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que el ensayo de CBR consiste en el análisis de laboratorio a diferentes muestras en diferentes condiciones (alteradas, no alteradas, compactadas, saturadas, etc.); el fin de esta prueba es obtener el valor de soporte de una muestra en base a su contenido de humedad. Según el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), el CBR “es una medida de la resistencia de un suelo al esfuerzo cortante bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas”.

Para las subbases granulares el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que luego de un análisis, su buena calidad se certifica si el resultado de soporte CBR es igual o mayor a 30%. El ensayo se deberá realizar a razón de una vez por cada 500m<sup>3</sup> de material tendido en pista.

Para el caso de las bases granulares, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que para que la misma tenga la calidad adecuada para utilizarla en obra, un ensayo de soporte CBR deberá dar como resultado un valor igual o superior a 80%. La frecuencia de realización del ensayo será de una vez por cada 2000m<sup>3</sup> de material.

Tal como lo indica (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su “Norma Ecuatoriana Vial 12, volumen 3”, el ensayo se realiza en función de lo descrito por ASTM D 1833, norma que se describe a continuación.

(ASTM International, 1987) indica que el propósito de este ensayo es establecer un índice de resistencia de los suelos (CBR), mismo que es usado para identificar la capacidad portante del suelo, del afirmado y de las capas de base y subbase.

### 3.2.9.2 Equipos

La obtención de resultados veraces tras la ejecución del ensayo de CBR, se logra con la utilización de equipos que cumplan con las características siguientes según (ASTM International, 1987):

- a) **Prensa:** deberá parecerse a la establecida para los ensayos de compactación y su objetivo será forzar la penetración de un pistón en la muestra; tendrá una capacidad de carga mínima de 44.5kN (10000 lbf) con una precisión de 44N (10 lbf) o menos. La velocidad de penetración deberá ser de 1.27mm (0.05plg) por minuto.
- b) **Molde:** construido de metal, tendrá forma cilíndrica y sus diámetro interior y altura serán de 152.4mm  $\pm 0.66$ mm (6plg  $\pm 0.026$ plg) y 177.8mm  $\pm 0.46$ mm (7plg  $\pm 0.018$ plg), respectivamente. El molde contendrá un collar metálico de 50.8mm (2plg) de altura y una placa base perforada (su espesor será de 9.53mm (3/8plg)); las perforaciones mencionadas no superarán de 1.6mm y su separación mostrará uniformidad en la circunferencia interior del molde.
- c) **Disco espaciador:** construido de metal, tendrá forma circular y diámetro interior y espesor de 150.8mm (5 15/16plg) y 61.37mm  $\pm 0.127$ mm (2.416plg  $\pm 0.005$ plg), respectivamente. Su función será servir de falso fondo en el molde cilíndrico al ejecutar la compactación.
- d) **Pistón:** deberá ser metálico con sección circular transversal con un diámetro de 49.63mm  $\pm 0.13$ mm (1.954plg  $\pm 0.005$ plg); su longitud mínima deberá ser 101.6mm (4plg).
- e) **Medidor de expansión:** por cada molde se deberá contar con una placa de metal perforada de diámetro igual a 149.2mm (5 7/8plg); el diámetro de las perforaciones no deberá ser matos a 1.6mm (1/16plg); el centro tendrá un sistema de tornillo para regular su altura.

- f) **Trípode:** con la capacidad de apoyar sus patas en el borde superior del molde y de contener en su centro un deformímetro con su vástago coincidente con el vástago de la placa; el objetivo de este es controlar la posición de la placa y medir su expansión con aproximación de 0.025mm (0.001plg).
- g) **Pesas:** el total de la masa necesaria será de 4.54kg  $\pm$ 0.02kg, repartida en dos pesas o contenida solamente en una (deberá tener un agujero central de 53.98mm de diámetro); de igual manera, se requiere el uso de pesas ranuradas de metal con masa igual a 2.27kg  $\pm$ 0.02kg. los diámetros de las pesas deberán tener entre 149.23mm y 150.81mm (5 7/8plg y 5 15/16plg).
- h) **Deformímetro:** se requiere el uso de dos unidades con un recorrido mínimo de 25mm (1plg). Sus divisiones permitirán lecturas en escalas de 0.025mm (0.001plg); uno de los deformímetros deberá ser acoplado en la prensa, lo cual facilitará la medición de la penetración del pistón en la muestra.
- i) **Horno:** deberá permitir alcanzar una temperatura mínima de 110°C  $\pm$ 5°C.
- j) **Balanza:** se requerirán dos balanzas, una con capacidad de 20kg y otra con capacidad de 1000g y sensibilidad de 1g y 0.1g, respectivamente
- k) **Recipiente:** su capacidad deberá permitir la sumersión total del molde.
- l) **Tamices:** según los tamices normalizados, se requieren los que tengan aberturas de: 4.75mm (N°4), 19.05mm (3/4 plg) y 50.80mm (2plg).
- m) **Papel filtro:** su diámetro será igual al diámetro interno del molde.
- n) **Espátula:** se usará para cuartear y obtener una muestra adecuada para el ensayo.

### 3.2.9.3 Muestreo

Para iniciar con el muestreo habrá que encontrar una relación peso unitario-contenido de agua con el equipo estándar o modificado de especímenes sumergidos en agua por 4 días, que contengan sobre ellos una masa igual a la que actuaría sobre el mismo una vez terminada la construcción del pavimento, es decir, se analiza la condición desfavorable más crítica.

Al analizar la muestra, (ASTM International, 1987) indica que si más del 75% de su composición atraviesa el tamiz de 19.1mm (3/4plg), dicho material pasante se utilizará para la ejecución del ensayo; si luego del tamizado se observa que sobre el tamiz ed 19.1mm (3/4plg) se retiene una cantidad superior al 25%, dicha cantidad será retirada y reemplazada por una cantidad igual de material comprendio entre los tamices de 19.1mm (3/4plg) y 4.75mm (N°4).

Partiendo con las indicaciones anteriores se procede a tomar la muestra según lo descrito por (ASTM International, 1987), siguiendo los siguientes pasos:

- a) Tomar una muestra con masa suficiente para realizar el ensayo de apisonado mas una cantidad igual a 5kg por cada molde.
- b) Determinar los valores de humedad óptima y densidad máxima con los procesos descritos en los numerales 3.2.14 y 3.2.12 respectivamente, del presente documento.
- c) Proceder con la determinación y registro de la humedad natural del suelo mediante el secado al horno.
- d) A la muestra se le agrega agua en cantidades requeridas para lograr la humedad óptima y se mezcla la muestra hasta que se obtenga una textura homogénea.

#### 3.2.9.4 Ensayo

(ASTM International, 1987) indica que una vez que se obtuvo la humedad óptima en la muestra, el ensayo seguirá los siguientes pasos:

- a) Registrar la masa del molde más la base.
- b) Colocar en el molde el collar y el disco espaciador conjuntamente con el papel filtro.
- c) Colocar la muestra dentro del molde, compactándola con el método Proctor Estándar o Proctor Modificado; cada muestra que se prepare, es decir cada molde, deberá contener una muestra con cantidad diferente de humedad y el número de golpes de compactación diferente, lo cual permite llegar a las humedades y densidades previamente requeridas. Para un suelo granular se recomienda utilizar 3 moldes por cada muestra (el número de golpes por capa será de 55, 26 y 12) mientras que, para un suelo cohesivo 9 moldes serían los adecuados. El objetivo del análisis de suelos cohesivos es identificar su comportamiento ante la actuación de diferentes grados de humedad (de igual manera, el número de golpes por capa será de 55, 26 y 12), por lo que se deberá desarrollar una curva que muestre la relación entre el peso específico, humedad y relación de capacidad de soporte.
- d) Cuando el ensayo requiera de sumersión de la muestra compactada, se tomará una cantidad de material igual a 100g para el caso de los materiales finos o una muestra de 500g para el caso en que se haya presencia de agregados gruesos. Éstas muestras se tomarán una antes y otra después de la compactación; las muestras se mezclan y se determina su humedad.
- e) Si no se requiere sumersión de la muestra, su humedad se determina tomando una determinada cantidad de material del centro de la probeta (partiéndola por la mitad), misma que se extrae una vez terminado el proceso de penetración.

- f) Una vez la compactación haya terminado, se retira el collar del molde y la muestra compactada se enrasa (enrasador o cuchillo); si luego del enrasado se observan orificios en la probeta, se deberá rellenar los mismos con el material fino que resultó desechado con el enrasado. La colocación y compresión de este material de relleno se realiza con la espátula.
- g) Se procede a retirar el molde, invertirlo y volverlo a colocar sin el disco espaciador y ubicando un papel filtro entre el molde y la base. Registrar su peso.
- h) La inmersión de la probeta consiste en invertir su posición original y sobre su superficie colocar la placa perforada que contiene el vástago. Sobre dicha placa se colocará una masa (sobrecarga) que provoque una presión equivalente a la que se originará con las capas del pavimento; esta sobrecarga se obtiene con los anillos (pesas de 2.27kg (5.5 lb)) y en ningún caso deberá ser menor a 4.54kg (10 lb).
- i) Posteriormente, se coloca sobre la base del molde, el trípode con el deformímetro, emparejando los vástagos (de la placa y del deformímetro) y se registra el hinchamiento a través de la lectura de dial, el día y la hora en la que se tomó el dato.
- j) Para continuar, se sumerge la muestra (con el molde y la sobrecarga; en caso de que sea posible, se dejará también el trípode y deformímetro sobre el molde) en el tanque con agua, permitiendo que mientras esté sumergida, el agua tenga entrada libre tanto por la parte inferior como por la parte superior del molde. Se requiere que la muestra se mantenga en estas condiciones por 96 horas<sup>13</sup>; con el transcurso del tiempo se comprobará que el nivel del agua se muestre constante.
- k) Una vez se haya cumplido el tiempo de inmersión, se registrará nuevamente el hinchamiento colocando el deformímetro de la misma manera que para la primera lectura (en caso de que

---

<sup>13</sup> Existen suelos granulares de saturación rápida, para los cuales no será completamente necesario completar este período de tiempo.

se haya retirado para la sumersión). El valor de la expansión se registrará como el porcentaje de la altura de la probeta.

- l) El ensayo continúa retirando la probeta del agua, dejando caer el agua contenida sobre la superficie de la muestra (sin que la sobrecarga y la placa se muevan de su posición original) y dejándola reposar por 15 minutos. Transcurrido este tiempo, se retira la sobrecarga y la placa para identificar y registrar la masa de la muestra más el molde.
- m) Inmediatamente, se vuelve a colocar la sobrecarga que simula la acción de las capas del pavimento sobre el suelo de la siguiente manera: se deberá evitar el empuje hacia arriba del suelo asentando el pistón de penetración en el orificio de la primera sobrecarga anular colocada sobre la muestra, continuar con la colocación de la muestra en la prensa y agregar el restante de sobrecarga.
- n) Se coloca el deformímetro en una posición que permita la medición de la penetración, se aplica una carga de 50N (5kg) para asegurar el pistón en su posición y se ajusta a cero la lectura del dial del deformímetro, del medidor de carga y el control de penetración (dicho control deberá asentarse sobre el pistón, la muestra o el molde).
- o) Completado todo esto, se inicia con la aplicación de carga a una velocidad constante de 1.27mm/min (0.05plg/min). Si no se cuenta con una prensa automática que permita controlar su velocidad, las lecturas de penetración se tomarán con la ayuda del deformímetro y un cronómetro, registrando las lecturas en las penetraciones de: 0.63mm (0.025plg), 1.27mm (0.050plg), 1.90mm (0.075plg), 2.54mm (0.1plg), 3.17mm (0.125plg), 3.81mm (0.150plg), 5.08mm (0.200plg), 7.62mm (0.300plg), 10.16mm (0.400plg) y 12.70mm (0.500plg).

- p) El ensayo finaliza con el desmontaje del molde y la toma de material desde la parte superior, en la zona contigua al sitio del cual se realizó la penetración; este material se usará para la determinación de su contenido de humedad.

### 3.2.9.5 Cálculos

Los datos obtenidos del ensayo servirán según (ASTM International, 1987) para los cálculos de:

- a) Humedad de compactación, que indica la cantidad de agua requerida por la mezcla para obtener la humedad de ensayo:

$$\% \text{ de agua a añadir} = \frac{H - h}{100 + h} * 100$$

En donde:

$H$  – humedad de ensayo

$h$  – humedad natural

- b) Agua absorbida, misma que se calcula como la diferencia entre humedades antes y después de la inmersión (se expresa en porcentaje); otra manera de calcular dicho valor es mediante el peso seco calculado y el peso húmedo antes o después de la inmersión, es decir, se utiliza el contenido de humedad total de la muestra.
- c) Presión de penetración, la cual resulta de graficar una curva con los datos de penetración (en mm o plg) en el eje de las abscisas y las lecturas de las presiones sobre el pistón ( $\text{kg/cm}^2$  o  $\text{lb/plg}^2$ ) en el eje de las ordenadas. En ocasiones será necesario realizar una corrección del origen de la curva con el fin de ajustar las irregularidades de la superficie de la muestra.

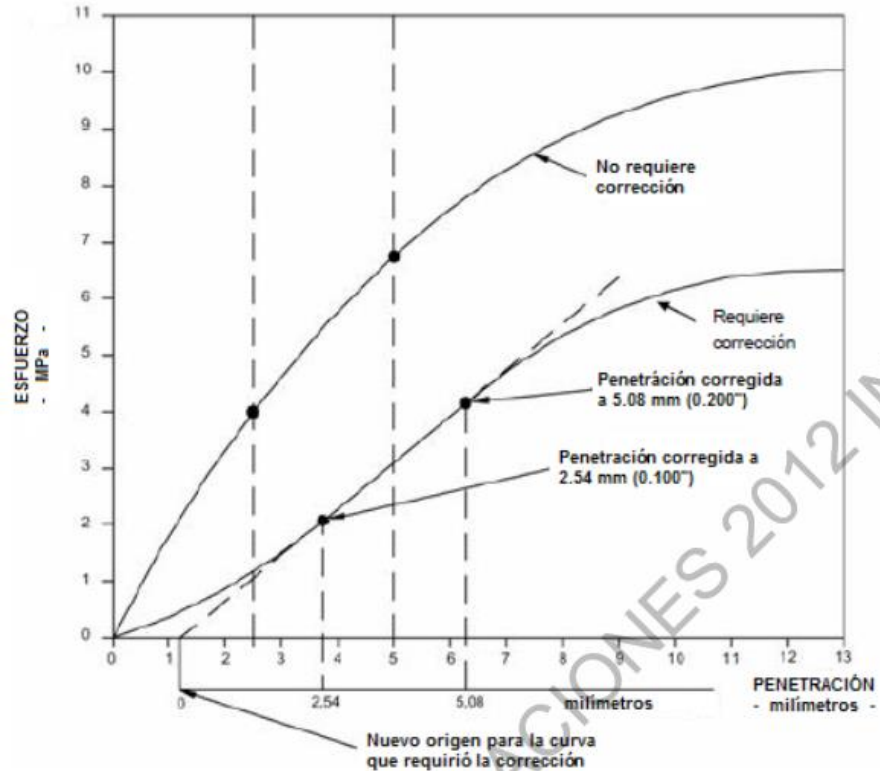


Ilustración 24. Correcciones a la curva de penetración. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

- d) Expansión, que es igual a la diferencia entre las lecturas del deformímetro antes y después de la sumersión:

$$\% \text{ expansión} = \frac{L_2 - L_1}{127} * 100$$

En donde:

$L_1$  – Lectura inicial, en mm

$L_2$  – lectura final, en mm

- e) Valor de relación de soporte de California (índice de resistencia CBR), el cual representa el porcentaje de presión de penetración ejercida sobre el suelo por parte del pistón en relación a la presión para la misma penetración sobre una muestra estándar. La muestra estándar tendrá las características descritas en la siguiente tabla. El cálculo del CBR parte de la curva

de penetración descrita en el literal c), identificando en la misma la presencia o ausencia de un punto de inflexión; si existe el punto de inflexión, se trazará una tangente a este punto que corte en el eje de las abscisas, el cual servirá como un nuevo origen para determinar la presión en 2.54mm y 5.08mm; en caso de la ausencia del punto de inflexión, se tomará los valores de presión para 2.54mm y 5.08mm de la curva original. Una vez obtenidos los valores de esfuerzo-penetración, indicados, se calcula el valor de relación de soporte dividiendo dichos esfuerzos para los esfuerzos de referencia de la siguiente tabla y multiplicando el resultado por 100:

Penetración		Presión		
mm	plg	MPa	Kgf/cm <sup>2</sup>	Lb/plg <sup>2</sup>
2.54	0.1	6.90	70.31	1.00
5.08	0.2	10.35	105.35	1.50

Tabla 54. Muestra estándar para determinación de CBR. Fuente: (ASTM International, 1987)

### 3.2.9.6 Informe de resultados

Según lo indica (ASTM International, 1987), es importante tener en cuenta que el valor de CBR será el correspondiente a 2.54mm de penetración; cuando el ensayo indique que el valor CBR obtenido con la penetración de 5.08mm es mayor, el ensayo deberá repetirse y en caso de obtener nuevamente estos resultados, se usará el valor CBR obtenido con la penetración de 5.08mm.

Para que el informe de resultados sea completo, se deberá presentar en el mismo: datos referentes a identificación de la muestra, fecha de muestreo, fecha de ensayo, nombre del laboratorio y laboratorista, humedad, densidad, método de compactación, gráfica Presión-Penetración, gráfica Densidad seca-Humedad, gráfica Densidad seca-CBR y todos los datos referentes a la correcta interpretación de los resultados por parte del lector. En el presente documento, se presenta como “Anexo i” un formato recomendable para la presentación de resultados, exceptuando los gráficos mencionados.

### 3.2.10 Prueba Marshall

#### 3.2.10.1 Generalidades

Las mezclas asfálticas diseñadas como superficies de rodadura de hormigón asfáltico en caliente deberán ser analizadas bajo este criterio para verificar su calidad, siendo necesario en base a lo descrito por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), la realización de dos ensayos por día trabajado. En función de la clase de la mezcla, la estabilidad Marshall deberá ser de 815kg (8kN), 544kg (5.34kN) o 453kg (4.45kN) para las mezclas de clase A, B y C, respectivamente.

El (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que en lo que respecta al ensayo Marshall, se deberán seguir los lineamientos descritos en la norma MTC E 504 del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)

La norma MTC E 504 indica que la prueba Marshall consiste en la elaboración y compactación de cilindros de hormigón asfáltico con diámetro y altura de 102mm y 64mm, respectivamente con el fin de obtener datos que permitan la determinación de sus parámetros de comportamiento<sup>14</sup>. Tal como lo indica el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016), el método se aplica para mezclas asfálticas cuyos agregados gruesos tienen un diámetro máximo de 25mm.

La determinación de la estabilidad Marshall (capacidad máxima de resistencia a la deformación de una muestra tras la acción de una carga constante) y su actuación conjunta con el flujo (deformación de la mezcla durante el ensayo de estabilidad)<sup>15</sup>, densidad y vacíos, permite diseñar mezclas asfálticas en laboratorio o su evaluación.

---

<sup>14</sup> Estabilidad, Flujo, Resistencia a tracción indirecta y Módulos.

<sup>15</sup> Al hablar de flujo, se puede decir que no existe un valor óptimo, pero si limitaciones máximas y mínimas; si una vez determinado el contenido óptimo de asfalto, el flujo supera su límite máximo, la mezcla se considera demasiado plástica o inestable; por el contrario, si el flujo está por debajo de su límite inferior, la mezcla se vuelve demasiado rígida.

El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) establece que cuando el ensayo Marshall se realiza con fines de diseño, se deberán tomar al menos 3 muestras por cada incremento de betún; dicho incremento se realizará a razón de 0.5% y su punto de partida se determina en función de la práctica del diseñador y antecedentes de los materiales utilizados. Será importante mencionar que al comparar datos de estabilidad y flujo de mezclas preparadas en laboratorio y mezclas preparadas en campo, puede existir una variación pronunciada, lo cual interferirá en el diseño de hormigón asfáltico.

El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) indica que si luego de ejecutar el ensayo en diferentes grupos de muestras de mezclas producidas en planta, se obtienen resultados muy dispersos en cuanto a estabilidad y flujo, se deberá indagar en el problema y resolverlo; dicho problema puede ser: mezclado de poca calidad, mala aplicación del ensayo, variaciones en la gradación de los materiales, variaciones en la cantidad usada de betún, problemas en la planta de mezclado, etc.

### **3.2.10.2 Equipos**

El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) describe los equipos necesarios para la correcta ejecución del ensayo; dichos equipos y su descripción se resume a continuación:

- a) **Molde ensamblado para especímenes:** tendrán forma cilíndrica y se utilizará conjuntamente con las placas base y collarines de extensión.
- b) **Extractor de especímenes:** disco de acero con diámetro mínimo de 100mm y espesor de 12.5mm; su utilidad conjuntamente con el collar, consiste en colaborar con la extracción de los cilindros compactados del molde.
- c) **Martillo de compactación:** puede ser manual o mecánico y se conforma por una superficie plana de compactación con un tornillo y una masa de 4.54kg  $\pm$ 0.01kg; dicha masa deberá

caer desde una altura de  $457.2\text{mm} \pm 1.5\text{mm}$ ; En el caso del martillo mecánico, tendrá un mecanismo de rotación que le permitirá generar los golpes (de la superficie de compactación sobre la muestra) a razón de  $64 \pm 4$  golpes por minuto; el mecanismo de rotación generará de 18rpm a 30rpm.

- d) **Pedestal de compactación:** las dimensiones de su superficie serán de 203.2mm por 203.2mm y su altura deberá aproximarse a 457mm; se cubre con una placa cuadrada de acero de 304.8mm de lado y 25.4mm de espesor.
- e) **Sostén de molde para espécimen:** si la compactación se va a realizar con un martillo simple, el sostén se apoyará sobre el pedestal con el fin de lograr que el molde de compactación se centre sobre el pedestal. Si se planea utilizar un sistema de multimartillos, no será necesario centrar el molde.
- f) **Horno:** con la capacidad de obtener temperaturas necesarias para la ejecución del ensayo.
- g) **Aparato de mezclado:** de preferencia mecánico; para la mezcla, la muestra deberá mantenerse a la temperatura requerida en el diseño; se buscará la obtención de una mezcla homogénea. Para el caso de mezclas a mano, se requerirá únicamente un recipiente capaz de soportar la temperatura de trabajo y con volumen necesario para contener toda la muestra en su interior.
- h) **Contenedores:** deberán permitir calentar la muestra al horno. Se requieren también contenedores cubiertos para el calentamiento del betún.
- i) **Utensilios para mezclado:** necesarios para manipular la mezcla asfáltica (guantes, espátulas, etc.). Se requerirá también un cucharón de base plana que permita generar bacheos de los agregados y una cuchara para la colocación de la muestra en el molde.

- j) **Termómetros:** su capacidad de medición estará entre los 10°C y 200°C con sensibilidad de 3°C.
- k) **Balanza:** con la capacidad necesaria para establecer la masa de la muestra y con exactitud de 0.1g.
- l) **Equipos para ensayo de estabilidad y flujo:** Cabezal de ruptura, máquina para compresión, anillo dinamómetro, medidor de flujo, bala de agua, horno, baño de aire y termómetros.

### 3.2.10.3 Muestreo

El muestreo básicamente consistirá en la preparación de los especímenes de ensayo, lo cual según el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) consiste en secar los agregados hasta que su masa se muestre constante; esto se logra a una temperatura entre 105°C y 110°C. seguidamente se tamiza la muestra para obtener las fracciones deseadas, siendo las mínimas las descritas a continuación:

Fracciones en mm	Fracciones en plg
25 a 19	1 a 3/4
19 a 12.50	3/4 a 1/2
12.50 a 9.50	1/2 a 3/8
9.50 a 4.75	3/8 a N°4
4.75 a 2.36	N°4 a N°8
Pasa el tamiz de 2.36	Pasa el tamiz N°8

Tabla 55. Fracciones mínimas requeridas para la prueba Marshall. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)

### 3.2.10.4 Ensayo

El desarrollo del ensayo seguirá las siguientes indicaciones de la norma MTC E 504 según el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016):

- a) Se determina las temperaturas de la mezcla y compactación; el betún se calentará hasta que su viscosidad se encuentre en  $0.17\text{Pa}\cdot\text{s} \pm 0.02\text{Pa}\cdot\text{s}$  (Pascal-segundo) para el mezclado y  $0.28\text{Pa}\cdot\text{s} \pm 0.03\text{Pa}\cdot\text{s}$  para la compactación.
- b) Cuando en las mezclas asfálticas se usan betunes con disolventes hidrocarbonados (Mezclas con asfaltos Cutback), la temperatura de calentado será tal que permita obtener una viscosidad entre  $0.17\text{Pa}\cdot\text{s}$  y  $0.20\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; la misma temperatura se utiliza para el mezclado.
- c) Para el caso de mezclas de pavimentación recompactadas, los materiales se calentarán a una temperatura que supere en  $3^\circ\text{C}$  a la temperatura de compactación; en caso de desconocer esta temperatura, la compactación se realizará a temperaturas entre  $120^\circ\text{C}$  y  $135^\circ\text{C}$ . Se buscará que la muestra obtenga una condición suelta para su manipulación.
- d) Una vez que se conoce el tipo de mezcla con la que se va a trabajar, se procede a preparar la mezcla, para lo cual se necesitará una cantidad de material lo suficientemente grande para preparar entre tres o cuatro especímenes.
- e) Para la elaboración de la mezcla, la masa necesaria de cada parte se pesa en recipientes separados; dicha cantidad será la suficiente para conformar una bachada que permita crear una, dos, tres o cuatro especímenes compactados de  $63.5\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$  de altura (la cantidad necesaria para esta acción será de 1200g, 2400g, 3600g o 4800g, respectivamente).
- f) Los agregados pesados se colocarán en contenedores y se ingresarán al horno con el fin de calentarnos a una temperatura superior en no más de  $28^\circ\text{C}$  a la temperatura necesaria para la mezcla de cemento asfáltico y brea y en no más de  $14^\circ\text{C}$  a la temperatura necesaria de las mezclas con asfaltos cutback.
- g) Una vez que los agregados fueron calentados, se vacían en el contenedor de la mezcla y se procede a mezclarlos por alrededor de 5 segundos. Se forma una especie de cráter con los

agregados para posteriormente agregarle el material bituminoso previamente pesado a su temperatura de trabajo (en el caso de mezclas con asfaltos cutback, se registrará la masa de los componentes de la mezcla, el bowl de mezclado y la espátula que se usará en el mezclado antes de agregar el material bituminoso). Para todos los casos, se tendrá especial cuidado en evitar pérdidas de la muestra.

- h) Se procede a mezclar los agregados y el material bituminoso de manera rápida, obteniendo una mezcla homogénea, con todas las partículas cubiertas de material bituminoso en un período de tiempo de 60 segundos en el caso de bachadas simples y 120 segundos en el caso de las bachadas de especímenes múltiples.
- i) En el caso de las bachadas simples, deberán ser colocadas dentro del horno por un tiempo entre 1 hora y 2 horas, a una temperatura que supere desde 8°C a 11°C a la temperatura de compactación; los contenedores para estas muestras deberán tener una cubierta. Si se trabaja con bachadas múltiples, la muestra se colocará en una superficie limpia y no absorbente para proceder a mezclarla a mano y posteriormente cuartearla hasta obtener la masa requerida para formar un espécimen. En el caso de los cementos asfálticos y el alquitrán, las muestras se colocarán en el horno a la temperatura indicada en los literales a) hasta f) por un período entre 1 hora y 2 horas; sus contenedores serán de metal con cubierta.
- j) La mezcla de asfalto cutback deberá pasar un proceso de curado al horno a una temperatura superior en 11°C a la de compactación hasta que el 50% del solvente desaparezca. La comprobación de esta pérdida se hará con mediciones de masa en intervalos de 15 minutos; cuando la masa se encuentre próxima a la deseada, los intervalos de medición de masa serán de tiempos menores a 10 minutos.

- k) Una vez que se cumpla con las especificaciones anteriores, se iniciará con el proceso de compactación, para lo cual, el molde y la cara del martillo de compactación deberán estar limpios y se deberán calentar a una temperatura entre 90°C y 150°C, lo cual puede lograrse con agua hirviendo o con el horno.
- l) En la base del molde se colocará un papel no absorbente cuyas dimensiones serán las mismas que dicha base. Se procede a colocar la mezcla en el molde chuseándola por 15 ocasiones con una espátula calentada alrededor del perímetro del molde y por 10 ocasiones más en el interior. Un nuevo papel no absorbente se colocará en la parte superior de la mezcla. Se deberá verificar que la temperatura de la mezcla antes de su compactación cumpla con lo especificado anteriormente.
- m) Colocar el molde encima del pedestal de compactación y sujetarlo. Aplicar los golpes necesarios con el martillo de compactación para posteriormente remover la placa base y el anillo (o collar), voltear el molde y ensamblarlo nuevamente para aplicar el mismo número de golpes (en la otra superficie de la muestra) aplicados anteriormente. Remover por segunda ocasión el collar y la placa base.
- n) Se permitirá enfriar a la muestra compactada (si se desea, se puede sumergir en agua fría la muestra colocada en el interior de una funda plástica) para posteriormente retirarla del molde (para retirar la muestra podrá usarse agua tibia con el fin de que el molde se caliente y se evite modificaciones en la muestra). Transportar el espécimen a una superficie limpia y plana y dejarlo reposar hasta que alcance la temperatura del ambiente.
- o) Para la determinación de la estabilidad y flujo, se requiere el ensayo de al menos 3 especímenes, los cuales serán idénticos en: tipo de agregado, calidad, gradación, calidad y contenido de polvo mineral y ligante. Así mismo, su preparación será idéntica.

- p) Una vez compactados, los ejemplares deberán enfriarse hasta que obtengan la temperatura del ambiente, para lo cual se colocarán sobre una superficie suave y plana.
- q) Se procede con la determinación del peso específico de Bulk para cada muestra compactada y posteriormente se mide su espesor. Estas determinaciones y demás acciones sobre las muestras, deberán ejecutarse dentro de las 24 horas contadas a partir de la finalización de la compactación.
- r) Sumergir los especímenes en agua por un período de 30 a 40 minutos o colocarlos al horno por un tiempo entre 120 y 130 minutos siguiendo las siguientes condiciones: para cemento asfáltico, la temperatura será de  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y para alquitrán y caucho se requiere  $38^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Para el caso de las muestras construidas con asfalto líquido, se deberán mantener a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por un período de tiempo entre 120 y 130 minutos mediante un baño de aire.
- s) La preparación del espécimen antes de ejecutar las pruebas de estabilidad y flujo, consistirá en mantener limpias las líneas guía y el interior de las superficies del cabezal para posteriormente lubricar dichas líneas guía con el fin de permitir el deslizamiento entre éstas y el segmento superior del cabezal (el cabezal deberá tener una temperatura entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $40^{\circ}\text{C}$  y estar libre de agua para la ejecución del ensayo).
- t) Tomar una muestra del baño de agua (removiendo el exceso de agua), del horno o del baño de aire y ubicarla en el segmento inferior del cabezal para posteriormente sobre la muestra colocar el segmento superior del cabezal e inmediatamente sobre este, el conjunto de la máquina de carga.

- u) Para los casos en los que se use un flujómetro, éste se coloca sobre una de las líneas guías, se ajusta su lectura a cero y se mantiene fijamente pegado al segmento superior del cabezal durante la ejecución del ensayo.
- v) La ejecución del ensayo deberá ser rápida, de tal manera que entre la separación de la muestra del baño de agua, horno o baño de aire hasta la determinación de la carga máxima, no transcurra un periodo de tiempo superior a 30 segundos; para esto, la carga deberá ser aplicada a una velocidad de 50mm/min. La aplicación de la carga termina cuando la lectura indique una disminución de la misma.
- w) La carga máxima obtenida se registra o se convierte a estabilidad Marshall. Justo al momento en el que la carga comienza a disminuir, el flujómetro se libera o se registra la lectura del micrómetro.
- x) Expresar el valor de flujo, el cual generalmente se obtiene en unidades de 0.25mm.

### 3.2.10.5 Cálculos

Cuando una muestra es compacta en laboratorio, el cilindro obtenido deberá tener un espesor de  $63.5\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ ; se deberá realizar una corrección en función del volumen; de igual manera cuando se obtienen muestras de campo mediante la extracción de núcleos; los factores de corrección se presentan en la siguiente tabla y se aplican en la fórmula de cálculo de estabilidad:

$$A = B * C$$

En donde:

*A* – estabilidad corregida

*B* – medida de estabilidad (carga)

*C* – razón de correlación (valor obtenido de la tabla que se presenta a continuación)

Volumen del espécimen, en cm <sup>3</sup>	Espesor del espécimen		Razón de la correlación
	mm	plg	
200-213	25.4	1	5.56
214-225	27.0	1 1/16	5.00
226-237	28.6	1 1/8	4.5
238-250	30.2	1 3/16	4.17
251-264	31.8	1 1/4	3.85
265-276	33.3	1 5/16	3.57
277-289	34.9	1 3/8	3.33
290-301	36.5	1 7/16	3.03
302-316	38.1	1 1/2	2.78
317-328	39.7	1 9/16	2.50
329-340	41.3	1 5/8	2.27
341-353	42.9	1 11/16	2.08
354-367	44.4	1 3/4	1.92
368-379	46.0	1 13/16	1.79
380-392	47.6	1 7/8	1.67
393-405	49.2	1 15/16	1.56
406-420	50.8	2	1.47
421-431	52.4	2 1/16	1.39
432-443	54.0	2 1/8	1.32
444-456	55.6	2 3/16	1.25
457-470	57.2	2 1/4	1.19
471-482	58.7	2 5/16	1.14
483-495	60.3	2 3/8	1.09
496-508	61.9	2 7/16	1.04
509-522	63.5	2 1/2	1.00
523-535	65.1	2 9/16	0.96
536-546	66.7	2 5/8	0.93
547-559	68.3	2 11/16	0.89
560-573	69.8	2 3/4	0.86
574-585	71.4	2 13/16	0.83
586-598	73.0	2 7/8	0.81
599-610	74.6	2 15/16	0.78
611-626	76.2	3	0.76

Nota: La relación volumen-espesor se basa en probetas de diámetro de 101.6mm (4plg)

Tabla 56. Factores de estabilidad de corrección. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)

### 3.2.10.6 Informe de resultados

Este informe contendrá los siguientes datos: identificación de la muestra, fecha y lugar de muestreo, fecha de ensayo, nombre del laboratorio, laboratorista, tipo de betún utilizado, lugar de obtención del betún, grado del material bituminoso, curado aplicado, tiempo de curado, martillo usado, número de golpes en cada lado, temperaturas, peso específico, dimensiones de los especímenes y valores de estabilidad y flujo Marshall.

### 3.2.11 Desgaste de los Ángeles

#### 3.2.11.1 Generalidades

Cuando se pretendan fabricar superficies de rodadura de hormigón asfáltico en caliente, sus agregados deberán someterse también al ensayo de desgaste de los Ángeles con el fin de determinar su calidad. En función del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), este ensayo se realizará una vez por cada 1000m<sup>3</sup> de agregado utilizado en la mezcla. Las mezclas asfálticas fabricadas in situ, se ensayarán a razón de una vez por cada 5000m<sup>3</sup> o fracción de material.

Si de tratamientos superficiales se trata, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que los ensayos se realizarán una vez por cada 1000m<sup>3</sup> o fracción de muestra, así como también indica que si de hormigón asfáltico en caliente se trata, el ensayo se ejecutará una vez por cada 3000m<sup>3</sup> o fracción de material.

En cuanto a las subbases de suelo estabilizado con cal, las indicaciones del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) dictan que se ensayarán en la cantera, una muestra por cada 2000m<sup>3</sup> de material.; se indica también que para el caso de las subbases granulares se realizará un ensayo por cada 5000m<sup>3</sup> o fracción de material.

De igual manera que para el caso de las subbases granulares, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que para el caso de las bases granulares, se realizará un ensayo por cada 5000m<sup>3</sup> o fracción de material.

La ejecución de este ensayo según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), se basa en la norma NTE INEN 860 para agregados cuyas partículas son de dimensiones menores a

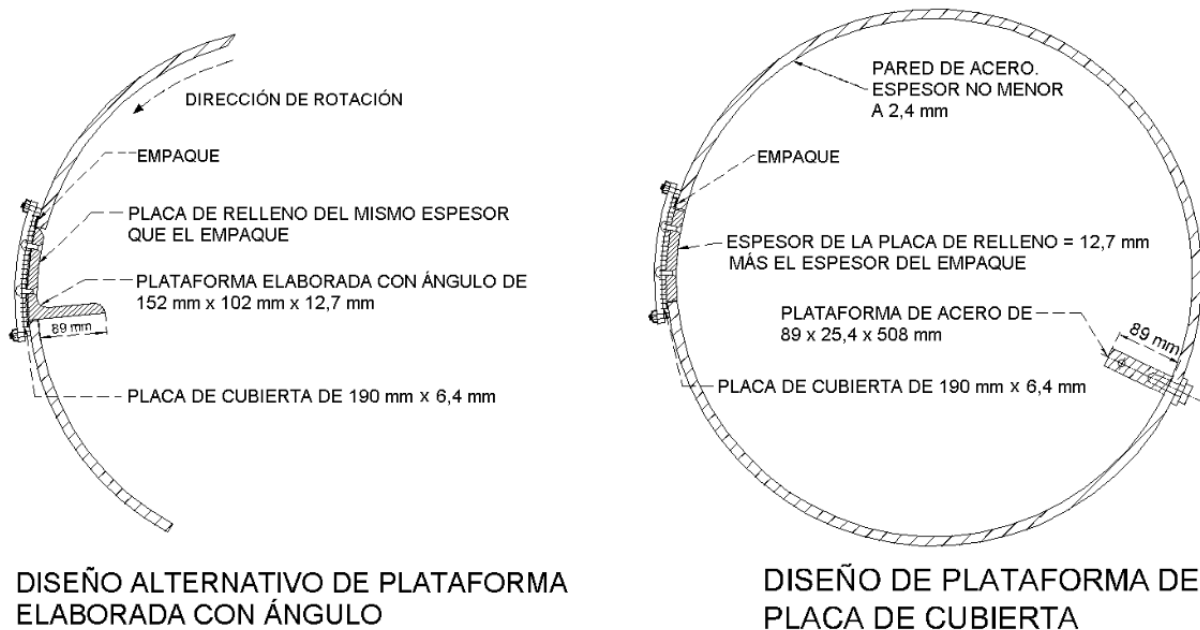
37.5mm; para el caso del agregado grueso cuyas partículas tienen dimensiones mayores a 19.5mm, se aplicará la norma NTE INEN 861.

El ensayo se basa en la pérdida de masa del agregado por desgaste e impacto a través de la máquina de los Ángeles, encontrando un valor que indica la calidad relativa de los áridos. Dichos áridos pueden ser gravas, piedras naturales y materiales obtenidos por trituración.

### **3.2.11.2 Equipos**

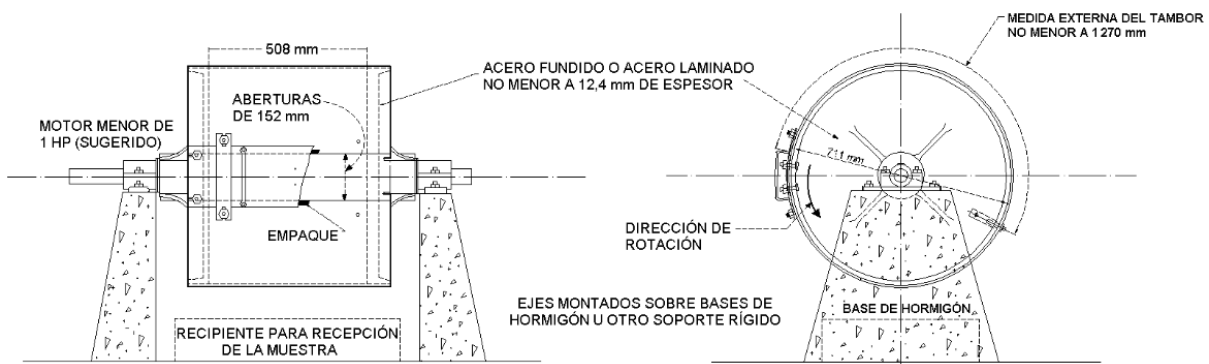
Para la ejecución de este ensayo se requiere el uso de varios equipos según (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), tanto para los agregados con dimensiones menores de 37.5mm como para los agregados de tamaños mayores a 19.5mm:

- **Máquina de los Ángeles:** descrita en el numeral 2.1.3 del presente documento. Su diseño deberá cumplir con lo descrito gráficamente a continuación:



**DISEÑO ALTERNATIVO DE PLATAFORMA ELABORADA CON ÁNGULO**

**DISEÑO DE PLATAFORMA DE PLACA DE CUBIERTA**



*Ilustración 25. Requisitos que deberá cubrir la máquina de los Ángeles. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)*

- **Tamices:** sus aberturas cumplirán con lo descrito en la norma NTE INEN 154:2013.
- **Balanza:** su precisión será por lo menos igual al 0.1% de la carga de ensayo.
- **Esferas de acero:** Describas conjuntamente con la máquina de los ángeles en el numeral 2.1.3.
- **Horno:** su capacidad deberá permitirle alcanzar temperaturas constantes de 110°C ±5°C.

### 3.2.11.3 Muestreo

Para que en los resultados del ensayo (aplicando tanto la norma NTE INEN 860:2011 como la norma NTE INEN 861:2011) se obtengan datos confiables, se deberá realizar un muestreo de acuerdo a la norma NTE INEN 695 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010); dicha norma se describe en el numeral 3.2.1.3 del presente documento.

Una vez que la muestra haya sido tomada, es necesario secarla al horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , con el fin de lograr que su masa se presente constante luego de varios pesajes. Se procederá a separar el espécimen por fracciones en función del tamaño de la partícula para posteriormente combinarlas formando la graduación presentada en la tabla a continuación. La masa del espécimen se deberá registrar antes de iniciado el ensayo:

Tamaño de las aberturas de tamiz de aberturas cuadradas (mm)		Masa indicada por tamaños (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37.5	25.0	1250±25	-	-	-
25.0	19.0	1250±25	-	-	-
19.0	12.5	1250±10	2500±10	-	-
12.5	9.5	1250±10	2500±10	-	-
9.5	6.3	-	-	2500±10	-
6.3	4.75	-	-	2500±10	-
4.75	2.36	-	-	-	5000±10
	<b>Total</b>	5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Tabla 57. Graduación de muestras para ensayo de desgaste de los Ángeles para partículas de dimensiones inferiores a 37.5mm. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Para el caso en el que se requiera la aplicación de la norma NTE INEN 861:2011 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), es decir, cuando el ensayo se vaya a realizar sobre agregado grueso cuyas partículas sean de dimensiones superiores a 19mm, la tabla que se debe seguir será la siguiente:

Tamaño de las aberturas de tamiz de aberturas cuadradas (mm)		Masa indicada por tamaños (g)		
		Gradación		
Pasante de	Retenido en	1	2	3
75	63	2500±50	-	-
63	50	2500±50	-	-
50	37.5	5000±50	5000±50	-
37.5	25.0	-	5000±25	5000±25
25.0	19.0	-	-	5000±25
<b>Total</b>		10000±100	10000±75	10000±50

Tabla 58. Graduación de muestras para ensayo de desgaste de los Ángeles para partículas de dimensiones superiores a 19mm. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

### 3.2.11.4 Ensayo

Básicamente, el desarrollo del ensayo definido en la norma NTE INEN 860:2011 según (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) consiste en:

- Registrar la masa inicial de la muestra a ser ensayada y establecer el número de esferas que se utilizarán en función de la gradación de la muestra tal como se indica a continuación:

Gradación	Número de esferas	Masa de carga (g)
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

Tabla 59. Determinación de la carga para el ensayo de desgaste de los Ángeles en función de la gradación de la muestra. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

- Colocar de la muestra previamente tomada conjuntamente con las esferas necesarias dentro de la máquina de los Ángeles.
- Activar la máquina de los Ángeles y hacerla girar un número de 500 revoluciones a una velocidad entre 30r/min y 33r/min. Se debe tener en cuenta que la uniformidad de la muestra puede ser comprobada luego de las 100 primeras revoluciones, determinando la pérdida del material en seco sin lavar mediante el tamizado a través del tamiz de 1.70mm; la dureza uniforme del material se determina mediante la relación entre la pérdida luego de las 100 revoluciones y la pérdida después de las 500, valor que no debería ser mayor a 0.20. Si se

acuerda realizar esta comprobación, habrá que tener cuidado de no perder absolutamente ninguna parte de la muestra (incluyendo el polvo de fractura) y regresar todo el material a la máquina para concluir con las 400 revoluciones restantes.

- d) Una vez concluidas las 500 revoluciones, separar de manera preliminar las partículas de tamaños superiores al tamiz de 1.70mm. Posteriormente pasar el material restante a través del tamiz de 1.70mm.
- e) Proceder con el lavado de la muestra resultante, es decir, de todo el material que no atraviesa el tamiz de 1.70mm.
- f) El material resultante se somete a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa final sea constante<sup>16</sup>.
- g) Pesar y registrar la masa final con una aproximación de 1g.

Para el caso de la aplicación de la norma NTE INEN 861:2011 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), se seguirán los siguientes pasos:

- a) Colocar la muestra previamente pesada en función de la gradación dentro de la máquina de los Ángeles conjuntamente con las esferas de acero<sup>17</sup>.
- b) Poner en funcionamiento la máquina de los ángeles para que genere un total de 1000 revoluciones a una velocidad entre 30r/min y 33r/min. Se tendrá en cuenta que se puede determinar la uniformidad de la muestra mediante la correlación entre la pérdida luego de las 200 revoluciones y la pérdida luego de las 1000 revoluciones tamizando en seco el material a través del tamiz de 1.70mm; dicha relación no excederá a 0.2 si el material

---

<sup>16</sup> Si se observa que luego del ensayo, la muestra no contiene recubrimientos adherentes ni polvo, el lavado descrito en el literal (e) y el secado del literal (f), no son completamente necesarios. En el caso de que el ensayo que se realiza sea de arbitraje, olvidar la presente nota y ejecutar todos los pasos descritos en el numeral 3.2.11.4.

<sup>17</sup> La carga de las esferas de acero deberá ser de  $5000 \pm 25\text{g}$ , pudiendo conseguir esto son una mezcla de esferas de diferentes masas.

ensayado es de dureza uniforme. Se tendrá especial cuidado en regresar a la máquina de los Ángeles todas las partículas de la muestra luego de que se haya determinado la pérdida a las 200 revoluciones para que los resultados finales del ensayo sean verídicos.

- c) En el caso en el que se haya detenido la máquina a las 200 revoluciones para determinar el dato mencionado en el literal (b), activarla nuevamente una vez que el material haya regresado a dicha máquina para completar las 1000 revoluciones. Completado esto, descargar el material de la máquina de los Ángeles.
- d) Separar de manera preliminar de la muestra, las partículas cuyas dimensiones sean superiores a la abertura del tamiz de 1.70mm.
- e) Tamizar la porción restante (es decir, la porción más fina) de la muestra a través del tamiz de 1.70mm.
- f) Lavar y secar<sup>18</sup> al horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  las partículas de dimensiones superiores a 1.70mm de la muestra hasta que se obtenga una masa constante determinada con aproximación de 1g.

### 3.2.11.5 Cálculos

Los cálculos serán los mismos para la determinación del desgaste de los Ángeles a través de la aplicación de la norma NTE INEN 860:2011 o NTE INEN 861:2011.

Una vez desarrollado el ensayo, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), indica que se deberá proceder con el cálculo del porcentaje de degradación (pérdida de masa) con la aplicación de la ecuación presentada a continuación:

---

<sup>18</sup> A menos que el ensayo realizado sea de arbitraje, cuando se observe que el árido no contiene recubrimientos adherentes ni polvo, no será necesario lavar ni secar al horno la muestra.

$$D = \frac{B - C}{B} * 100$$

En donde:

$D$  – valor de la degradación, en %.

$B$  – masa inicial de la muestra ensayada, en g.

$C$  – masa de la muestra retenida en el tamiz de 1.70mm después del ensayo, en g.

### **3.2.11.6 Informe de resultados**

Los resultados del ensayo ejecutado bajo la aplicación de la norma NTE INEN 860:2011 o NTE INEN 861:2011, se presentarán en un informe que deberá tener los datos mencionados a continuación.

Para el registro de datos del ensayo será preciso identificar datos como: Fecha de muestreo, fecha de ejecución del ensayo, nombre del laboratorio y laboratorista que efectuó el ensayo, identificación de la fuente conjuntamente con datos que permitan identificar la muestra (tipo, tamaño máximo nominal del árido, etc.), gradación utilizada en el ensayo en función de la tabla 50 del presente documento, valor calculado de degradación con aproximación de 1% y, finalmente todos los detalles que puedan ser de utilidad para el lector del informe.

## 3.2.12 Densidad

### 3.2.12.1 Generalidades

El cálculo de las densidades se basa en la norma NTE INEN 856:2010 y NTE INEN 857:2010.

Para el caso de los áridos finos, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) indica que la densidad relativa o gravedad específica se utiliza para: determinación de volumen ocupado por un árido en una mezcla, cálculo de vacíos entre partículas de un agregado, cálculo de la humedad superficial del agregado (cuando se utiliza la densidad relativa SSS) por desplazamiento de agua. Si el árido está húmedo es necesario realizar los respectivos análisis con la densidad relativa; si el árido está seco o se supone seco, se utiliza la densidad relativa SH.

En lo que a áridos gruesos se refiere, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) indica que el uso de la densidad relativa sirve para: determinar el volumen que ocupa el árido en una mezcla y calcular los vacíos entre partículas. La densidad relativa SSS se usa cuando el agregado analizado se encuentra húmedo, o en otras palabras, cuando el agregado alcanza su absorción; en caso de que los cálculos a realizarse, sean sobre el agregado seco o se asuma que el agregado está seco, se utilizará la densidad relativa SH.

Tanto en agregados finos como en agregados gruesos, la densidad aparente y la densidad relativa aparente se estudian sobre el material sólido, es decir, no se incluyen los vacíos existentes entre partículas. En (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) indica también que para estos dos tipos de agregados, el cálculo de la absorción servirá para identificar los cambios de masa que el agua absorbida provoca en las partículas, comparando este valor con la condición seca del agregado. En caso de que en un agregado haya presentado contacto constante con el agua y presente humedad superficial, se puede determinar su humedad libre al restar el valor de absorción

al valor total de humedad. La absorción se determina a través de inmersión de los agregados en agua por un periodo de 24 horas, teniendo en cuenta que para el caso de los áridos livianos, éstos pudieran no llegar a la saturación con el transcurso de este tiempo, es decir, estos ensayos no son aptos para agregados livianos.

Cuando se trate de hormigón asfáltico en caliente usado a modo de superficies de rodadura, su densidad se analizará una vez cada 250m longitudinales de construcción, directamente sobre la pista compactada; es así como lo especifica el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su norma NEVI-12 volumen 3.

Las superficies de agregados no tratados deberán cumplir con características de densidad máxima y humedad óptima; para el caso de la densidad en obra, esta será igual o mayor al 95% de la densidad obtenida en laboratorio

La base de agregados, en función de lo descrito por (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), se someterá a ensayos de densidad seca máxima una vez al día durante la jornada laboral. Luego de la colocación del material en pista, se deberá compactar hasta que se obtenga como mínimo el 100% de la densidad seca máxima

La densidad seca máxima de las subbases de grava se verificará en función de las disposiciones de la Norma Ecuatoriana Vial del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), la cual en su volumen 3 indica que las muestras se tomarán y ensayarán a razón de una por cada día de trabajo.

Al hablar de las subbases de grava y bases granulares, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) indica que su control de compactación se realiza por medio de una comparación entre la densidad seca del terreno promedio con la densidad máxima obtenida de una muestra representativa del mismo material de la siguiente manera:

Si  $D_m - (k * s) \geq 0.95D_e$  Se acepta

Si  $D_m - (k * s) < 0.95D_e$  Se rechaza

$$D_m = \frac{\sum D_i}{n}$$

En donde:

$D_m$  – valor promedio de los resultados de los ensayos de densidad seca en el terreno

$D_e$  – densidad seca máxima

$D_i$  – resultado de un ensayo

$k$  – factor de confianza en el que con una probabilidad de 90% se encuentra la densidad seca en el terreno.

$s$  – desviación estándar

$n$  – número de ensayos de densidad seca en el terreno que integran la muestra

<b>n</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>k</b>	0.685	0.602	0.544	0.500	0.465	0.437

Tabla 60. Valores del factor  $k$ . Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Este tipo de subbase, deberá ser compactado de tal manera que se logre obtener al menos el 100% de la densidad seca máxima obtenida en laboratorio.

Al hablar de mezclas de hormigón asfáltico en caliente, el ensayo de densidad se realizará en la pista compactada con el fin de identificar su calidad; dicho ensayo se efectuará a razón de una vez por cada 250m longitudinales. Según el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), la densidad media del tramo ( $D_m$ ) deberá ser igual o superior al 98% de la densidad obtenida en laboratorio con el ensayo Marshall; se cumplirá también con la relación entre la densidad de cada

muestra individual ( $D_i$ ) y la densidad media del tramo ( $D_m$ ), teniendo que ser esta primera igual o mayor al 97% que la segunda.

La ejecución de ensayos de densidad se determina a través de las normas NTE INEN 856:2010 si se trata de los áridos finos y la norma NTE INEN 857:2010 para los áridos gruesos.

Para las dos normas mencionadas, el objetivo y alcance son los mismos, variando únicamente en el tamaño de los agregados que cada una pretende analizar. La principal aplicación de estos métodos consiste en el establecimiento de: la densidad promedio de un espécimen de agregado, no teniendo en cuenta el volumen de vacíos, la densidad relativa y la absorción del árido.

Según el proceso que se utiliza para la determinación de la densidad, ésta podrá ser: seca al horno (SH)<sup>19</sup>, saturada superficialmente seca (SSS)<sup>20</sup> o densidad aparente.

### 3.2.12.2 Equipos

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) especifica que para el caso de los áridos finos, el ensayo se ejecuta con la utilización de los siguientes equipos:

- a) **Balanza:** su capacidad de carga deberá ser igual o superior a 1kg, con escala de medición de 0.1g o menor y precisión de 0.1% de la masa de la muestra ensayada.
- b) **Picnómetro:** puede ser un matraz u otro contenedor que permita la introducción sencilla de la muestra y la lectura del volumen de la misma con precisión de  $\pm 0.1\text{cm}^3$ . El volumen del contenedor será como mínimo 50% mayor que el requerido para la muestra de ensayo.
- c) **Matraz:** con capacidad para una muestra de aproximadamente 55g

---

<sup>19</sup> Se determina luego de secar la muestra.

<sup>20</sup> Se determina luego de que la muestra haya sido saturada con agua.

- d) **Molde y compactador para ensayo de humedad superficial:** molde metálico en forma de cono truncado; su diámetro interno superior será de  $40\text{mm} \pm 3\text{mm}$  y su diámetro interno inferior será  $90\text{mm} \pm 3\text{mm}$ ; su altura será de  $75\text{mm} \pm 3\text{mm}$  y el espesor de sus paredes será de  $0.8\text{mm}$  como mínimo. El compactador será de metal y tendrá una masa de  $340\text{g} \pm 15\text{g}$  y su cara compactadora será circular y plana, con un diámetro de  $25\text{mm} \pm 3\text{mm}$ .
- e) **Horno:** deberá lograr alcanzar una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ; su tamaño deberá ser el adecuado para colocar la muestra en su interior.

Ahora, para el caso de los áridos gruesos, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) indica que el presente ensayo se llevará a cabo con los siguientes insumos:

- a) **Balanza:** su aproximación será de al menos  $0.0.5\%$  de la masa de la muestra o de  $0.5\text{g}$  (la mayor). Deberá permitir la suspensión de la muestra en agua en su respectivo recipiente desde el centro de la plataforma de la balanza.
- b) **Recipiente para la muestra:** canasta de alambre con abertura de  $3.35\text{mm}$  o malla más fina; su capacidad será estará entre  $4$  y  $7$  litros para un árido de tamaño máximo nominal igual a  $37.5\text{mm}$  o menor; la canasta podrá ser más grande, es decir, su tamaño estará en función del tamaño del árido.
- c) **Tanque de agua:** tanque hermético para colocar dentro de él, el recipiente con la muestra de agregado.
- d) **Tamices:** todos los que sean necesarios.
- e) **Horno:** su tamaño deberá permitir el ingreso de la muestra al mismo y su temperatura tendrá la capacidad de llegar por lo menos hasta  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.12.3 Muestreo

El muestreo de árido grueso y árido fino, cumplirá con lo establecido por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) en la norma NTE INEN 695:2010, lo cual se describe en el numeral 3.2.1.3 del presente documento.

3.2.12.3.a. Para el caso de los agregados finos, la muestra se preparará de la siguiente manera según (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010):

- a) La muestra será ubicada en un recipiente y secada a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa se presente invariable.
- b) Se enfría el espécimen hasta aproximadamente  $50^{\circ}\text{C}$ , es decir, hasta que pueda ser manipulada.
- c) Añadir agua a la muestra por sumersión o añadidura de esta hasta lograr al menos 6% de humedad en el agregado; permitir a la muestra reposar por 24 horas  $\pm 4$  horas.
- d) Transcurrido el tiempo indicado, regar el exceso de agua de la bandeja evitando que los finos se pierdan, para posteriormente tender el espécimen en un área plana no absorbente sobre la cual, deberá circular una corriente de aire delicada y tibia; el espécimen deberá moverse continuamente para lograr un secado homogéneo. El objetivo de este punto es lograr la condición de flujo libre en la muestra.
- e) Mientras en la muestra se observe contenido de agua superficial, se deberá realizar el primer “ensayo de determinación de humedad superficial”<sup>21</sup>. Luego de esto, la muestra se continuará secando mediante agitación constante, realizando nuevos ensayos de

---

<sup>21</sup> Revisar el punto 3.2.12.4 del presente documento. Si luego de realizar la primera prueba de cálculo de humedad superficial, los resultados dictan que dicha humedad está ausente de la muestra, significa que la muestra se secó hasta un punto superior a la condición saturada superficialmente seca, por lo cual será necesario mezclar la muestra con cierta cantidad de agua, hasta cubrirla, dejándola reposar durante 30 minutos para poder reanudar con el proceso de secado y ensayos de humedad superficial.

determinación de humedad superficial en intervalos similares hasta conseguir que las partículas del agregado lleguen a la condición de superficie seca.

- f) La condición saturada superficialmente seca de algunos áridos cuyas partículas tienen forma angular en su gran mayoría, se obtiene realizando el ensayo del cono truncado (el cono truncado se coloca sobre una superficie lisa con la parte ancha asentada sobre la misma) y observando que al retirar el cono, una diminuta porción del espécimen se derrumba.

g)

3.2.12.3.b. Para los áridos gruesos, el muestreo seguirá los siguientes pasos según (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010):

- a) Una vez tomada la muestra, ésta se mezclará y se reducirá hasta obtener una cantidad adecuada para el ensayo, desechando todo el material que atraviesa por el tamiz N°4 por medio de un tamizado en seco<sup>22</sup>.
- b) Lavar la muestra hasta lograr quitar el polvo o todo material que se encuentre cubriendo el área de las partículas de agregado.
- c) Seleccionar la masa de la muestra según la siguiente tabla, sabiendo que los agregados gruesos pueden ser ensayados en fracciones en función de su tamaño:

---

<sup>22</sup> Si se observa una gran presencia de material pasante del tamiz N°4, se utilizará el tamiz N°8 en su lugar y de manera alternativa, se separará y se ensayará el material que atraviesa el tamiz N°4 de acuerdo a lo descrito por NTE INEN 856:2010.

Tamaño máximo nominal, en mm	Masa mínima de la muestra para ensayo, en kg
12.5 o menor	2
19.0	3
25.0	4
37.5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
125	75

Tabla 61. Masa mínima para determinación de densidades del agregado grueso. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010)

- d) Se tendrá en cuenta que si una cantidad superior al 15% del espécimen, es contenida en la malla de 37.5mm, esta parte de la muestra se analizará en una o más partes separadas, partiendo los ensayos desde la fracción más pequeña.
- e) Para el ensayo de muestras fraccionadas, se tendrá en cuenta que la masa mínima deberá formarse por la diferencia entre las masas señaladas para los tamaños máximo y mínimo de la fracción. Se deberá también realizar un análisis granulométrico a la muestra, ignorando el material más fino que 4.75mm o 2.36mm (ver nota 17)

#### 3.2.12.4 Ensayo

En el numeral 3.2.12.3.a. se mencionó la necesidad de realizar el ensayo de determinación de humedad superficial para el caso de los agregados finos; según lo descrito por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) el ensayo consiste en lo siguiente:

- a) El molde (como truncado) se colocará sobre una superficie lisa, firme y no absorbente, colocando la abertura mayor del cono sobre dicha superficie.
- b) Dentro del molde, se colocará una porción de la muestra (hasta llenarlo), sin presionarla ni compactarla de alguna manera (muestra suelta); en la parte superior se colocará material adicional asegurando que el molde quede firme.

- c) Se procede con la compactación del agregado fino con 25 golpes suaves del compactador, permitiendo que este caiga desde una elevación de aproximadamente 5mm sobre la superficie del agregado.
- d) Se ajustará la altura de inicio con la altura de la muestra luego de cada golpe y se distribuye sobre la superficie.
- e) Se limpiarán los alrededores del como truncado con el fin de remover las partículas de muestra que hayan caído al realizar el ensayo.
- f) Se procede a levantar el molde de manera vertical. Se podrá observar que la muestra se quedará firme o se desmorona; el desmoronamiento indica que el espécimen alcanzó el estado de superficie seca.

Continuando con esta parte, se describe el procedimiento plasmado en la norma NTE INEN 856:2010 para encontrar la densidad y absorción en áridos finos. Según lo mencionado por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010), se deberá aplicar uno de los dos procedimientos descritos a continuación, determinando las masas con aproximación de 0.1g:

- a) **Procedimiento gravimétrico:** se llena de manera parcial el picnómetro con agua para posteriormente introducir en el mismo una muestra de  $500g \pm 10g$  de árido fino saturado superficialmente seco y se completa aproximadamente hasta el 90% de la capacidad volumétrica del picnómetro con agua. Se agita el picnómetro de manera manual (rodando, invirtiendo y agitando el picnómetro por aproximadamente 15 a 20 minutos, eliminando las burbujas visibles de aire) o mecánica (agitando la muestra con vibración mecánica sin degradarla). Se comprueba la eliminación de todas las burbujas de aire y se ajusta la temperatura del picnómetro y su contenido a  $23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , lo cual puede realizarse con la inmersión parcial en agua y la circulación de ésta. Se prosigue con la nivelación del agua

del picnómetro hasta la marca de calibración y se determina la masa del picnómetro más la muestra y más el agua. Se retira el árido del picnómetro, Se somete a una temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa se presente sin variaciones; se enfría la muestra a temperatura ambiente por un periodo aproximado de una hora  $\pm 1/2$  hora y se determina su masa. Finalmente se registra la masa del picnómetro lleno de agua cuya temperatura será de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , hasta la marca de calibración.

- b) **Procedimiento volumétrico:** para este procedimiento, se utilizará el frasco de Le Chatelier, llenándolo con agua hasta un valor comprendido entre las marcas de  $0\text{cm}^3$  y  $1\text{cm}^3$  ubicadas en su cuello; esta lectura se tomará a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Al frasco se añadirá  $55\text{g} \pm 5\text{g}$  de agregado fino en condición saturado superficialmente seco para posteriormente taparlo. A continuación, se inclinará el frasco y se girará suavemente en círculos horizontales para lograr eliminar el aire atrapado, logrando que el mismo suba a la superficie (en caso que se observe espuma en la superficie, para su eliminación se podrá utilizar alcohol isopropílico en una pequeña cantidad, misma que será restada en la lectura final para su registro). Se registrará la lectura final del frasco más su contenido a una temperatura de  $1^{\circ}\text{C}$  respecto a la temperatura inicial. La determinación de la absorción se realiza sobre una muestra de  $500\text{g} \pm 10\text{g}$  de muestra en condición saturada superficialmente seca; para ello, el espécimen será secado hasta conseguir que la masa de la misma sea constante, logrando registrar su masa seca.

Para el caso de los agregados gruesos, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) describe el procedimiento que permite realizar ensayos de determinación de densidad en función de la norma NTE INEN 857:2010; dicho procedimiento se resume a continuación:

- a) La muestra se someterá a temperaturas de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  en un horno hasta que la masa se muestre constante.
- b) Se continúa con el enfriamiento de la muestra dejándola al ambiente por un período de tiempo entre 1 y 3 horas (si el tamaño máximo nominal de la muestra es de 37.5mm) o más tiempo (si los tamaños son mayores); el objetivo será que la temperatura de la muestra permita su manipulación, lo cual se logra haciéndola bajar hasta aproximadamente  $50^{\circ}\text{C}$ .
- c) Se procede con la sumersión del espécimen en agua a temperatura ambiente por un periodo de tiempo de 24 horas  $\pm 4$  horas.
- d) Luego de concluido el período de tiempo indicado, se retirará el espécimen del agua y se colocará sobre un paño absorbente. Se frotará el espécimen con dicho paño, lo cual permitirá eliminar el agua superficial de las partículas. Las partículas grandes pueden ser secadas de manera individual.
- e) Se procede a registrar la masa de la muestra en condición saturada superficialmente seca y las masas necesarias con una aproximación de 0.5g o 0.05% de la masa de la muestra (la mayor entre estas).
- f) Se colocará la muestra saturada superficialmente seca en el recipiente y se determinará la masa aparente en agua a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  (la muestra se sumergirá hasta cubrirla por completo); antes de esto, se deberá remover el aire atrapado por agitación del recipiente mientras la muestra se sumerge. La masa de agua desalojada por la muestra se puede establecer como el resultado de quitarle la masa de agua a la masa de aire.
- g) Se procede a secar el espécimen a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  con el fin de obtener una masa constante; posterior a esto, la muestra se enfriará por un periodo de 1 a 3 horas hasta que su manipulación sea segura.

### 3.2.12.5 Cálculos

Primeramente, se describirán los cálculos a realizar con la aplicación de la norma NTE INEN 856:2010 para áridos finos.

- a) La densidad relativa SH se calcula en condición de secado al horno. La primera fórmula se aplica cuando se utilizó un procedimiento gravimétrico y la segunda fórmula cuando se aplicó el procedimiento volumétrico:

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(SH)} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(SH)} = \frac{S_1 \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R_2 - R_1)}$$

- b) La densidad relativa SSS se calcula con la aplicación de las siguientes fórmulas, la primera cuando se utilizó el procedimiento gravimétrico y la segunda cuando se aplicó el procedimiento volumétrico:

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(SSS)} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)(SH)} = \frac{S_1}{0.9975(R_2 - R_1)}$$

- c) La densidad relativa aparente se calcula como sigue; la primera fórmula se refiere al procedimiento gravimétrico y la segunda al volumétrico:

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Densidad relativa aparente (grav. esp. aparente)} = \frac{S_1 \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R_2 - R_1) - \left[\left(\frac{S_1}{S}\right)(S - A)\right]}$$

- d) Ahora, para el caso de la densidad (SH), se especifica a continuación las fórmulas para el cálculo, primero por el proceso gravimétrico y segundo el proceso volumétrico; los resultados se obtienen en  $\text{kg/m}^3$ :

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5A}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5S_1 \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R_2 - R_1)}$$

- e) La densidad (SSS) se calcula como sigue; la primera ecuación se aplica con el procedimiento gravimétrico y la segunda con el proceso volumétrico; los resultados se obtienen en  $\text{kg/m}^3$ :

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5S}{B + S - C}$$

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5S_1}{0.9975(R_2 - R_1)}$$

- f) La densidad aparente se calcula en  $\text{kg/m}^3$  y para su determinación se aplican las siguientes fórmulas, la primera para el procedimiento gravimétrico y la segunda para el procedimiento volumétrico:

$$\text{Densidad aparente (SSS)} = \frac{997.5A}{B + A - C}$$

$$\text{Densidad aparente (SSS)} = \frac{997.5S_1 \left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R_2 - R_1) - \left[\left(\frac{S_1}{S}\right)(S - A)\right]}$$

- g) Finalmente, la absorción se calcula con la aplicación de la siguiente ecuación; el resultado se obtiene en porcentaje:

$$\text{Absorción} = \frac{(S - A)}{A} * 100$$

Las variables utilizadas en estas ecuaciones son:

$A$  – masa de la muestra seca al horno, en g

$B$  – masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración, en g

$C$  – masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración, en g

$S$  – masa de la muestra saturada superficialmente seca, en g

$S_1$  – masa de la muestra saturada superficialmente seca, en g

$R_1$  – lectura inicial del nivel de agua en el frasco de Le Chatelier, en  $\text{cm}^3$

$R_2$  – lectura final del nivel de agua en el frasco de Le Chatelier, en  $\text{cm}^3$

Ahora, para los cálculos referentes a los agregados gruesos, la norma NTE INEN 857:2010 indica que se aplicarán las siguientes fórmulas:

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)}(SH) = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)}(SSS) = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)}(SSS) = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Densidad (SH), } \text{kg/m}^3 = \frac{997.5A}{B - C}$$

$$\text{Densidad (SSS), kg/m}^3 = \frac{997.5B}{B - C}$$

$$\text{Densidad aparente, kg/m}^3 = \frac{997.5A}{A - C}$$

$$G = \frac{1}{\frac{P_1}{100G_1} + \frac{P_2}{100G_2} + \dots + \frac{P_n}{100G_n}}$$

$$\text{Absorción, \%} = \frac{B - A}{A} * 100$$

$$\text{Prom. Absorción} = \frac{P_1A_1}{(100)} + \frac{P_2A_2}{(100)} + \dots + \frac{P_nA_n}{(100)}$$

En las fórmulas anteriores se tienen las siguientes variables:

$A$  – masa en aire de la muestra seca al horno, en g

$B$  – masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca, en g

$C$  – masa aparente en agua de la muestra saturada, en g

*Prom. Absorción* – promedio de absorción, en %

$A_1, A_2, \dots, A_n$  – porcentaje de absorción para cada fracción

$P_1, P_2, \dots, P_n$  – porcentajes de la masa de cada fracción presente en la muestra original.

997.5 es un valor constante expresado en  $\text{kg/m}^3$  y que representa la densidad del agua destilada a 23°C.

Finalmente, tanto para el caso de los áridos gruesos como para los áridos finos, se pueden desarrollar interrelaciones entre densidades relativas y la absorción con las siguientes ecuaciones:

$$S_s = \left(1 + \frac{A}{100}\right) S_d$$

$$S_s = \frac{1}{\frac{1}{S_d} - \frac{A}{100}} = \frac{S_d}{1 - \frac{AS_d}{100}}$$

$$S_a = \frac{1}{\frac{1 + A/100}{S_s} - \frac{A}{100}} = \frac{S_s}{1 - \left[\frac{A}{100}(S_s - 1)\right]}$$

$$A = \left(\frac{S_s}{S_d} - 1\right) * 100$$

$$A = \left(\frac{S_a - S_s}{S_a(S_s - 1)}\right) * 100$$

En donde:

$S_d$  – densidad relativa (gravedad específica) (SH)

$S_s$  – densidad relativa (gravedad específica) (SSS)

$S_a$  – densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)

$A$  – absorción, en %

### 3.2.12.6 Informe de resultados

Tanto para el caso de los áridos gruesos como para los áridos finos, el informe de resultados deberá contener datos referentes a: fechas de muestreo y ensayo, nombre de laboratorio y laboratorista, datos referentes a identificación de la muestra y resultados de densidad y absorción.

### **3.2.13 Inmersión - Compresión**

#### **3.2.13.1 Generalidades**

El análisis de calidad de las subbases de suelo estabilizadas con cal, cumplirá con las características descritas por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en el volumen 3 de su norma, en donde se indica que los ensayos de laboratorio se realizarán con una frecuencia de dos veces por día.

Los hormigones asfálticos deberán cumplir con los requisitos mencionados en la “Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12” del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013). El análisis de compresión se realizará mediante la aplicación de la norma MTC E 518 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú: “Efecto del Agua en la Resistencia a la Compresión de Mezclas Bituminosas Compactadas”. Esta norma da la posibilidad de establecer la pérdida de resistencia a la compresión resultante de la acción del agua en mezclas bituminosas compactadas y se basa en la norma ASTM D 1075.

#### **3.2.13.2 Equipos**

Basados en (Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú, 2016), para el desarrollo del ensayo de compresión se requerirá de:

- a) Moldes para la formación de los cilindros. Su diámetro interior podrá variar de 101.6mm a 101.73mm y su altura será de 101.6mm.
- b) Pistón con capacidad de atravesar el molde, es decir, su diámetro será menor en 1.37mm al diámetro del molde.
- c) Máquina para ensayo de compresión que permita la medición de la deformación vertical; su velocidad deberá poder controlarse

- d) Horno con capacidad de llegar a temperaturas de  $200^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$
- e) Recipiente para baño por sumersión en agua de la muestra. El baño se controlará automáticamente, así como la temperatura del agua ( $25^{\circ}\text{C}$ ), misma que presentará una variación de no más de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Los recipientes serán de acero inoxidable, cobre u otro material no reactivo y el agua utilizada será destilada o tratada de tal manera que se hayan eliminado sus electrolitos. Se deberá cambiar el agua para cada ensayo.
- f) Balanza.
- g) Platos de transferencia (de vidrio u otro material no reactivo) que ayuden a prevenir la distorsión o rotura de las muestras.

### **3.2.13.3 Muestreo**

Para el desarrollo adecuado de este ensayo se deberán tener un mínimo de 6 muestras cilíndricas cuyo diámetro y altura serán de 101.6mm. Las muestras se tomarán y formarán en función de la norma MTC E 513, “Resistencia a compresión simple de mezclas asfálticas”, misma que indica que para la realización de este ensayo, los cilindros se formarán con una mezcla diseñada con aproximadamente 6% de vacíos de aire obtenidos mediante compactación. A continuación se describe la formación de cilindros mediante la aplicación de esta norma:

- a) Formar la mezcla según dicten las especificaciones de diseño y mantenerla a una temperatura superior en 3 a  $5^{\circ}\text{C}$  a la temperatura de compactación
- b) Los moldes y pistones se limpiarán con un paño y se engrasarán levemente. Los moldes deberán ser precalentados en agua (cuya temperatura esté en un punto menos al punto de ebullición) durante una hora o durante dos horas al horno con una temperatura entre  $93.3^{\circ}\text{C}$  y  $135^{\circ}\text{C}$
- c) Colocar la mezcla en el molde hasta aproximadamente la mitad

- d) Golpear por 15 ocasiones la muestra, repartiendo los golpes por toda su superficie y golpear por 10 ocasiones más de manera aleatoria.
- e) Llenar el molde con la mezcla y repetir los golpes descritos anteriormente

Las muestras (cilindros) formadas deberán dejarse enfriar al menos por 2 horas luego de su secado al horno para posteriormente establecer la gravedad específica y gravedad específica de Bulk de cada cilindro.

#### **3.2.13.4 Ensayo**

Basado en lo descrito por (Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú, 2016), el procedimiento a seguir para este ensayo será:

- a) Los seis cilindros formados como muestras para el ensayo, se dividirán en dos conjuntos de tres muestras cada uno, asegurando que la gravedad específica de cada conjunto sea prácticamente idéntica la una a la otra.
- b) El primer grupo de especímenes mantendrá una temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  a través de su almacenamiento en un baño de aire. Esta temperatura se mantendrá por un período de tiempo de al menos 4 horas para luego determinar su resistencia a la compresión.
- c) El conjunto dos de muestras se sumergirá en agua a una temperatura de  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por un período de 24 horas. Cumplido este tiempo, estos especímenes deberán colocarse en agua a  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por un período de 2 horas. Posteriormente se determina su resistencia a la compresión.
- d) Un método alternativo para el grupo dos consiste en la sumersión de los cilindros en agua a una temperatura de  $49^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por un período de 4 días. Cumplido este lapso de tiempo, se transferirán los especímenes a un nuevo baño con agua a  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por dos horas. Luego de esto de determinará la resistencia a la compresión.

El cálculo de la resistencia a la compresión se realiza de la siguiente manera según la norma MTC E 513 del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016):

- a) La muestra preparada (sin retirarla del molde) se coloca sobre el pistón de la máquina compactadora.
- b) Se genera sobre la muestra una carga inicial de 1MPa (150psi), eliminando el exceso y aplicando una carga de 20.7Mpa (3000psi) por un período de dos minutos; esta carga podrá aumentar o disminuir con el objetivo de alcanzar el porcentaje de vacíos adecuado.
- c) Logrado lo anterior, se retira la muestra cilíndrica del molde y realizarle una acción de curado por 24 horas a una temperatura de 60°C.
- d) Una vez transcurrido este período de tiempo, la muestra deberá enfriarse por 2 horas y posteriormente se los llevará hasta una temperatura de 25°C  $\pm$ 1°C mediante un baño en agua por 4 horas.
- e) Realizar la prueba de compresión en las muestras a una velocidad de 0.05mm/min\*mm de altura del cilindro. Si los cilindros tienen 101.6mm de altura, la velocidad será de 5.08mm/min.

### **3.2.13.5 Cálculos**

Según lo indicado por (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016), se deberá calcular la resistencia a la compresión del espécimen (en kPa, es decir en lb/plg<sup>2</sup>) dividiendo la carga vertical máxima que se obtuvo en la compresión del cilindro, para la superficie total de la sección transversal de la muestra ensayada. Este cálculo se realiza en las tres muestras de cada grupo de cilindros, promediando los resultados para conseguir la resistencia a la compresión final.

Se deberán calcular el índice de resistencia retenida, expresado en porcentaje; este valor indica el daño que el agua puede causar a la muestra luego de su inmersión. Para esto se aplicará la siguiente ecuación:

$$\text{índice de resistencia retenida, \%} = \left( \frac{S_2}{S_1} \right) * 100$$

En donde:

$S_1$  – resistencia a la compresión de especímenes secos (grupo 1)

$S_2$  – resistencia a la compresión de especímenes sumergidos (grupo 2)

### **3.2.13.6 Informe de resultados**

Los datos obtenidos con la ejecución del ensayo se presentarán conjuntamente con los datos pertinentes que permitan identificar por completo las muestras ensayadas (altura nominal y diámetro del espécimen, mezcla, porcentaje de vacíos, etc.); se registrarán las fechas de muestreo y ensayo, nombres de laboratorio y laboratorista, entre otros datos que se crean necesarios.

### 3.2.14 Compactación

#### 3.2.14.1 Generalidades

El ensayo de compactación para las subbases de suelo estabilizado con cal se realizará a razón de una vez por cada 250m<sup>3</sup> de material; así lo indica el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en su Norma Ecuatoriana Vial, volumen 3.

Las mezclas de agregados de las capas de rodadura de mezclas asfálticas en caliente, deberán pasar por compactación en función de la clase de la mezcla, variando los mismos entre 75, 50 y 50 para las clases de mezcla tipo A, B y C, respectivamente. Para el ensayo de compactación, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017) recomienda la utilización del método proctor modificado, mismo que se describe en la norma ASTM D-1557. El ensayo de compactación permite determinar la resistencia a la durabilidad, absorción de humedad y resistencia a la compresión de una muestra a través de la relación entre su humedad y peso específico.

Tal como lo explica (ASTM International, 1991), este ensayo se puede aplicar para cuatro métodos:

Método	Ø de molde	Capacidad de molde	Se ensaya:	Cantidad
A	101.6mm (4plg)	944cm <sup>3</sup> ±11cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz N°4	11kg (25lb)
B	152.4mm (6plg)	2124cm <sup>3</sup> ±25cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz N°4	23kg (50lb)
C	152.4mm (6plg)	2124cm <sup>3</sup> ±25cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz de 19mm (3/4plg)	23kg (50lb)
D	152.4mm (6plg)	2124cm <sup>3</sup> ±25cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz de 19mm (3/4plg), corregido por material que retiene el tamiz de 19mm (3/4plg)	23kg (50lb)

Tabla 62. Métodos de ensayo de compactación. Fuente: (ASTM International, 1991)

Estos métodos usados en laboratorios, cuando la muestra no tiene drenaje libre logran relacionar adecuadamente el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima.

### 3.2.14.2 Equipos

Tal como lo dicta (ASTM International, 1991), para que el ensayo se desarrolle adecuadamente, se utilizarán los siguientes equipos e insumos:

- a) **Moldes:** cilíndricos y rígidos; deberán cumplir con las características especificadas en el numeral anterior. Tendrán un plato base y una extensión de collar ensamblados; dicho collar tendrá una altura aproximada de 50.8mm (2plg) y en algunos casos tendrá una sección sobresaliente en forma de embudo con mínimo 19mm (3/4plg) de sección cilíndrica recta debajo de éste. Será necesario registrar las dimensiones del diámetro y altura internas del molde con el fin de calcular su volumen; las medidas del diámetro se tomarán por seis ocasiones y las de altura por tres, promediando las mismas para el posterior cálculo del volumen con aproximación de 0.02mm (0.001plg). Los moldes requerirán calibración de su volumen luego de cada 1000 veces de uso. Otra manera de determinar el volumen será con el uso de agua, determinando la cantidad necesaria para llenar el molde, corrigiendo el volumen de agua por gramo de acuerdo a la temperatura del agua de la siguiente manera:

Temperatura	Volumen de agua
12°C	1.00048 ml/g
14°C	1.00073 ml/g
16°C	1.00103 ml/g
18°C	1.00138 ml/g
20°C	1.00177 ml/g
22°C	1.00221 ml/g
24°C	1.00320 ml/g
26°C	1.00368 ml/g
28°C	1.00375 ml/g
30°C	1.00435 ml/g
32°C	1.00497 ml/g

Tabla 63. Volumen de agua por gramo en función de la temperatura del agua para calibración de molde. Fuente: (ASTM International, 1991)

- b) **Martillo:** manual o mecánico con una masa de  $4.57\text{kg} \pm 0.01\text{kg}$  ( $10\text{lb} \pm 0.02\text{lb}$ ). Para el caso del martillo manual, su uso se basará en la caída libre del mismo desde una altura de  $457.2\text{mm} \pm 1.6\text{mm}$  ( $18.0\text{plg} \pm 1/16\text{plg}$ ), medida desde la superficie de la muestra dentro del molde. Su cara inferior tendrá una superficie plana cuyo diámetro será de  $50.8\text{mm} \pm 0.13\text{mm}$  ( $2.0\text{plg} \pm 0.0005\text{plg}$ ). el martillo atravesará por un tubo con ocho orificios<sup>23</sup>, mismo que le servirá de guía y permitirá su caída sin restricciones. En cuanto al martillo mecánico, el espacio entre su cara inferior y la superficie interna del molde será de  $2.5\text{mm} \pm 0.8\text{mm}$  ( $0.1\text{plg} \pm 0.03\text{plg}$ ); cuando el molde tenga  $101.6\text{mm}$  de diámetro, la cara inferior del martillo tendrá un diámetro de  $50.8\text{mm} \pm 0.13\text{mm}$  ( $2\text{plg} \pm 0.005\text{plg}$ ); si el molde tiene  $152.4\text{mm}$  de diámetro, la superficie inferior del martillo será de  $73.7\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$  ( $2.9\text{plg} \pm 0.02\text{plg}$ ). El martillo mecánico requerirá de calibración luego de que sea usado por 1000 ocasiones.
- c) **Extractor de muestra:** se utilizará de manera opcional; su objetivo es la extracción de la muestra compactada del molde.
- d) **Balanzas:** se requerirá una balanza de  $20\text{kg}$  de capacidad con precisión de  $1\text{g}$  y otra con capacidad de  $1000\text{g}$  con precisión de  $0.01\text{g}$ .
- e) **Horno:** con capacidad de alcanzar una temperatura constante de  $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .
- f) **Enrasador:** podrá utilizarse una regla metálica de filos rectos cuyas longitud y espesor sean de al menos  $254\text{mm}$  ( $10\text{plg}$ ) y máximo  $0.13\text{mm}$  ( $0.005\text{plg}$ ) respectivamente.
- g) **Tamices:** se utilizarán tamices de 3 denominaciones:  $75\text{mm}$  ( $3\text{plg}$ ),  $19\text{mm}$  ( $3/4\text{plg}$ ) y  $4.75\text{mm}$  ( $\text{N}^\circ 4$ ).
- h) **Herramientas de mezclado:** platillo mezclador, cuchara, espátula, paleta, etc.

---

<sup>23</sup> Sus diámetros serán mínimo de  $9.5\text{mm}$  ( $3/8\text{plg}$ ) y se ubicarán cuatro en cada extremo del tubo, separados a igual distancia entre sí.

### 3.2.14.3 Muestreo

El muestreo del material a ensayar depende del tipo de método a aplicar, teniendo que seleccionar una determinada masa de muestra para cada uno de éstos; dicha masa se especifica en el numeral 3.2.14.1 del presente documento. La muestra puede ser seca o húmeda; a continuación se describen estos dos tipos:

- a) Preparación de muestra seca:** cuando se observe la presencia de humedad excesiva, el material deberá secarse hasta obtener una textura trabajable<sup>24</sup>. La temperatura de secado no deberá superar los 60°C. Si se observa la necesidad, una vez concluido el secado el material deberá ser desmenuzado evitando la reducción del tamaño natural de las partículas. Una vez completado lo anterior, la muestra deberá ser pasada por su respectivo tamiz, tal como se detalla en la tabla del punto 3.2.14.1. Se deberán crear al menos cuatro especímenes con variaciones de 1.5% de humedad en cada una, incluyendo entre estos al contenido de humedad óptimo; el objetivo es que las muestras compactadas incrementen su masa hasta llegar a su densidad máxima y luego decrezcan. Se deberá garantizar la humedad homogénea de cada espécimen y se la dejará reposar antes de ser compactada; el tiempo de reposo depende del tipo de suelo y se especifica a continuación:

Tipo de suelo	Tiempo mínimo de reposo
GW, GP, SW, SP	No requiere
GM, SM	3 horas
ML, CL, OL, GC, SC	18 horas
MH, CH, OH, PT	36 horas

- b) Preparación de muestra húmeda:** la muestra a ser ensayada será pasada por el tamiz de 19mm (3/4plg) y el tamiz de 4.75mm (N°4) sin necesidad de un proceso de secado previo.

<sup>24</sup> Si los suelos se clasifican de acuerdo al método SUCS como: ML, CL, OL, GC, MH, CH, OH o PT, la muestra se preparará como una muestra húmeda.

Se deberá realizar el proceso de corrección de sobredimensionamiento en función de lo descrito en el numeral 3.2.14.4 cuando sea necesario. En cuanto al número de muestras, contenidos de humedad, densidades, reposo y secado (el secado será necesario solo en determinadas ocasiones para obtener un contenido de humedad apropiado), el espécimen deberá cumplir con lo mencionado en el literal anterior (literal a)).

#### ***3.2.14.4 Corrección de sobredimensionamiento***

La corrección se aplica cuando un porcentaje igual o superior al 30% de la muestra a ser ensayada pasa el tamiz de 19mm (3/4plg), ya que esto implica que ninguno de los procedimientos descritos en el muestreo puede ser aplicado para el cálculo de la densidad máxima o el contenido óptimo de humedad.

De los métodos descritos en el numeral 3.2.14.1, la aplicación del método A y B requiere el descarte del material que no atraviesa el tamiz de 4.75mm (N°4) y no necesita ninguna corrección. Si se observa que el 7% o más de la muestra no pasa el tamiz de 4.75mm (N°4), es recomendable usar el método C.

La aplicación del método C requiere que la parte retenida en el tamiz de 19mm (3/4plg) sea descartada, sin la necesidad de aplicar una corrección. Si se observa que una cantidad mayor o igual al 10% de la muestra es retenida en dicho tamiz, se recomienda la aplicación del método D.

El método D deberá aplicarse solamente cuando la masa que no atraviesa el tamiz de 19mm (3/4plg) sea mayor o igual al 10%; en caso contrario se deberá aplicar el método C. La corrección consiste en tamizar el material retenido por la malla de 19mm a través del tamiz de 75mm (3plg), descartando el material retenido en este último; ahora, la masa que atravesó la malla de 75mm (3plg) y se retuvo en la malla de 19mm (3/4plg), se sustituirá por una cantidad igual de masa que

pase por la malla de 19mm (3/4plg) y se retenga en la malla de 4.75mm (N°4) de una parte de material que no haya sido usado en la muestra de ensayo.

### **3.2.14.5 Ensayo**

Basado en (ASTM International, 1991), una vez seleccionado el método de ensayo y aplicadas las indicaciones de los numerales anteriores, se procederá a:

- a) Registrar la masa y volumen del molde a utilizar en el ensayo.
- b) Colocar el collar de extensión en el molde y posteriormente la muestra en cinco capas de alturas similares; cada capa será compactada en función del molde usado de la siguiente manera: si se utilizó el molde de 101.6mm, cada capa recibirá un total de 25 golpes; el total de golpes por capa será de 56 si se usó el molde de 152.4mm.
- c) Se usará una cantidad de material que sobrepase en una pequeña cantidad a la necesaria para llenar el molde luego de compactar la quinta capa; dicha cantidad deberá ser tal que no exceda en más de 6mm (1/4plg) el borde superior del molde. Para la compactación, el molde se apoyará sobre una base rígida (por ejemplo, base de concreto) que tenga un peso superior o igual a 91kg (200lb).
- d) Al momento de la compactación con el martillo manual, éste deberá mantenerse vertical o con una inclinación máxima de 5 grados y se deberá evitar golpes en la parte superior del tubo guía. La frecuencia de los golpes será de aproximadamente 1 golpe por cada 1.4 segundos cubriendo el total de la superficie.
- e) Una vez completados los golpes en cada una de las capas (verificando lo mencionado en el literal (b)) se deberá quitar la extensión del molde y se procederá a enrazar el cilindro con la regla, rellenando los orificios resultantes con parte de la muestra no usada o desbastada.

- f) Con la ayuda de la balanza, se procede a determinar el peso de la muestra compactada conjuntamente con el molde.
- g) La masa de la muestra compactada más la masa del molde (literal (e)) menos la masa del molde, deberá ser dividida para el volumen del molde, con lo que se obtiene el valor de la densidad húmeda en unidades de  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ ).
- h) Retirar el material del molde y proceder con la determinación de su contenido de humedad (se deberá utilizar una parte o toda la muestra compactada); se usará toda la muestra cuando su permeabilidad sea alta de tal manera que no permita que la humedad se distribuya uniformemente, para lo cual dicha muestra será triturada con el fin de facilitar el secado de la misma; si se habla de realizar este análisis con solamente una parte de la muestra, el cilindro deberá ser cortado axialmente por el centro y se tomará una muestra entre 100g y 500g de una de las partes.
- i) Repetir el procedimiento anterior con cada uno de los especímenes ensayados.
- j)

#### 3.2.14.6 Cálculos

Las siguientes fórmulas son tomadas de (ASTM International, 1991):

- a) Contenido de humedad de cada muestra ensayada:

$$w = \left( \frac{A - B}{B - C} \right) * 100$$

En donde:

$w$  – contenido de humedad, en %

$A$  – masa de la muestra ensayada húmeda más masa del recipiente

$B$  – masa de la muestra ensayada seca más masa del recipiente

$C$  – masa del recipiente

b) Densidad seca

$$\gamma_d = \left( \frac{\gamma_m}{w + 100} \right) * 100$$

En donde:

$\gamma_d$  – densidad seca, en  $\text{kg/m}^3$  o  $\text{lb/pie}^3$

$\gamma_m$  – densidad húmeda, en  $\text{kg/m}^3$  o  $\text{lb/pie}^3$

$w$  – contenido de humedad, en %

c) Relación Densidad-Humedad: consiste en la realización de un gráfico con la utilización de la densidad seca en el eje de las ordenadas y el contenido de humedad en el eje de las abscisas. La unión de los puntos formará una curva suave. Será necesario graficar también la curva conocida como “curva de saturación completa” o “curva sin vacíos de aire”, la cual nos indicará cuando los vacíos están completamente llenos de agua. La densidad seca y sus contenidos de humedad correspondientes que permiten graficar la curva de saturación completa se obtienen con la siguiente ecuación:

$$w_{sat} = \left( \frac{1000}{\gamma_d} - \frac{1}{G_s} \right) * 100$$

En donde:

$w_{sat}$  – contenido de humedad para saturación completa, en %

1000 – densidad del agua, en  $\text{kg/m}^3$  ( $62.4 \text{ lb/pe}^3$ )

$\gamma_d$  – densidad seca, en  $\text{kg/m}^3$

$G_s$  – gravedad específica del material ensayado<sup>25</sup>

d) El cálculo del contenido óptimo de humedad ( $w_o$ ) se basa en la gráfica formada en el literal (c), siendo identificado dicho valor por el punto más alto de la gráfica. Así mismo, del pico de la gráfica se toma su ordenada como la densidad máxima ( $\gamma_{max}$ ) de la muestra ensayada.

#### **3.2.14.7 Informe de resultados**

Dentro del informe de resultados se deberá indicar: el método que se aplicó para la ejecución del ensayo (métodos mencionados en el numeral 3.2.14.1 del presente documento), el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima de las muestras ensayadas, descripción del martillo que se usó, datos de identificación de la muestra usada y sus características, fecha y lugar en el que se tomó la muestra, fecha en la que se realizó el ensayo, nombre del laboratorio y laboratorista, procedimientos usados para la preparación de la muestra y todos los datos que se consideren importantes para la interpretación de los resultados.

---

<sup>25</sup> Este valor se puede determinar como un promedio entre la gravedad específica del material a ensayar que pasa por el tamiz de 4.75mm (N°4) y la gravedad específica aparente del material que se retiene en el tamiz de 4.75mm (N°4).

<sup>26</sup> Este valor se puede determinar como un promedio entre la gravedad específica del material a ensayar que atraviesa la malla de 4.75mm (N°4) y la gravedad específica aparente del material que se retiene en la malla de 4.75mm (N°4).

### 3.2.15 Durabilidad

#### 3.2.15.1 Generalidades

Para el caso de los áridos finos y gruesos que conforman las capas de rodadura de mezclas asfálticas en caliente, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) dicta que su índice de durabilidad deberá ser mínimo de 35%.

Los agregados para mezclas en planta y para tratamientos superficiales bituminosos, tal como lo indica (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017), no deberán presentar una pérdida mayor al 12% después de 5 ciclos de sumersión y lavado en sulfato de sodio, ensayo que se basa en la norma NTE INEN 863.

Para el caso de los materiales utilizados en la creación de superficies de rodadura de mezclas asfálticas en caliente, la norma NEVI-12 del (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), especifica la realización de un ensayo por cada 1000m<sup>3</sup> de material. La pérdida en los agregados gruesos de estas capas deberá ser de máximo 12% para altitudes inferiores a 3000m.s.n.m y máximo 10% para altitudes superiores a 3000m.s.n.m.

Los agregados gruesos que conforman las bases por su lado, deberán mostrar una pérdida no superior al 12% luego de un ensayo de durabilidad, tal como lo indica en (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador, 2017).

Los ensayos de durabilidad de las subbases de suelo estabilizado con cal se realizarán según el volumen 3 de la Norma ecuatoriana Vial (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), a razón de una muestra por cada 2000m<sup>3</sup> de material.

La aplicación de la norma NTE INEN 863:2011 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), permite valorar la resistencia de los agregados a los efectos que la intemperie pueda generar

sobre ellos, analizando dicha situación bajo el sometimiento de los áridos a condiciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. El ensayo descrito en esta norma, se basa en generar varias sumersiones del agregado en el sulfato para posteriormente secar la muestra al horno para que de la misma se deshidrate parcial o totalmente la sal precipitada en los poros permeables. La rehidratación de esta sal simula la expansión del agua al congelarse en los poros del agregado.

Se deberá tener en cuenta que los resultados obtenidos con la aplicación de este ensayo, no son del todo precisos, por lo que un resultado desfavorable no será indicador de rechazo de un material. Al comparar los resultados del ensayo con el uso de sulfato de sodio y el uso de sulfato de magnesio, se puede observar cierta variación; el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) indica que en base a la experiencia, los resultados son más precisos si el reactivo utilizado es sulfato de magnesio.

La acción de sumergir a los áridos en sulfato de sodio o sulfato de magnesio por varias ocasiones, puede generar efectos sobre los áridos; dichos efectos pueden identificarse como: desintegración, división, desmoronamiento, agrietamiento, exfoliación, entre otros.

### **3.2.15.2 Equipos**

El (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) indica que para el desarrollo de este ensayo se deberán utilizar:

- a) **Tamices:** se requerirá de dos grupos de tamices, uno para los áridos finos y otro para los áridos gruesos; para los agregados finos se usarán tamices con aberturas de: 150 $\mu$ m, 300  $\mu$ m, 600  $\mu$ m, 1.18mm, 2.36mm, 4.00mm y 4.75mm; en el grupo de tamices para agregados gruesos estarán presentes los que tengas aberturas de: 8.0mm, 9.5mm, 12.5mm, 16.0mm, 19.0mm, 25.0mm, 31.5mm, 37.5mm, 50.0mm, 63.0mm, 75.0mm, 90.0mm y 100.0mm.

- b) **Recipientes para sumersión de la muestra:** los recipientes presentarán agujeros cuyo fin será el permitir el paso y la salida del sulfato hasta su interior, sin dejar pasar los agregados.
- c) **Regulador de temperatura:** mientras la muestra se sumerge en la solución, se deberá controlar que la temperatura se mantenga adecuada para el desarrollo del ensayo.
- d) **Balanzas:** el desarrollo del ensayo logrará datos más precisos si se utilizan una balanza con precisión de 0.1g para el caso de los áridos finos y una balanza con precisión de 1g o 0.1% de la muestra (el mayor) para los agregados gruesos.
- e) **Horno:** su capacidad le permitirá alcanzar temperaturas de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y una tasa de evaporación<sup>27</sup> de 25g/h durante 4 horas
- f) **Medidor de gravedad específica:** se recomienda el uso de hidrómetros o en su defecto, vasos con graduación y una balanza con apreciación de  $\pm 0.001$ , que permita medir la gravedad específica de la solución.

### 3.2.15.3 Reactivos

El cálculo del volumen mínimo de reactivo, se basa en el producto de la sumatoria de los volúmenes de todas las muestras a ser ensayadas por cinco. Su preparación será de la siguiente manera:

- a) **Sulfato de sodio:** Para la creación de una solución de sulfato de sodio se requerirá el uso de sal de grado USP o similar y agua; el agua deberá mantenerse a una temperatura entre  $25^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$  para proceder con la adición de la sal en una cantidad determinada (para una saturación a  $22^{\circ}\text{C}$ , por cada litro de agua se agregará 350g de sal anhidra ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) o 750g de sal decahidratada ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )). La mezcla deberá ser agitada mientras la sal es

---

<sup>27</sup> Según el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), este valor se define como la pérdida de agua de los vasos de precipitación de un litro (inicialmente contendrán 500g de agua), colocados uno en cada esquina y otro en el centro del interior del horno a una temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

agregada y luego hasta su uso; se cubrirá la solución mientras no se esté utilizando con el fin de evitar la evaporación y la contaminación. Previo al uso de la solución, ésta deberá mantenerse a una temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas; transcurrido este tiempo, cada vez que se pretenda utilizar la solución, ésta deberá ser agitada y se determinará su gravedad específica, la cual no deberá ser menor a 1.151 ni mayor a 1.174; si la solución no presenta color, se desechará o filtrará (en caso de filtrado, posterior a ello se verificará que la gravedad específica cumpla con el valor iniciado).

- b) Sulfato de magnesio:** La creación de una solución de sulfato de magnesio sigue las mismas directrices especificadas para la solución de sulfato de sodio en cuanto a: temperatura inicial del agua, temperatura y tiempo de reposo de la solución, agitación y desecho o filtración; para la presente solución se utilizará sal de grado USP, ya sea anhidra ( $\text{MgSO}_4$ ) o cristalina ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (sal Epsom); para la saturación a  $23^{\circ}\text{C}$ , si se usa sal anhidra la cantidad mínima requerida por litro de agua será de 350g, en cambio, si se usa sal heptahidratada se hará en una cantidad de al menos 1400g por litro de agua. Para el uso de esta solución se verificará que su gravedad específica esté entre 1.295 y 1.308.
- c) Cloruro de bario:** se creará una cantidad total de  $100\text{cm}^3$  de esta solución al 5%; para esto se requiere disolver 5g de  $\text{BaCl}_2$  en  $100\text{cm}^3$  de agua destilada.

#### **3.2.15.4 Muestreo**

Para el análisis de muestras bajo la aplicación del presente ensayo, será necesario tomar la muestra con la aplicación de la norma NTE INEN 695:2010, descrita en el presente documento en el numeral 3.2.1.3.

En el caso del agregado fino, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) menciona que el mismo debe pasar por el tamiz de aberturas de 9.5mm y la muestra contendrá al menos 100g de

cada uno de los tamaños de partículas indicados en la siguiente tabla; esta cantidad respecto a la masa total de la muestra, deberá ser de al menos el 5%:

Fracción	Pasante del tamiz	Retenido en el tamiz
1	600 $\mu$ m	300 $\mu$ m
2	1.18mm	600 $\mu$ m
3	2.36mm	1.18mm
4	4.75mm	2.36mm
5	9.5mm	4.75mm

Tabla 64. Pérdida en sulfato. Tamices para preparar la muestra de agregados finos. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Una vez seleccionada la muestra, la misma se deberá lavar con la ayuda de agua y el tamiz de 300 $\mu$ m para posteriormente someterla a temperaturas de 110°C  $\pm$ 5°C para secarla hasta que la masa se muestre invariable. Posteriormente se realizará un proceso de tamizado según lo especificado en el párrafo y tabla anteriores; se permite la obtención una muestra un poco superior a 100g para cada fracción; la parte del material atascado en el tamiz, no deberá tomarse en cuenta para la toma de muestras de cada fracción; finalmente, en recipientes separados se colocará una cantidad de 100g  $\pm$ 0.1g de material de cada fracción.

Para el estudio de áridos gruesos, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) dicta que en primera instancia, se eliminará la parte de la muestra que atraviesa el tamiz de 4.75mm; la cantidad de la muestra se determina con la aplicación de la siguiente tabla; cada fracción se formará por una cantidad mínima equivalente al 5% de la masa total de la muestra:

Fracción	Tamaño de tamiz de aberturas cuadradas (en mm)	Masa (en g)
1	9.5 a 4.75	300 $\pm$ 5
	19.0 a 9.5	1000 $\pm$ 10
2	12.5 a 9.5	330 $\pm$ 5
	19.0 a 12.5	670 $\pm$ 10
	37.5 a 19.0	1500 $\pm$ 50
3	25.0 a 19.0	500 $\pm$ 30
	37.5 a 25.0	1000 $\pm$ 50
	63.0 a 37.5	5000 $\pm$ 300

4	50.0 a 37.5	2000 ±200
	63.0 a 50.0	3000 ±300
	75.0 a 63.0	7000 ±1000
	90.0 a 75.0	7000 ±1000
	100.0 a 90.0	7000 ±1000
5	75.0 a 63.0	7000 ±1000
	90.0 a 75.0	7000 ±1000
	100.0 a 90.0	7000 ±1000

Tabla 65. Pérdida en sulfato. Tamaño de la muestra en función de su composición. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

El alistamiento de la muestra de agregado grueso parte con el lavado y secado (sometiendo la muestra a una temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) de la misma hasta que la masa se presente constante. La muestra deberá ser separada mediante los tamices según lo especificado en el párrafo y tabla anteriores. Tomar las muestras de cada fracción registrando su masa; en caso de que la muestra contenga partículas de tamaño superior a 19mm, se registrará el número de partículas presentes.

Es importante que cuando se pretenda analizar una muestra cuya gradación indique un contenido mayor al 10% de material no pasante de la malla de 9.5mm y un contenido mayor a 10% de material que atraviesa la malla de 4.75mm, el material se separe mediante el uso del tamiz de 4.75mm y se analice cada fracción por separado; así mismo, los resultados se informarán por separado, mencionando el porcentaje de cada fracción en relación con la muestra original.

### 3.2.15.5 Ensayo

El estudio de la muestra previamente tomada, según (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), consiste en:

- a) Sumergir la muestra en la solución, cubriéndola por completo y verificando que la solución sobrepase a la muestra en una altura igual o superior a 12.5mm.

- b) Dejar reposar la muestra completamente sumergida en la solución a  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por un período de tiempo entre 16 y 18 horas. Los recipientes deberán estar sellados para evitar la evaporación o que en la solución ingresen sustancias externas.
- c) Retirar la muestra de la solución y dejarla drenar por un período de tiempo de  $15\text{min} \pm 5\text{min}$ .
- d) Secar la muestra al horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa sea constante, realizando revisiones de masa cada 2 o 4 horas sin necesidad de enfriar la muestra.
- e) Luego de varias revisiones de masa, se considera que ésta es constante una vez que su variación entre dos mediciones consecutivas es menor a 0.1%.
- f) Comprobado lo anterior, dejar reposar la muestra hasta que obtenga la temperatura del ambiente.
- g) Sumergir por segunda ocasión la muestra en la solución preparada y repetir los pasos (a) y (b).
- h) Se repetirá todo el proceso por un número requerido de ciclos con el fin de obtener los datos necesarios.
- i) Una vez completados los ciclos, incluido el enfriamiento, la muestra deberá ser lavada para eliminar el sulfato de sodio o sulfato de magnesio (según el que se haya usado); su eliminación completa se verifica con el cloruro de bario, el cual indica que la muestra está libre de sulfato cuando al agua de lavado se le agrega el cloruro y no se observa reacción.
- j) El agua utilizada para lavar la muestra deberá circular a través de la muestra y mantenerse a una temperatura de  $43^{\circ}\text{C} \pm 6^{\circ}\text{C}$ ; una opción para este lavado, consiste en introducir la muestra completa en un tanque y permitir el ingreso del agua desde el fondo del tanque, dejando que la misma rebose. Será importante que la muestra no se someta a impacto ni abrasión con el fin de evitar que las partículas de la muestra se rompan.

- k) Si en el lavado de la muestra se usa agua potable con contenido de sulfatos, la añadidura del cloruro puede generar opacidad del agua, lo cual se deberá tener en cuenta para juzgar si la muestra está completamente limpia.
- l) Una vez que la muestra está libre de sulfato, se realizará un examen cuantitativo, haciendo que cada fracción de la muestra sea secada al horno a temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que no se observe variación en su masa.
- m) El árido fino deberá tamizarse a través del tamiz sobre el que fue retenido antes de iniciar el ensayo (el método y duración del tamizado será el mismo que se usó en la preparación de la muestra) y el árido grueso, se tamizará a mano en función de la tabla siguiente, sin forzar su paso:

<b>Tamaño del agregado, (en mm)</b>	<b>Tamiz utilizado para determinar la pérdida, (en mm)</b>
100 a 90	75
90 a 75	63
75 a 63	50
63 a 37.5	31.5
37.5 a 19.0	16.0
19.0 a 9.5	8.0
9.5 a 4.75	4.0

*Tabla 66. Tamices usados en la determinación de la pérdida con sulfato del árido grueso. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)*

- n) Registrar la masa retenida en los diferentes tamices y registrar la diferencia entre las mismas y la masa inicial de cada fracción; esta última será la pérdida del agregado y se expresará en porcentaje de la masa inicial.
- o) En cuanto a las partículas con tamaños superiores a 19.0mm se realizará un examen cualitativo; la ejecución del ensayo podrá generar: desintegración, división,

desmoronamiento, agrietamiento, exfoliación, entre otros efectos<sup>28</sup>, por lo cual estas partículas se separarán en grupos según sea el efecto que el ensayo generó y se registrará el número de partículas presentes en cada grupo.

### **3.2.15.6 Cálculos**

Según el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011), los cálculos para este ensayo, consisten básicamente en registrar los datos obtenidos con la aplicación de los pasos descritos en el numeral 3.2.15.5 del presente documento.

### **3.2.15.7 Informe de resultados**

Para la presentación de resultados se deberá registrar al menos:

- a) Fecha de toma y ensayo de la muestra, nombre del laboratorio y laboratorista.
- b) Todos los datos pertinentes a la correcta identificación de la muestra, incluida la masa de cada fracción de agregado antes del ensayo.
- c) Masas obtenidas luego de la ejecución del ensayo, representadas como un porcentaje de la masa original de cada fracción.
- d) Promedio ponderado del porcentaje de pérdida de cada fracción de muestra, determinado en función de la norma NTE INEN 696 y de la gradación de la muestra en el ensayo; si el árido fino tiene una cantidad menor al 10% de partículas mayores al tamiz de 9.5mm, se asumirá que las partículas más pequeñas que el tamiz de 300 $\mu$ m no tienen pérdida y que la pérdida en las partículas mayores a 9.5mm será a misma que en la fracción inmediatamente inferior; si el árido grueso presenta una cantidad inferior al 10% de partículas que atraviesan el tamiz de 4.75mm, se asumirá que dichas partículas tendrán la misma pérdida que la

---

<sup>28</sup> Es recomendable que las partículas de dimensiones inferiores a 19mm sean revisadas a fin de verificar que estos efectos no se presenten de manera excesiva

fracción inmediatamente superior; si la muestra presenta cantidades considerables de agregado fino y agregado grueso, el análisis y la presentación de resultados se realizará individualmente para cada tipo de agregado; en caso que se observe un contenido inferior al 5% de la muestra en los tamaños, o cuando se observe la ausencia de uno de los tamaños indicados en las tablas 57 y 58, el cálculo del promedio ponderado se basará en considerar su pérdida igual al siguiente tamaño (inmediatamente superior o inferior, respectivamente).

- e) Porcentaje ponderado de pérdida, aproximando el valor al entero más cercano.
- f) Número de partículas de dimensiones superiores a 19.0mm antes del ensayo y número de partículas afectadas (literal (o) del numeral 3.2.15.5).
- g) Tipo de solución y fecha de elaboración de la misma.
- h) Todos los datos extras que se consideren importantes.

Un formato recomendado para el registro de datos se presenta como “Anexo j” del presente documento.

## 3.2.16 Resistencia al deslizamiento

### 3.2.16.1 Generalidades

Los ensayos de prueba de resistencia al deslizamiento se realizan sobre la mezcla asfáltica colocada sobre la vía y previamente compactada. Como lo especifica el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), esta prueba se efectúa en un número de una por cada jornada de trabajo.

Su ejecución se realizará en función del procedimiento descrito por la norma MTC E 1004 del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016), mismo que tiene el objetivo de calcular el coeficiente de resistencia al deslizamiento de un pavimento a través de un péndulo británico, mismo que a su vez, tiene la capacidad de medir la energía que se pierde al chocar el borde del patín (zapata de goma) sobre la superficie.

La norma MTC E 1004 del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) define a la resistencia al deslizamiento como una “fuerza que se desarrolla a lo largo de la superficie de un pavimento, cuando una rueda está frenada o impedida de girar.”

### 3.2.16.2 Equipos

Los equipos necesarios para que los resultados del ensayo sean verídicos, se describen a continuación y se basan en lo especificado por el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016):

- a) **Péndulo del TRRL:** (ilustración 16), contendrá una zapata y su respectiva placa (la zapata tendrá forma de arco y su diámetro será de 508mm medidos desde el centro de suspensión; ejercerá una fuerza igual a  $24.52\text{N} \pm 0.98\text{N}$  sobre la superficie que está siendo ensayada); su masa será igual a  $1500\text{g} \pm 30\text{g}$ , con eje de gravedad en el centro de su brazo a una distancia

de 411mm  $\pm$ 4mm medida desde el centro de oscilación. El muelle tendrá una variación de tensión no superior a 216N/m.

- b) **Zapata de goma:** (ilustración 16), adherida a una placa de aluminio, misma que se fija al eje de alojamiento de la zapata formando un ángulo de 70° con el brazo lo cual permite al borde posterior ser el único en contacto con la superficie ensayada. Esta zapata deberá tener una longitud de 76.2mm, un ancho igual a 25.4mm y espesor de 6.5mm. La zapata junto con su placa de soporte tendrá una masa total de 36g  $\pm$ 7g. La fabricación de la zapata se hará con caucho con edad mínima de seis meses y antes de su primer uso se deberán acondicionar mediante diez oscilaciones en una superficie testigo seca. Será importante revisar las características de la zapata, ya que su constante uso podrá generar desgaste del caucho, lo cual se traduce a resultados erróneos<sup>29</sup>.
- c) **Dispositivo de nivelación:** se ensamblará en cada uno de los apoyos del aparato con un nivel de burbuja; su objetivo es, mediante el procedo de atornillado, lograr la verticalidad del equipo.

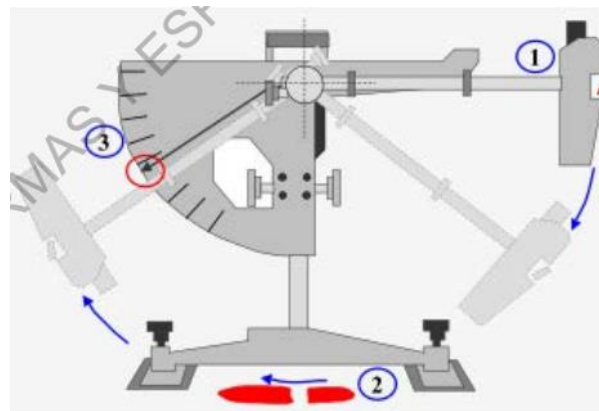


Ilustración 26. Forma de trabajo del péndulo. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

<sup>29</sup> Cuando en la zapata se muestre una superficie de rozamiento de ancho mayor a 3.2mm, o un desgaste de la arista superior a 1.6mm de alto, la zapata deberá ser reemplazada.

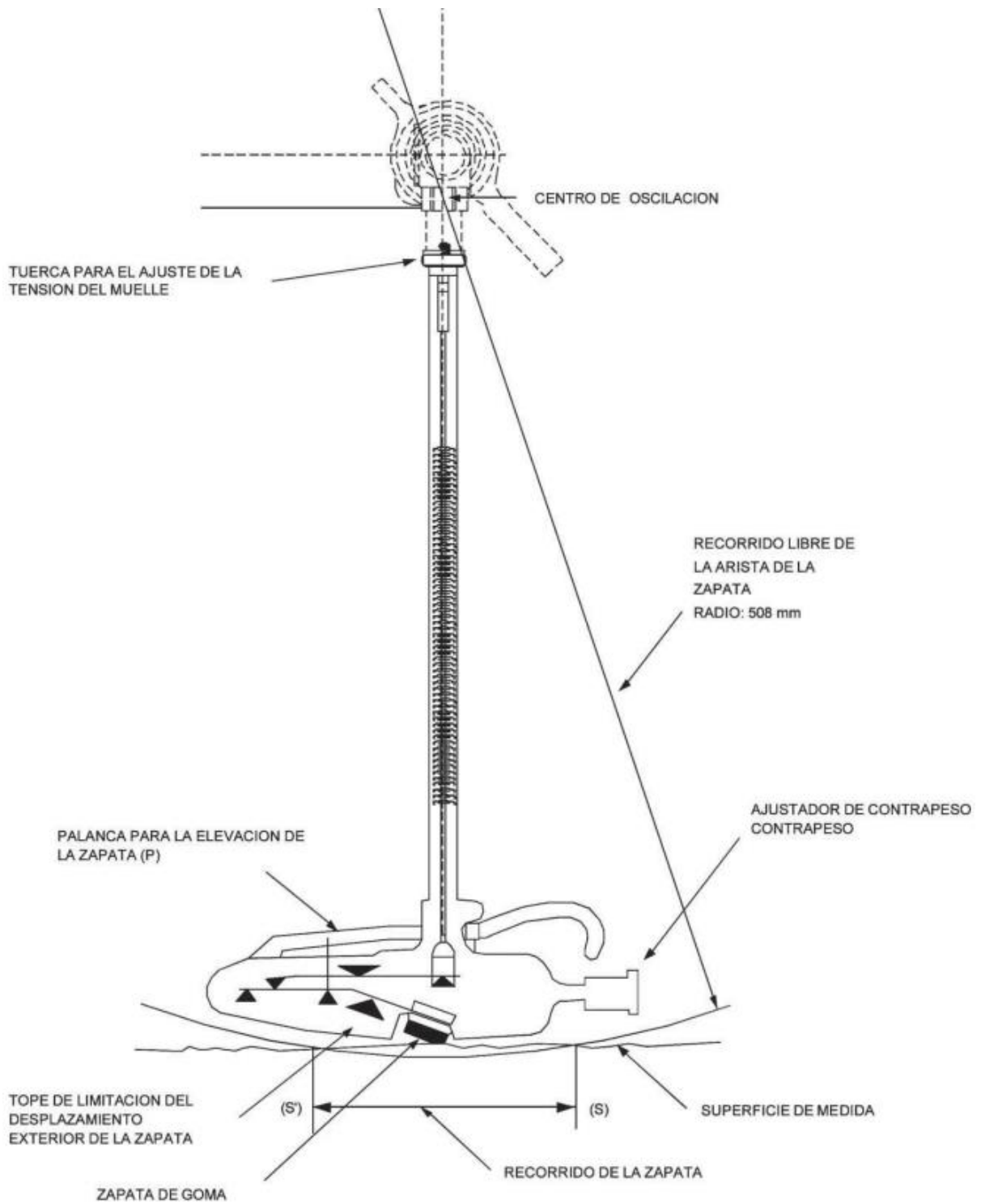
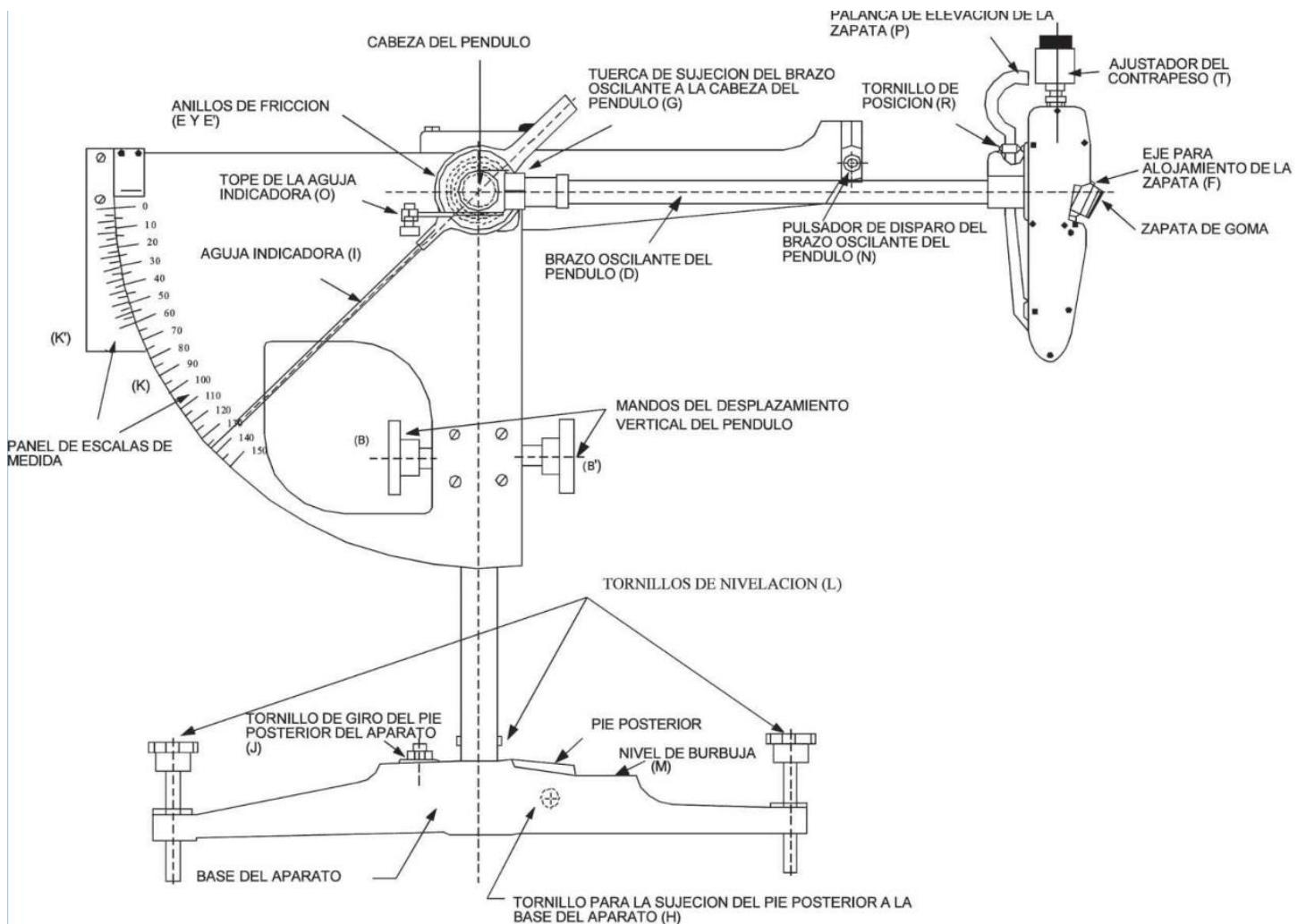


Ilustración 27. Brazo de péndulo. Ensayo de Resistencia al deslizamiento. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)



*Ilustración 28. Partes del péndulo. Ensayo de resistencia al deslizamiento. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)*

- d) **Dispositivo de deslizamiento vertical:** como su nombre lo indica, deberá permitir el movimiento vertical del eje de suspensión del péndulo para que la zapata pueda alcanzar el contacto con la superficie ensayada con una longitud entre 124mm y 127mm.
- e) **Dispositivo de disparo del brazo del péndulo:** sujeta el brazo y para la ejecución del ensayo, permite su caída libre.
- f) **Dispositivo de medida:** conformado por una aguja de 85g de masa y 300mm de longitud que es movida de su posición estática hasta 10mm bajo el eje horizontal del centro de oscilación tras el movimiento de dicho brazo.

- g) **Insumos varios:** regla regulada con longitud igual a 177mm, con marcas exteriores separadas entre si 127mm; la distancia entre una marca exterior y una interior más cercana será de 2.5mm; termómetro con capacidad de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$ ; un recipiente para agua con capacidad de 10 litros y otro con capacidad de 0.5 litros, ambos con tapa roscable<sup>30</sup>; cepillo de cerdas de goma de 2cm de largo y que logren cubrir una superficie de  $16\text{cm}^2$ ; cinta métrica con longitud mínima de 15m.

Una vez identificados los equipos e insumos necesarios, se procede a describir el armado del equipo principal con cada uno de sus componentes:

- a) Para la ejecución del ensayo se deberá en primera instancia instalar el equipo necesario en la zona de estudio. Para esto, se coloca adecuadamente el pie de la base, sujetándola con el tornillo correspondiente.
- b) Se procede a colocar el brazo de oscilación en su posición sobre la cabeza la base del equipo ajustando la rosca de fijación.
- c) Colocar la zapata de goma en su posición de trabajo.
- d) Mediante el tornillo de ajuste y el nivel de burbuja, nivelar el equipo hasta su posición correcta de trabajo.
- e) La cabeza del equipo será levantada de tal manera que se evite el contacto entre la zapata y la superficie a analizar, es decir, se deberá obtener oscilación libre del brazo. A continuación se verificará que la aguja de medición se encuentre en cero<sup>31</sup>. La aguja deberá quedar en forma paralela al eje del brazo, ajustándola con el tornillo respectivo.

---

<sup>30</sup> La tapa del recipiente más pequeño tendrá un orificio de salida para un tubo de 3mm de diámetro.

<sup>31</sup> Para cumplir con este objetivo, se colocará el brazo en posición horizontal, enganchándolo al mecanismo de disparo.

- f) Se procede a permitir la caída libre del brazo, permitiendo que la aguja se arrastre con su oscilación hacia adelante y se registra la lectura del panel de escalas ( $k$  o  $k'$  de la ilustración 17); para esto y para todas las siguientes caídas del brazo, se sujetará el equipo con una fuerza tal que permita evitar movimientos o vibraciones del mismo.
- g) El brazo se colocará nuevamente en su posición horizontal de equilibrio evitando que la zapata choque con la muestra analizada y que la aguja se arrastre en el panel. Se realiza la corrección de la lectura ajustando los anillos de fricción ubicados en la cabeza del péndulo ( $E$  y  $E'$  de la ilustración 17)<sup>32</sup>.

### 3.2.16.3 Muestreo

Este ensayo se deberá realizar en campo, en un lugar del pavimento en el cual la construcción haya finalizado; para el desarrollo del ensayo, el (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) indica que:

- a) Se seleccionará el lugar a ensayar y se posicionará el equipo longitudinalmente a la superficie de la vía; se deberá nivelar el mismo como se indica en el ensamblaje del equipo (numeral 3.2.16.2 del presente documento).
- b) Se deberá asegurar que la superficie en la cual se generará la fricción entre la zapata y el pavimento, se encuentre totalmente limpia, sobre la cual no deberán existir ningún tipo de partículas sueltas.
- c) En la parte inferior de la palanca de elevación se deberá colocar una galga con el fin de ubicar el brazo a una altura que permita un suave roce entre la zapata y la superficie a ensayar.

---

<sup>32</sup> Cuando la aguja sobrepasa el cero en el panel de escalas, los tornillos de ajuste deberán ser aflojados. La comprobación se realizará las veces necesarias hasta obtener una marca de cero de la aguja en el panel por tres ocasiones consecutivas.

- d) Se procederá a retirar la galga, lo cual generará que el brazo se presione sobre la superficie de ensayo; luego se colocará la regla graduada en la superficie y se verificará que al generar leves movimientos del brazo, la zapata se pondrá en contacto con la superficie en la distancia que las marcas de los bordes de la regla indican.
- e) Se colocará nuevamente el brazo en su posición horizontal de equilibrio.

#### **3.2.16.4 Ensayo**

Una vez cumplidas las indicaciones anteriores, se procede a desarrollar el ensayo; el procedimiento descrito a continuación se basa en la norma MTC E 1004 del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016), cumpliendo con los requisitos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción:

- a) Cuando se vaya a realizar la primera lectura del día, se requerirá el calentamiento previo de la zapata, lo cual se logra dejando caer el brazo por cinco ocasiones sobre la superficie de ensayo. De igual manera, si el equipo no fue usado durante las últimas 8 horas (anteriores al ensayo), se deberá realizar el precalentamiento. Una vez cumplido esto, el brazo regresará a su posición de equilibrio.
- b) Posterior al precalentamiento, la superficie de ensayo deberá humedecerse con una gran cantidad de agua y se dejará caer libremente el brazo; se registrará la lectura marcada por la aguja. Cada una de las ocasiones en las que se realice la medición y el recipiente se vuelva a llenar de agua, se deberá registrar la temperatura del agua de trabajo. El desarrollo del ensayo consistirá en la toma de cinco mediciones por cada punto ensayado, pudiendo aumentar el número de éstas si se observan variaciones superiores a 5 puntos entre caídas consecutivas del brazo. En el caso en el que esta última condición no llegue a cumplirse, el

- equipo deberá recalibrarse (aguja en cero) hasta obtenerla, caso contrario, se deduce que el equipo requiere mantenimiento.
- c) Los escenarios de trabajo deberán asegurar que durante la realización del ensayo, no exista presencia de lluvia ya que esta podría interferir en la calibración y generar lecturas equívocas. Así mismo, se deberá asegurar que el viento no influya en el movimiento libre de la aguja para una vez más, evitar la lectura de datos erróneos.
  - d) Si el objetivo del ensayo es analizar un pavimento con tratamiento de cepillado o ranurado, el péndulo deberá ubicarse a  $20^\circ$  respecto a la dirección de desplazamiento vehicular. Cuando la pendiente y peralte del pavimento dificulten la nivelación del equipo, este último deberá colocarse a determinado ángulo de tal modo que permita una medición adecuada. Es importante indicar que para que las mediciones sean veraces, la superficie analizada deberá tener una temperatura entre  $5^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$ .
  - e) La altura de la cabeza del péndulo se coloca de tal manera que la superficie de la zapata tenga contacto con la superficie a ensayar en una longitud toda entre 124mm y 127mm; el brazo deberá permanecer libre y en su vertical para accionar la palanca de elevación (para elevar la zapata). Se hace coincidir la zapata con la superficie de ensayo descendiendo la posición la cabeza y sin alterar la posición del brazo.
  - f) Se procede a colocar el brazo en su posición de disparo y la zapata se humedecerá con una cantidad significativa de agua limpia.
  - g) Se inicia con la caída libre del brazo y se registra las marcas de la aguja mediante el redondeo del valor a su número entero más próximo. El brazo y la aguja deberán regresar a su posición inicial (posición antes del disparo) y se repetirá la caída del brazo por tres nuevas ocasiones, humedeciendo nuevamente la superficie para cada intento y registrando en cada

uno de ellos el valor marcado por la aguja, es decir, el ensayo se realizará un total de cuatro veces en cada punto analizado. La veracidad de los datos registrados se comprueba al comparar las cuatro lecturas y observar que entre ellas no exista una diferencia mayor a 3 unidades BPN (British Pendulum Number, o por su traducción: Número de Péndulo Británico), dichos valores se considerarán el “valor efectivo de la lectura en el punto ensayado”; de no cumplirse esta última condición, el ensayo se seguirá ejecutando hasta obtener tres medidas consecutivas iguales, las cuales pasarán a ser las que conforman el valor efectivo<sup>33</sup>.

- h) Se registra la temperatura del ambiente en el punto ensayado (bajo la sombra) así como también la temperatura del agua utilizada en el ensayo.

### 3.2.16.5 Cálculos

Para el presente ensayo no se requiere la realización de ningún cálculo, ya que los datos se basan solamente en el registro de las marcas de la aguja en unidades BPN, mismas que varían desde 0 hasta 100. La representación del coeficiente de resistencia al deslizamiento (*CRD*) se hace en valores de tanto por uno de la siguiente forma:

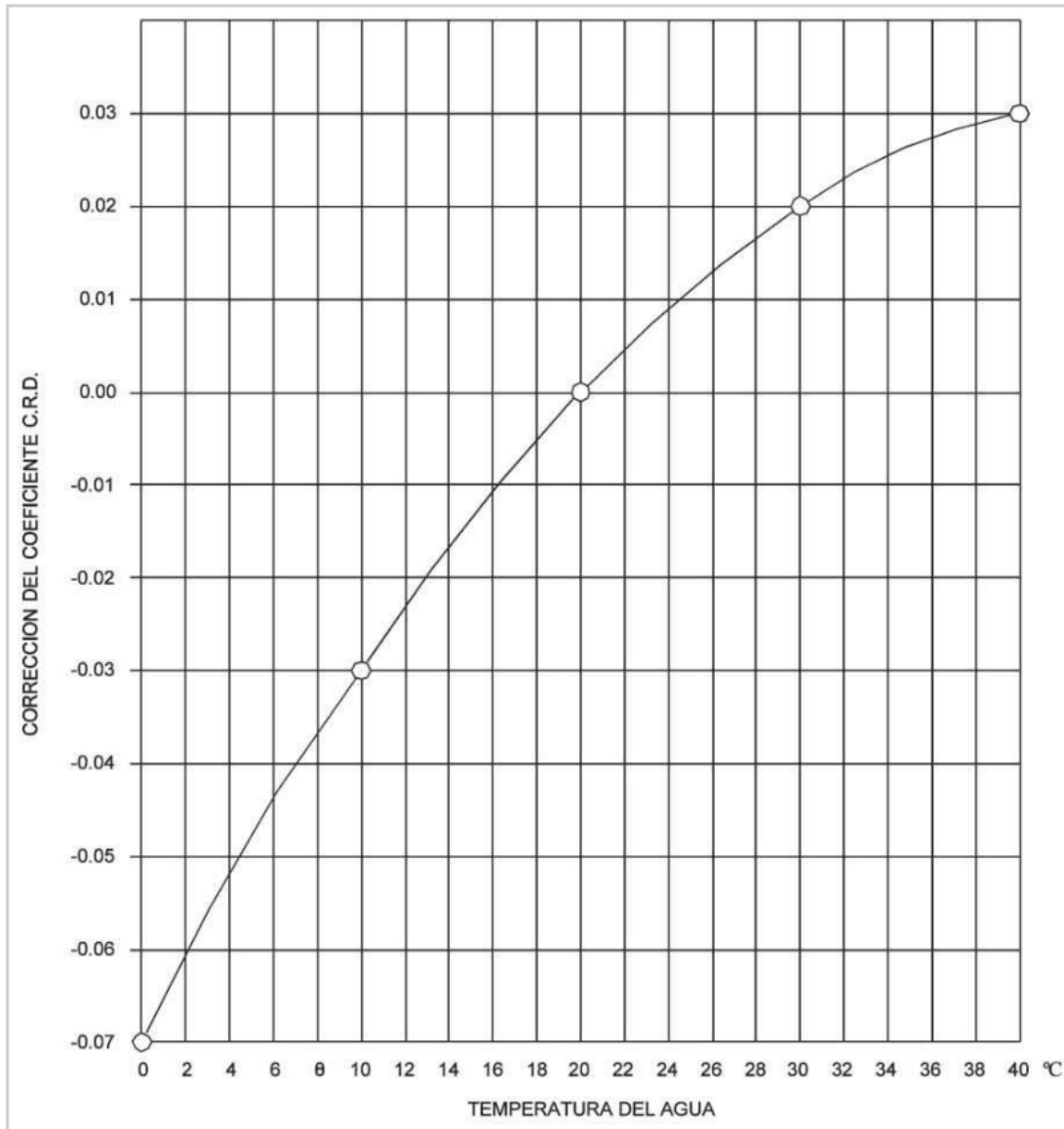
$$CRD = \frac{\text{lectura efectiva de BPN}}{100}$$

Para que la representación de resultados de los diferentes puntos analizados sea uniforme, se requiere realizar una corrección del coeficiente de resistencia al deslizamiento<sup>34</sup> con el fin de expresar los resultados a una temperatura de 20°C; la corrección se deberá realizar con el uso de la siguiente gráfica:

---

<sup>33</sup> Es importante indicar que luego de realizar el ensayo en 5 o 6 puntos diferentes, se verificará que la calibración del equipo sea correcta, es decir, se comprobará que la aguja se encuentre en cero.

<sup>34</sup> Esto debido a las variaciones de temperatura en el agua de ensayo, la zapata, etc.



*Ilustración 29. Gráfica para corrección del coeficiente de resistencia al deslizamiento. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)*

### 3.2.16.6 Informe de resultados

La presentación de resultados deberá contener todos los datos referentes a la identificación de la zona de ensayo, nombre del laboratorio y laboratorista que lo ejecuta, fecha de realización de ensayo, entre otros datos importantes a destacar para la interpretación de los resultados por parte del lector. La tabla que sigue, contiene una guía para la presentación de los resultados del ensayo:

Registro de Mediciones con Péndulo Británico							
<b>Proyecto:</b>			<b>Fecha:</b>		<b>Operador:</b>		
			Registro BPN				
km	Pista	T (°C)	1	2	3	4	Observaciones

Tabla 67. Guía de registro de datos del ensayo de resistencia al deslizamiento. Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016)

### 3.2.17 Contenido de asfalto por extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos

#### 3.2.17.1 Generalidades

Para la ejecución de este ensayo en los hormigones asfálticos utilizadas como superficies de rodadura de hormigón asfáltico en caliente, el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) a través de la Norma Ecuatoriana Vial en su volumen 3, especifica la toma de muestras directamente desde la pista o desde la planta de elaboración de mezclas para un número de ensayos igual a dos por cada jornada de trabajo.

Para las mezclas de graduación discontinua, el contenido de asfalto deberá ser mínimo de 6.0%. En el caso de los hormigones asfálticos de graduación abierta el contenido de asfalto depende de la gravedad específica de Bulk; el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) establece los siguientes:

Gravedad específica Bulk del agregado combinado	Contenido de asfalto mínimo en función de la masa, %
2.40	6.8
2.45	6.7
2.50	6.6
2.55	6.5
2.60	6.3
2.65	6.2
2.70	6.1
2.75	6.0
2.80	5.9
2.85	5.9
2.90	5.7
2.95	5.6
3.00	5.5

Tabla 68. Contenido de asfalto mínimo para mezclas de graduación abierta. Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Se pueden identificar muchos métodos para el establecimiento cuantitativo del asfalto en mezclas asfálticas en caliente preparadas en laboratorio o en muestras tomadas de la vía. El

desarrollo del presente ensayo se fundamenta en la norma INV E-732-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013). En una mezcla asfáltica, la extracción de su material bituminoso se realiza con la aplicación a la misma de tricloroetileno, bromuro de n-propilo (NPB) o cloruro de metileno, reacción que se utiliza conjuntamente con el equipo en función del método específico que se vaya a aplicar. La determinación del contenido de asfalto se obtiene de la diferencia entre la masa del agregado extraído, contenido de humedad y material mineral en el extracto, y su valor se presenta como un porcentaje.

### 3.2.17.2 Equipos

La norma INV E-732-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) indica que el desarrollo del presente ensayo se logrará de manera eficaz con el uso de:

- **Horno:** capaz de alcanzar una temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- **Recipiente:** con base plana y que permita a la muestra ser calentada. Sus dimensiones aproximadas deberán ser de 300mm de longitud, 200mm de ancho y 25mm de profundidad.
- **Balanza:** su capacidad será la adecuada para el ensayo y su precisión de mínimo 0.1” de la masa total de la muestra.
- **Placa de calentamiento:** será eléctrica con un mínimo de 700W; su velocidad de calentamiento deberá ser regulable.
- **Cilindros graduados de boca angosta:** con capacidad de 1000ml o 2000ml y otro con capacidad de 100mm.
- **Cápsula de porcelana:** con capacidad de 125ml.
- **Desecador.**
- **Balanza analítica.**

De igual forma, el ensayo requerirá para su ejecución la preparación de varios reactivos, mismos que deberán ser manejados con precaución ya que resultan tóxicos y peligrosos para el humano.

Los reactivos necesarios serán los siguientes:

- Solución saturada de carbonato de amonio  $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$ .
- Cloruro de metileno de grado técnico.
- Bromuro de n-propilo.
- Tricloroetileno de grado técnico tipo 1.

### **3.2.17.3 Muestreo**

La toma de muestras se fundamenta en los métodos descritos por la norma INV E-731-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), que en resumen describe lo siguiente:

- a) El material a ser muestreado se inspecciona con el fin de identificar sus variaciones.
- b) Cuando el muestreo se haga desde la banda transportadora, la banda se detiene y se toman al menos tres muestras de igual tamaño de diferentes áreas con la ayuda de una planilla; el total de las muestras obtenidas se mezclan para obtener una muestra general.
- c) En caso de toma de muestras desde los vehículos de transporte, se elegirán al azar los camiones para tomar al menos tres muestras de cada uno. Las muestras no se tomarán de la superficie sino más bien de una parte más profunda. Las muestras obtenidas se mezclan para conformar una muestra general.
- d) Si la muestra se toma directamente de la vía, se deberá hacer antes de que la mezcla haya sido compactada, tomando un mínimo de tres muestras con masas similares para posteriormente juntarlas. La selección de las muestras se hace al azar.
- e) Se deberá cumplir con la tabla presentada a continuación en cuanto a la masa de la muestra total:

Tamaño máximo nominal de los agregados	Mezcla suelta	
	Masa mínima aproximada, en kg	Volumen aproximado, en litros
2.36mm (N°8)	10	8
4.75mm (N°4)	10	8
9.5mm (3/8plg)	16	12
12.5mm (1/2plg)	20	15
19.0mm (3/4plg)	20	15
25.0mm (1plg)	24	18
37.5mm (1 1/2plg)	30	22
50.0mm (2plg)	35	22

Tabla 69. Masa para la toma de muestras de mezclas asfálticas. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

Una vez que la muestra haya sido obtenida, si la misma no muestra características lo suficientemente blandas como para ser separada con una espátula, se colocará en la bandeja y se someterá a temperaturas de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  al horno hasta obtener una muestra trabajable. Posteriormente, mediante cuarteo se obtiene una muestra con masa mínima como se especifica a continuación, indicando que a menos que la muestra se encuentre libre de agua, se deberá obtener una cantidad de muestra extra para la obtención de la humedad:

Tamaño nominal máximo del agregado		Masa mínima de la muestra
mm	plg	kg
4.75	N°4	0.5
9.5	3/8	1.0
12.5	1/2	1.5
19.0	3/4	2.0
25.0	1	3.0
37.5	1 1/2	4.0

Tabla 70. Tamaño de la muestra para el ensayo de contenido de asfalto. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

### 3.2.17.4 Ensayo

La norma en estudio presenta cinco métodos para la ejecución del presente ensayo, cada uno de ellos con el uso de diferentes equipos (a más de los mencionados en el numeral 3.2.17.2). Basando el análisis en la disponibilidad de equipos en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Católica de Cuenca, a continuación se describirá el método A de la norma INV E-732-13.

Para su desarrollo, se requiere el uso de un aparato de extracción formado por una taza y un dispositivo que permita su rotación a velocidad variable controlada de hasta 3600rpm. Este equipo contendrá también un recipiente para la recolección del solvente.

Se deberá disponer también de filtros de  $1.27\text{mm} \pm 0.03\text{mm}$  de espesor, mismos que se colocarán sobre el borde de la taza.

Se procede entonces con el desarrollo del ensayo, mismo que se describe a continuación:

- a) Calcular la humedad de la muestra de ensayo.
- b) Colocar dentro de la taza la mezcla a analizar. Una masa entre 650g y 2500g es requerida.
- c) Colocar en la taza una cantidad adecuada de tricloroetileno, cloruro de metileno o bromuro n-propilo, tal que permita cubrir por completo la muestra ensayada y dejar reposar el tiempo necesario (no mayor a 60 minutos) para que la muestra se desintegre.
- d) Colocar la taza sobre el dispositivo de extracción y secar el filtro a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , determinar su masa y colocarlo sobre el borde de la taza.
- e) Colocar el recipiente recolector de solvente en el desagüe.
- f) Iniciar el proceso de centrifugación con giros a velocidades cortas, mismas que se aumentan gradualmente hasta 3600rpm o hasta observar que no existe flujo de solvente.
- g) Parar la máquina y agregar 200ml de solvente para repetir el proceso de centrifugación. Este proceso deberá repetirse por un número de al menos tres veces, parando dicha repetición cuando se observe que el extracto tiene un color aproximado al color de la paja.
- h) Recolectar todo el solvente y material mineral utilizado en todas las repeticiones.
- i) Retirar el filtro y secar al aire o al horno (si el material es fieltro) hasta lograr una masa constante. El secado al horno se hará a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , retirando el material adherido al filtro.

- j) Colocar el contenido de la taza en una bandeja y secar dicho contenido en primer lugar con un baño de vapor (excepto si el solvente utilizado fue tricloroetileno o bromuro n-propilo) y luego al horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa se muestre constante.
- k) Registrar la masa del agregado de la bandeja más la masa del filtro como “masa del agregado extraído ( $W_3$ )”.
- l) Si el filtro utilizado es un filtro de poca ceniza, el procedimiento descrito en los literales i), j) y k) se reemplaza por lo siguiente: el agregado y el filtro se ubica en un contenedor metálico limpio y se secan al horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , el filtro se dobla y se somete a ignición; finalmente se registra la masa del agregado extraído en el recipiente como  $W_3$ .
- m) Aplicar uno de los siguientes métodos para la determinación del material mineral del extracto:
  - a. **Método de la ceniza:** se requiere el uso de una cápsula de porcelana previamente pesada con aproximación de 0.001g y la determinación del volumen total del extracto para posteriormente verter 100ml de dicho extracto en la cápsula. Se utiliza una placa de calentamiento o un baño de vapor para evaporar el extracto hasta que se seque por completo. Los residuos se someten a temperaturas entre  $500^{\circ}\text{C}$  y  $600^{\circ}\text{C}$  hasta que se muestren como cenizas y posteriormente se dejan enfriar. Se pesa la ceniza y por cada gramo de esta, se coloca en la misma 5ml de solución de carbonato de amonio saturado y se deja reposar por una hora. Se coloca el producto final en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa se presente constante, determinando y registrando la misma con aproximación de 0.001g. Finalmente se utiliza la ecuación que sigue para la determinación de la “masa del material mineral en el volumen total del extracto ( $W_4$ )”:

$$W_4 = G \left[ \frac{V_1}{(V_1 - V_2)} \right]$$

En donde:

$G$  – ceniza de alícuota, en g.

$V_1$  – volumen total, en ml.

$V_2$  – volumen luego de remover la alícuota, en ml.

- b. **Método de centrifugación:** se utiliza una centrifugadora, primeramente registrando la masa de su taza con aproximación de 0.01g. la taza y el recipiente de recolección de solvente se colocan en el dispositivo de centrifugación y se coloca en un recipiente para control de alimentación todo el extracto. El recipiente del extracto se lavará varias veces con una pequeña cantidad de solvente limpio. Se inicia el centrifugado y se deja alcanzar una velocidad constante para posteriormente iniciar la alimentación del extracto en la centrífuga a una velocidad entre 100ml/min y 150ml/min. Lavar el mecanismo de alimentación con solvente limpio mientras la centrífuga está encendida hasta que el efluente se presente incoloro. Detener la centrífuga, retirar la taza y limpiar su exterior con solvente. Evaporar el solvente residual en un embudo o campana y secar el recipiente al horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , enfriar el recipiente y determinar su masa; registrar este incremento como  $W_4$ .

### 3.2.17.5 Cálculos

A más de lo descrito en los numerales anteriores, el ensayo requiere la determinación del contenido de asfalto mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \left[ \frac{(W_1 - W_2) - (W_3 + W_4)}{(W_1 - W_2)} \right] * 100$$

En donde:

$W_1$  – masa de a porción de ensayo.

$W_2$  – masa del agua en la porción de ensayo.

$W_3$  – masa del agregado mineral extraído.

$W_4$  – masa del material mineral en el extracto.

### 3.2.17.6 Informe de resultados

Esta parte contendrá todos los datos referentes a la correcta identificación de la muestra, laboratorio, laboratorista, fecha de muestreo y ensayo, datos obtenidos mediante los cálculos y todos los datos necesarios para la correcta interpretación de resultados por parte del lector.

## **CAPÍTULO 4: Análisis de resultados. Comparación de normas**

En el presente capítulo se describen las similitudes más importantes y todas las diferencias localizadas al realizar un análisis comparativo, entre los ensayos ejecutados y requerimientos de calidad, a través de la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) y la norma del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS-13).

## 4.1 Granulometría

Al comparar el alcance en cuanto a granulometría de la norma NTE INEN del Instituto Ecuatoriano de Normalización y la norma INV E-123-13 del (Instituto Nacional de Vías - Colombia, 2013), las dos son similares, ya que la ejecución del ensayo con cualquiera de estas, cubre partículas cuyo tamaño mínimo les permita atravesar el tamiz de 75 $\mu$ m (tamiz N°200).

En cuanto a los equipos mencionados en las normas, se observa mayor precisión con la aplicación de la norma del (Instituto Nacional de Vías - Colombia, 2013), ya que la misma indica que se requerirá el uso de una balanza con sensibilidad de 0.01g para el material pasante del tamiz de 2mm (comparado con la precisión de 0.1g o el 0.1% (la mayor) de la muestra requerida por la norma ecuatoriana) y otra cuya sensibilidad sea del 0.1% del peso de la muestra para la medición de masa del material retenido en el tamiz de 2mm (comparado con la precisión de 0.5g o 0.1% de la masa de la muestra (la mayor) en la norma NTE INEN.

Comparando los tamices utilizados entre las dos normas, se observa cierta diferencia, misma que se presenta en la siguiente tabla:

Tamiz INEN (NEVI-12)	Tamiz I.N.V.E (INVIAS)
<b>Agregado grueso</b>	
75mm (3plg)	75mm (3plg)
53mm (2.12plg)	50mm (2plg)
37.5mm (1 1/2plg)	37.5mm (1 1/2plg)
26.5mm (1plg)	25mm (1plg)
19mm (3/4plg)	19mm (3/4plg)
13.2mm (1/2plg)	13.2mm (1/2plg)
9.5mm (3/8plg)	9.5mm (3/8plg)
4.75mm (N°4)	4.75mm (N°4)
Pasa 4.75mm	Pasa 4.75mm
<b>Agregado fino</b>	
4.75mm (N°4)	---
2.36mm (N°8)	---
2.00mm (N°10)	2.00mm (N°10)

1.18mm (N°16)	---
850 $\mu$ m (N°20)	850 $\mu$ m (N°20)
600 $\mu$ m (N°30)	---
425 $\mu$ m (N°40)	425 $\mu$ m (N°40)
300 $\mu$ m (N°50)	---
250 $\mu$ m (N°60)	250 $\mu$ m (N°60)
150 $\mu$ m (N°100)	106 $\mu$ m (N°140)
75 $\mu$ m (N°200)	75 $\mu$ m (N°200)
Pasa 75 $\mu$ m	Pasa 75 $\mu$ m

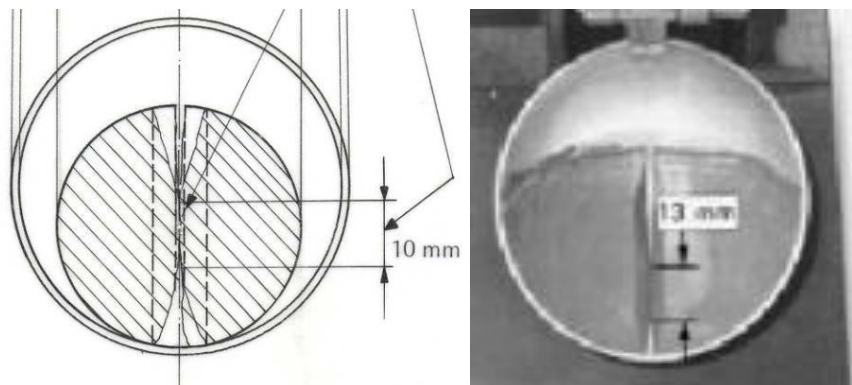
Tabla 71. Comparación de tamices utilizados en la norma ecuatoriana vs la norma colombiana.

Como se observa, el análisis granulométrico requerido por la norma ecuatoriana, es más detallado que el solicitado por la norma colombiana, ya que se utilizan un número mayor de tamices. Para el caso de la norma ecuatoriana, se analizan por separado los materiales más grandes del tamiz de 4.75mm (agregado grueso) de los materiales que pasan el tamiz de 4.75mm (agregado fino); comparado esto con la norma colombiana, existe diferencia ya que en esta última, se analizan por separado los materiales más grandes que el tamiz de 2mm y los materiales más pequeños que el tamiz de 2mm.

## 4.2 Límite Líquido

Comparando la norma NEVI-12 y la norma INVIAS, se puede observar la primera diferencia entre las dos en la toma de muestras, ya que para los dos casos, se utiliza material pasante del tamiz de  $450\mu\text{m}$ , pero para el uso de la norma ecuatoriana es necesaria una masa de 250g, mientras que para la norma INV E-125-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) se requiere una masa entre 150g y 200g.

Una nueva diferencia entre la norma ecuatoriana y la colombiana, trata sobre el contacto de las dos mitades de muestra sobre la cazuela una vez que se inician los golpes; la norma ecuatoriana indica que se buscará un rango de golpes entre 35 y 45 que genere el contacto de 10mm entre las dos partes, mientras que la norma colombiana en su primer método, busca generar un contacto de 13mm entre las dos partes con un número de golpes entre 25 y 35 y en su método segundo, se busca precisar la unión con un número entre 20 y 30 golpes.



*Ilustración 30. Diferencia de cierre de ranura en el ensayo de LL para las normas ecuatoriana y colombiana.*

Para el caso de los cálculos pertinentes para la determinación del Límite Líquido, en la norma ecuatoriana se especifica que dicho valor se obtiene mediante interpolación de la curva de flujo graficada en escala semilogarítmica entre los diferentes contenidos de agua versus el número de

golpes; por su parte la norma colombiana indica que el cálculo del Límite Líquido se basa en la aplicación de una de las siguientes ecuaciones:

$$LL_N = W_N * \left[ \frac{N}{25} \right]^{0.121}$$

$$LL_N = K * W_N$$

En donde:

$LL_N$  – Límite Líquido a partir de un punto, para un tanteo, %

$N$  – número de golpes para que se cierre la ranura en un tanteo

$W_N$  – contenido de agua para un tanteo

$K$  – factor de corrección

Número de golpes, N	Factor de corrección, K
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Tabla 72. Factor de corrección para el cálculo de LL. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

### 4.3 Índice de Plasticidad

Primeramente, se localiza una diferencia en cuanto a la toma de muestras, ya que la norma ecuatoriana indica que cuando se requiera calcular el LL, se tomará una muestra de aproximadamente 100g de material pasante del tamiz N°40; se indica también que cuando se requiera la determinación de LL e IP, la muestra será de aproximadamente 30g. Esto comparado con la norma INV E-126-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), tiene cierta diferencia, ya que esta última indica en sus enunciados que si el ensayo consta de la determinación de LL solamente, la muestra se conformará por una masa de aproximadamente 20g, mientras que si se necesita el cálculo de LL e IP la muestra total será de aproximadamente 15g; para ambos casos se utiliza material pasante del tamiz N°40.

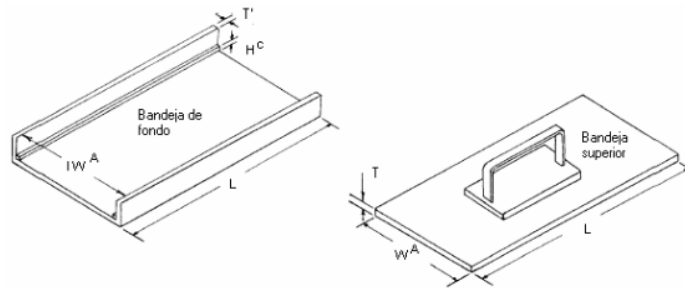
Una nueva diferencia se observa en el procedimiento del ensayo, ya que para el caso de la norma ecuatoriana se requiere tomar un aproximado de 10g para iniciar con este, mientras que en el caso de la norma colombiana se requiere una muestra entre 1.5g y 2.0g.

En cuanto a las características del rollo, la norma ecuatoriana indica que el rolado deberá permitir conseguir un rollo con diámetro de 3mm; por el otro lado, la norma colombiana dicta que el diámetro necesario para el rollo será de 3.2mm.

Al momento de formar el rollo que se especifica en las dos normas, la norma ecuatoriana especifica que el mismo se formará con un mínimo de 5 y un máximo de 15 movimientos o giros de adelante hacia atrás; la norma colombiana por su parte, indica que no importa el número giros siempre y cuando el rollo de 3mm de diámetro se forme en un tiempo inferior a 2 minutos.

La norma I.N.V.E-126-07 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) presenta un procedimiento alternativo para la formación del rollo de 3.2mm de diámetro, para el cual se utiliza

un aparato de enrollamiento formado por dos bandejas; la muestra se coloca sobre la bandeja de fondo y con la bandeja superior (en contacto con los rieles) se hace girar la muestra hacia atrás y adelante por 2 minutos. En la norma ecuatoriana este método no se presenta.



*Ilustración 31. Aparato de enrollamiento para ensayo de determinación del LP e IP. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)*

#### 4.4 Índice de Vacíos

Al hablar del índice de vacíos, la única diferencia localizada en la comparación de las normas NTE INEN 858:2010 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) y la norma I.N.V.E-217-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), aunque poco notable se encuentra en la sección de calibración de los moldes; la norma ecuatoriana y la norma colombiana presentan una tabla de densidades en función de la temperatura del agua; seguidamente se muestra una tabla en donde se indica esta diferencia:

Temperatura, °C	Densidad NEVI-12, kg/m <sup>3</sup>	Densidad INVIAS-13, kg/m <sup>3</sup>
15.0	999.19	
15.6		999.01
17.0	998.86	
18.3		998.54
19.0	998.46	
21.0	998.08	
21.1		997.97
23.0	997.62	997.54
23.9		997.32
25.0	997.62	
26.7		996.59
27.0	996.59	
29.0	996.02	
29.4		995.83
31.0	995.41	

## 4.5 Adherencia

La norma ecuatoriana basa el análisis de adherencia en un ensayo descrito por ASTM. Citando la norma ASTM 3625-96 de (ASTM International, 2001), se menciona que el muestreo puede realizarse directamente de la planta de producción (obteniendo una muestra representativa de la mezcla asfáltica sin compactar) o a su vez, la mezcla asfáltica puede ser preparada en laboratorio. En el caso de la norma INV E-740-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), se indica que la preparación de la muestra se hará específicamente en el laboratorio mediante la obtención de 50 partículas representativas de árido grueso de la fracción entre 12.5mm y 9.5mm (1/2plg y 3/8plg) y 100ml de emulsión asfáltica; dicha preparación inicia con el secado de los agregados al horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta que la masa se presente constante y continua con el vertimiento de la emulsión asfáltica (a una temperatura entre  $50^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ ) en una bandeja limpia y seca; las partículas se colocan una por una y de manera uniforme en la bandeja que contiene la emulsión asfáltica, se deja reposar por 30 minutos y posteriormente se coloca la bandeja al horno a una temperatura de  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  por un período de tiempo de 24 horas. Cumplido este tiempo, la muestra se retira del horno y se sumerge en agua destilada a  $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por cuatro días.

En cuanto al desarrollo del ensayo, la norma colombiana presenta gran diferencia en comparación con la norma ecuatoriana. El (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) indica que: una vez transcurridos los 4 días, la temperatura del agua deberá reducirse y mantenerse en  $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por una hora; posterior a esto, se extraen uno por uno los agregados para finalmente evaluarlos visualmente.

Una diferencia que indica que la aplicación de la norma colombiana podría generar resultados más precisos que la aplicación de la norma ecuatoriana, es el hecho de que en la primera mediante observación, se pueden identificar partículas de tres tipos: Completamente descubiertas (menos

del 25% de la superficie del agregado está cubierto por material bituminoso), Parcialmente descubiertas (entre el 25% y 75% de la superficie del agregado está cubierto por ligante) y Cubiertas (más del 75% de la superficie del agregado se encuentra rodeada por el material bituminoso). Al analizar los resultados obtenidos a través de la norma ecuatoriana, su análisis visual no brinda ninguna clasificación sino más bien indica que si las partículas se presentan con un recubrimiento delgado, translúcido y pardusco, la partícula se considera completamente recubierta.

#### 4.6 Partículas Planas, Alargadas o Planas y Alargadas

Para este ensayo, la norma ecuatoriana indica que su desarrollo se basa en la norma ASTM D 4791 de (ASTM International, 2010). En el caso de la norma INV E-240-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), no se especifica una base o referencia para su desarrollo, pero al comparar estas dos se identifican los mismos equipos, tipos de muestreo, procedimientos, y resultados, por lo que se sobreentiende que la norma colombiana y la norma ecuatoriana se basan en la misma norma ASTM, por lo tanto se establece que entre éstas no habrá diferencias durante su aplicación.

## 4.7 Partículas Fracturadas

### 4.7.1 Agregado fino

Al hablar de los agregados finos, la norma ecuatoriana indica que su determinación de caras fracturadas se realiza con la ejecución del ensayo descrito en ASTM C 1252-03 de (ASTM International, 2003); para el caso de la norma colombiana, dicho análisis se basa en la norma INV E-239-13 del (Instituto de Vías de Colombia, 2013). En las dos normas mencionadas se describen los procedimientos de ensayo mediante tres métodos; su comparación indica las mismas características para cada uno de estos.

De igual forma, se registra el mismo procedimiento de calibración de equipos para las dos normas.

Una diferencia se observa en la elaboración de la muestra que se utilizará en el método de ensayo B. Para el caso de la norma ecuatoriana (basada en ASTM), el método requiere una muestra con masa igual a 190g para cada fracción de tamaño comprendida entre los tamices N°8 (2.36mm) y N°100 (150 $\mu$ m), mientras que para el caso de la norma colombiana, se requiere igual cantidad (190g) de masa para cada fracción, pero en esta última norma, el tamaño más pequeño será el representado por el tamiz N°50 (300 $\mu$ m).

Si se habla del método de ensayo C, la norma ecuatoriana establece que la muestra se formará por las partículas comprendidas entre los tamices N°16 (1.18mm) y N°100 (150 $\mu$ m) y no se menciona una masa específica; la norma colombiana en este caso indica que la muestra se formará por una masa de 190g  $\pm$ 1g de material que atraviesa la malla N°4 (4.75mm). Es importante mencionar que aunque la toma de muestras se presente diferente, el procedimiento de ensayo es el mismo tanto en la norma ecuatoriana como en la norma colombiana.

#### 4.7.2 Agregado grueso

Para el análisis de caras fracturadas en el agregado grueso, la norma ecuatoriana basa su ensayo en ASTM D 5821-95 de (ASTM International, 1995) mientras que la norma colombiana a aplicar para este ensayo es la norma INV E-227-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

La primera diferencia se observa en el requerimiento de tamices para la ejecución del ensayo, ya que la norma colombiana utiliza un número mayor de estos en comparación con la norma ecuatoriana. Esto se presenta en la tabla siguiente:

Tamiz requerido	INVIAS-13	NEVI-12
90.0mm	X	
75.0mm	X	
63.0mm	X	
50.0mm	X	
37.5mm	X	X
25.0mm	X	X
19.0mm	X	X
12.5mm	X	X
9.5mm	X	X

Tabla 73. Tamices requeridos en el ensayo de caras fracturadas. Comparación entre norma colombiana y ecuatoriana.  
Fuente: el autor

La comparación presenta diferencias también al momento de la determinación de la masa de la muestra. La siguiente tabla muestra dicha diferencia:

Tamiz	Masa (g) INVIAS-13	Masa (g) NEVI-12
90.0mm	90000	---
75.0mm	60000	---
63.0mm	30000	---
50.0mm	15000	---
37.5mm	7500	2500
25.0mm	3000	2000
19.0mm	1500	1500
12.5mm	500	1200
9.5mm	200	300

Tabla 74. Comparación de requerimientos de masa para la norma ecuatoriana y colombiana en el ensayo de determinación de caras fracturadas. Fuente: el autor.

En cuanto al desarrollo del ensayo y a los cálculos necesarios para la determinación del porcentaje de caras fracturadas, las dos normas analizadas presentan las mismas características y cumplen con los mismos requisitos.

## 4.8 Equivalente de Arena

La determinación del equivalente de arena mediante la norma ecuatoriana se basa en la norma ASTM D 2419-02, mientras que para el caso de la norma colombiana, se aplica el ensayo descrito por INV E-133-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013). La primera diferencia se observa en las especificaciones de calidad de los reactivos usados para el ensayo, ya que la norma colombiana indica que para obtener resultados verídicos, se deberá remover (en caso de existir) los cultivos de hongos presentes en la solución de cloruro de calcio así como en los tubos que se utilizan en la ejecución del ensayo<sup>35</sup>. La norma ecuatoriana no establece ninguna indicación de este tipo.

Al hablar de los equipos e insumos utilizados en los ensayos, se observa que para el caso del cilindro graduado, la norma ecuatoriana no establece ningún tipo de medidas con las que se deba cumplir; la norma colombiana por su parte indica que el cilindro deberá tener un diámetro interior de  $31.75\text{mm} \pm 0.381\text{mm}$  y una altura aproximada de 430mm. Se indica también que la graduación se presentará a intervalos de 2.54mm desde el fondo del recipiente hasta la altura de 381mm del mismo; finalmente, la base del cilindro deberá ser cuadrada de plástico transparente, y sus dimensiones serán de 102mm por cada lado con un espesor de 12.7mm.

En cuanto a la preparación de la solución Stock, tanto la norma ecuatoriana como la norma colombiana indican una preparación idéntica. La misma situación se observa en la preparación de la solución de trabajo de cloruro de calcio.

Hablando de la preparación de las muestras, existen dos métodos para aquello. Comparando cada uno de estos métodos, descritos en la norma ecuatoriana con los métodos descritos en la

---

<sup>35</sup> Esta remoción se efectúa con el uso de un solvente limpiador (cloro doméstico) en agua en relación 1:1.

norma colombiana, se observa total similitud entre ellos en cuanto a masas, tiempos, preparación, etc.

Una pequeña diferencia entre las dos normas se observa en la cantidad de cloruro de calcio que se ingresa al cilindro graduado, ya que para el caso de la norma ecuatoriana, el sifonado debe permitir su paso hasta llegar a la altura de  $102\text{mm} \pm 3\text{mm}$  en el cilindro graduado. Comparado lo anteriormente mencionado con los requisitos de la norma colombiana, se observa que esta última, el volumen de cloruro sifonado deberá cubrir una altura de  $101.6\text{mm} \pm 2.54\text{mm}$ . En lo que a la ejecución del ensayo y a los cálculos se refiere, los dos casos constan de las mismas indicaciones.

#### 4.9 Relación Soporte de California (CBR)

El ensayo de CBR para la norma ecuatoriana se describe a través del método definido por ASTM D 1833, mientras que para la norma colombiana se describe en la norma INV E-148-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013). La primera diferencia localizada trata del hecho de que para el desarrollo del ensayo mediante la norma ecuatoriana se requiere el uso de tamices de 4.75mm (N°4), 19.0mm (3/4 plg) y 50.80mm (2plg); comparado con la norma colombiana, esta última indica que la ejecución del ensayo bastará con el uso de tamices de 4.75mm (°N4) y 19.0mm (3/4plg).

Todo el procedimiento del ensayo resulta similar con la aplicación de las dos normas. Una diferencia insignificante se observa durante el proceso de penetración de las probetas ya que, la norma ecuatoriana indica que para asegurar el pistón en su posición se aplicará una carga de 50N mientras que la norma colombiana indica que para lograr este mismo efecto se aplicará una carga de 44N sobre la probeta ensayada.

Si para la ejecución del ensayo de penetración no se posee una prensa automática que permita controlar la velocidad, las lecturas del deformímetro de penetración se tomarán con un cronómetro en los puntos indicados en la siguiente tabla:

NEVI-12		INVIAS-13	
mm	plg	mm	plg
0.63	0.025	0.64	0.025
1.27	0.050	1.27	0.050
1.90	0.075	1.91	0.075
2.54	0.100	2.54	0.100
3.17	0.125	3.18	0.125
3.81	0.150	3.81	0.150
---	---	4.45	0.200
5.08	0.200	5.08	0.200
7.62	0.300	7.62	0.300
10.16	0.400	10.16	0.400
12.70	0.500	12.70	0.500

Tabla 75. Puntos de control de penetración en ensayo CBR. Comparación de normas ecuatoriana y colombiana. Fuente: el autor

Una diferencia entre las dos normas se localiza al momento de calcular la humedad una vez que el ensayo haya terminado. La norma ecuatoriana indica que la muestra para su determinación (no indica una cantidad de masa determinada) se tomará de la zona contigua al sitio en el que se realizó la penetración, mientras que la norma colombiana indica que la muestra será de al menos 100g, tomada de los 25mm superiores a la zona próxima en donde se realizó la penetración.

Al momento de comparar los cálculos realizados en cada norma, se puede mencionar que en el caso de la norma ecuatoriana se indican: una fórmula para el cálculo del porcentaje de agua requerido para la compactación de la muestra, una fórmula para el cálculo del agua absorbida y un método para la determinación de la presión de penetración, datos de los que carece la norma colombiana.

Un punto a favor de la norma INV E-148-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), es el hecho de que contiene especificaciones para la determinación de: “CBR de diseño para un solo contenido de humedad (humedad óptima)”, el cual nace de la gráfica de la curva peso unitario seco (o densidad seca) versus CBR<sup>36</sup>; “CBR de diseño para un rango de contenidos de humedad”, procedente de las gráficas de las curvas de compactación y de humedad de compactación versus CBR corregido para varios puntos de humedad.

Dos fórmulas presentes en la norma colombiana, ausentes en la ecuatoriana, consisten en las encargadas de determinar la densidad seca del cilindro antes de la sumersión y la masa seca del suelo al ser compactado en el molde. Las fórmulas se presentan a continuación:

$$\rho_d = \frac{M_{sac}}{V_m}$$

---

<sup>36</sup> El CBR de diseño se determina a través del porcentaje deseado de peso unitario seco máximo (generalmente este valor corresponde al porcentaje mínimo especificado para el control en obra)

$$M_{sac} = \frac{M_{mws} - M_m}{(1 + W_{ac})}$$

En donde:

$\rho_d$  – densidad seca del cilindro antes de la inmersión

$M_{sac}$  – masa seca del suelo al ser compactado en el molde, en Mg o g

$M_{mws}$  – masa húmeda del suelo compactado más la masa del molde, en Mg o g

$M_m$  – masa del molde, en Mg o g

$W_{ac}$  – contenido de agua de porciones representativas tomadas durante el proceso de compactación de cada cilindro

$V_m$  – volumen del cilindro compactado en el molde, en m<sup>3</sup> o cm<sup>3</sup>.

#### 4.10 Prueba Marshall

La prueba Marshall para el caso de la norma ecuatoriana se basa en la norma MTC E 513 del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) mientras que para el caso de la norma colombiana, se utilizará para la ejecución del ensayo, las indicaciones de INV E-748-13 del (Instituto de Vías de Colombia, 2013).

Con la comparación de estas dos normas se puede observar total similitud en cuanto a la importancia del método de ensayo y los equipos utilizados, pero al hablar de la preparación de la muestra, la norma colombiana es más detallada. Una característica indicada en la norma colombiana que no se presenta en la ecuatoriana, es el hecho de que se deberán preparar probetas con diferentes contenidos asfálticos, incrementando 0.5% en cada mezcla con el fin de obtener una gráfica de la curva de determinación de contenido óptimo de asfalto.

Antes de formar la mezcla asfáltica, los agregados deberán ser preparados, secados a una temperatura entre 105°C y 110°C hasta lograr una masa constante y posteriormente separados en fracciones. Las normas estudiadas en el presente documento varían en cuanto a estas fracciones como se presenta a continuación:

Fracciones en mm (NEVI-12)	Fracciones en mm (INVIAS-13)
25 a 19	25 a 19
19 a 12.5	19 a 9.5
12.5 a 9.5	---
9.5 a 4.75	9.5 a 4.75
4.75 a 2.36	4.75 a 2.36
Pasa el tamiz de 2.36	Pasa el tamiz de 2.36

Tabla 76. Comparación de fracciones mínimas requeridas para la prueba Marshall. Fuente: el autor

La tabla anterior indica que para el caso de la norma colombiana se utiliza una fracción menos que en la norma ecuatoriana ya que en la primera no se toma en consideración la fracción entre 12.5mm y 9.5mm.

En el caso de la norma MTC E 513, se especifica una masa de 1200g por cada probeta para su preparación; la norma INV E-748-13 indica que se requieren aproximadamente 1200g de ingredientes por cada probeta que se pretenda preparar. Debido a que se preparan muestras con diferentes contenidos de asfalto y por cada contenido se elaboran 3 probetas, la cantidad total de material requerida será de aproximadamente 23kg de agregado y alrededor de 4 litros de cemento asfáltico.

Se localiza una diferencia entre las normas en estudio al analizar que en el caso de la norma ecuatoriana, se especifican los procedimientos para el ensayo de dos tipos de mezclas (mezclas con asfaltos Cutback y mezclas de pavimentación recompactadas), mientras que para el caso de la norma colombiana, la misma se centra en un solo tipo de mezcla (cemento asfáltico y breá).

La norma colombiana indica que el ensayo Marshall puede realizarse mediante dos métodos: Método A, utilizando un marco y anillo de carga y un dial que mide la deformación; Método B, utilizando un registrador de carga-deformación, una celda de carga y un dispositivo que permita la automatización del registro de la deformación. El (Instituto de Vías de Colombia, 2013) indica que si el método A es aplicado, el flujo será la deformación que el dial marca cuando la probeta falla, mientras que si se emplea el método B, el ensayo termina cuando la celda de carga indica velocidad progresiva descendiente en su carga (deformación constante). Para el método B, el flujo se identifica como la deformación total de la probeta, medida desde el punto en donde se obtiene una tangente lineal proyectada de la curva cortando el eje “x” hasta el punto en el que la deformación empieza a convertirse en horizontal.

#### 4.11 Desgaste de los Ángeles

El desgaste de los ángeles se determina mediante dos ensayos: ensayo de los agregados con tamaños menores de 37.5mm (norma ecuatoriana NTE INEN 860 y norma colombiana INV E-218-13) y ensayo de los agregados con dimensiones mayores a 19.5mm (norma ecuatoriana NTE INEN 861 y norma colombiana INV E-219-13)

En primera instancia, se dice que para el análisis de agregados de tamaños menores a 37.5mm y agregados de tamaños superiores a 19.5mm, para la aplicación de las normas ecuatorianas y colombianas, los equipos requeridos son completamente similares y cumplen con las mismas características y especificaciones.

En cuanto a la masa de la muestra separada en fracciones en función de la granulometría del agregado, comparando lo descrito por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) en la norma NTE INEN 860 y por (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) en su norma INV E-218-13, la tabla presentada en el numeral 3.2.11.3 del presente documento aplica para ambos casos, es decir, que entre las dos normas no existe diferencia alguna para este punto. Lo mismo sucede con la norma NTE INEN 861 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) y la norma INV E-219-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

La comparación de las dos normas ecuatorianas y las dos normas colombianas mencionadas en este ensayo, indican que la ejecución del mismo consta exactamente del mismo procedimiento, tanto en el ensayo como en los cálculos, por lo que la aplicación de éstas generará los mismos resultados al ensayar una muestra constituida por fracciones iguales de material.

## 4.12 Densidad

La comparación del ensayo de densidad se realiza en dos partes: la primera aplicando la norma ecuatoriana NTE INEN 856:2010 del (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) en contraste con la norma colombiana INV E-222-11 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) y la segunda con la revisión de la norma ecuatoriana NTE INEN 857:2010 en comparación con la norma colombiana INV E-223-7 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

Para el caso de los agregados finos, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) y el (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), indican que los equipos e insumos requeridos para el desarrollo del ensayo, cumplirán con las mismas características para las dos normas. Lo que se mencionó referente a las características del equipo e insumos, ocurre también al comparar las normas ecuatoriana y colombiana encargadas de analizar los agregados gruesos.

La toma de muestras, tanto de agregado fino como de agregado grueso, sigue las mismas directrices dentro de la norma ecuatoriana como de la norma colombiana. De igual manera, el análisis comparativo entre las normas INV E-222-11 y NTE INEN 856:2010 indica que el procedimiento de ejecución del ensayo en el árido fino es el mismo para los dos casos.

Lo mencionado en el párrafo anterior ocurre también cuando se habla de áridos gruesos, es decir que la aplicación de cualquiera de las dos normas (INV E-223-7 y NTE INEN 857:2010) siguen las mismas indicaciones para el desarrollo del ensayo.

Finalmente al comparar: (1) lo descrito por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) en su norma NTE INEN 856:2010 con lo mencionado por (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013) en su norma INV E-222-11 y (2) lo establecido por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010) en su norma NTE INEN 857:2010 con lo mencionado por (Instituto Nacional de Vías de

Colombia, 2013) en su norma INV E-223-7, se observa que los cálculos realizados en las diferentes normas, son los mismos para cada par comparado; en el caso de la norma colombiana, las fórmulas utilizadas en los cálculos se presentan para su aplicación tanto en el Sistema Métrico Internacional como en el Sistema Métrico Inglés.

### 4.13 Inmersión - Compresión

Basados en lo mencionado por el (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) en la norma NEVI-12, los materiales deberán analizarse mediante la norma MTC E 518 del (Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú, 2016). En este numeral, la norma anteriormente mencionada será comparada con la norma INV E-738-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

Partiendo de la comparación entre los equipos e insumos, se observa que la norma colombiana, a más de los mencionados por la norma MTC E 518, requiere el uso de: termómetros con aproximación de  $0.5^{\circ}\text{C}$ , equipo para baño de aire capaz de mantener una temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y equipo para baño de agua con ajuste de temperatura de prueba capaz de mantener una temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Al hablar de la preparación de las muestras, procedimiento de ensayo y cálculos posteriores a los ensayos, la aplicación de las dos normas sigue las mismas indicaciones y cumple con las mismas características.

#### 4.14 Compactación

La norma ecuatoriana basa el ensayo de compactación en la aplicación de las indicaciones de la norma ASTM D-1557. Para el caso de la norma colombiana, el ensayo se basa en el desarrollo de la norma INV E-142-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

La comparación de los alcances de estos ensayos, muestra cierta diferencia en las dos normas. Para el caso de la norma ASTM D-1557, se especifican 4 métodos de ensayo mientras que para la norma INV E-142-13 se indican 3 métodos. A continuación se presentan dos tablas en donde se indican los mismos:

Método	Ø de molde	Capacidad de molde	Se ensaya:	Cantidad
A	101.6mm (4plg)	944cm <sup>3</sup> ±11cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz N°4	11kg (25lb)
B	152.4mm (6plg)	2124cm <sup>3</sup> ±25cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz N°4	23kg (50lb)
C	152.4mm (6plg)	2124cm <sup>3</sup> ±25cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz de 19mm (3/4plg)	23kg (50lb)
D	152.4mm (6plg)	2124cm <sup>3</sup> ±25cm <sup>3</sup>	Material que pasa el tamiz de 19mm (3/4plg), corregido por material que retiene el tamiz de 19mm (3/4plg)	23kg (50lb)

Tabla 77. Métodos de ensayo de compactación. Fuente: (ASTM International, 1991)

Método	Ø de molde	Se ensaya:	Capas
A	101.6mm (4plg)	Material que pasa el tamiz N°4	5
B	101.6mm (4plg)	Material que pasa el tamiz de 9.5mm	5
C	152.4mm (6plg)	Material que pasa el tamiz de 19mm	5

Tabla 78. Métodos de ensayo de compactación. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

Tal como se observa en los cuadros anteriores, existen diferencias marcadas en los métodos de cada norma a excepción de los métodos A y C. En el caso de la norma colombiana, se especifica que los métodos se usan para analizar muestras cuya composición tenga una cantidad inferior al

30% de partículas con tamaños superiores a 19.0mm y que no hayan pasado por el proceso de compactación anteriormente.

Si se analizan los equipos utilizados en el ensayo, la norma ASTM D-1557 indica que los moldes se acompañarán de un collar con altura aproximada de 50.8mm; por su parte la norma INV E-142-13 indica que dicho collar deberá tener una altura de alrededor de 60mm. En cuanto a las características de los moldes, las dos normas indican los mismos requerimientos.

En cuanto a los requisitos de las balanzas, la norma ASTM D-1557 indica que las balanzas deberán ser una con capacidad de 20kg con precisión de 1g y otra con capacidad de 1000g con precisión de 0.01g. La norma colombiana indica que la balanza de máxima capacidad será de 11.5kg y aproximación de 1g, mientras que la balanza de menor capacidad será de 1000g con precisión de 0.1g.

En lo que respecta a los tamices, la norma ecuatoriana (basada en ASTM) indica que se requiere el uso de tamices con aberturas de 75mm (3plg), 19mm (3/4plg) y 4.75mm (N°4); por su lado, la norma colombiana establece como tamices necesarios a los de aberturas iguales a 19mm (3/4plg), 9.5mm (3/8plg) y 4.75mm (N°4). La selección de los tamices influye en la preparación de la muestra.

En cuanto al muestreo, la norma ecuatoriana indica que se requiere una masa igual a 11kg para la aplicación del método A y una masa de 23kg para los métodos B, C o D; por otro lado, la norma colombiana especifica que se requiere una cantidad de aproximadamente 16kg de masa sin para los métodos A o B y una masa de alrededor de 29kg para el método C. Estas masas son secas, por lo que al momento de tomar la muestra de campo (muestra húmeda), la cantidad deberá ser superior.

Se observan diferencias en la preparación de las muestras tanto por vía húmeda como por vía seca al comparar las dos normas. La preparación de la muestra por la vía húmeda con la aplicación de la norma ecuatoriana parte tamizando la muestra por el tamiz de 19mm y el de 4.75mm mientras que para la norma colombiana se utilizará el tamiz de 4.75mm, de 9.5mm o de 19mm (en función del método a usar).

La norma ecuatoriana indica que se obtendrán al menos 4 especímenes con variaciones de humedad de 1.5% (dentro de estas variaciones estará incluida la humedad óptima para obtener un mínimo de 5 muestras); la norma colombiana indica que al total de la muestra se le secará al horno, se lavará en caso de que más del 0.5% de la masa total esté adherida a los agregados gruesos, se registra la masa seca y se determina la humedad. De igual manera que en la norma ecuatoriana, en la norma colombiana se indica que se prepararán al menos 4 especímenes, con la diferencia de que las variaciones de humedad serán de 2% (en las variaciones se deberá incluir la humedad óptima para tener un mínimo de 5 muestras).

En cuanto al proceso de curado descrito en el ensayo, la tabla siguiente presenta los requerimientos para la norma ecuatoriana; la norma colombiana describe similares necesidades, con la diferencia de que en lugar de 18 horas para los suelos ML, CL, OL, GC y SC, el curado será de 16 horas para estos y para el resto de suelos que no estén incluidos en las otras categorías.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Tiempo mínimo de reposo</b>
GW, GP, SW, SP	No requiere
GM, SM	3 horas
ML, CL, OL, GC, SC	18 horas
MH, CH, OH, PT	36 horas

Tabla 79. Requerimientos de curado para el ensayo de Compactación. Fuente: (ASTM International, 1991)

Al momento de la compactación, la norma ecuatoriana especifica que los golpes se realizarán a razón de 1 golpe por cada 1.4 segundos, lo que en velocidad representa un aproximado de 42 golpes por minuto. La norma colombiana por su parte, indica que la velocidad de golpe será de 25 golpes por minuto.

A más de las ecuaciones descritas por la norma ASTM D-1557, la norma colombiana presenta las siguientes:

a) Masa seca de la fracción de ensayo ( $M_{SFE}$ ):

$$M_{SFE} = \frac{M_{HFE}}{1 + \frac{W_{FE}}{100}}$$

En donde:

$M_{HFE}$  – masa húmeda de la fracción de ensayo.

$W_{FE}$  – Humedad de la fracción de ensayo.

b) Porcentaje de la fracción gruesa ( $P_{FG}$ ):

$$P_{FG} = \frac{M_{SFC}}{M_{SFC} + M_{SFE}}$$

En donde:

$M_{SFC}$  – masa seca de la fracción gruesa

c) Porcentaje de la fracción de ensayo ( $P_{FE}$ ):

$$P_{FE} = 100 - P_{FG}$$

d) Densidad húmeda de cada submuestra ( $\rho_H$ ):

$$\rho_H = K * \frac{M_T - M_{MD}}{V}$$

En donde:

$M_T$  – masa del suelo húmedo dentro del molde

$M_{MD}$  – masa del molde de compactación.

$V$  – volumen del molde

$K$  – constante de conversión:    1, para g/cm<sup>3</sup> y volumen en cm<sup>3</sup>  
   1000 para g/cm<sup>3</sup> y volumen en m<sup>3</sup>  
   0.001 para kg/cm<sup>3</sup> y volumen en m<sup>3</sup>  
   1000 para kg/cm<sup>3</sup> y volumen en cm<sup>3</sup>

e) Densidad seca de cada submuestra ( $\rho_d$ ):

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{W}{100}}$$

f) Peso unitario seco de cada submuestra ( $\gamma_d$ ):

$$\gamma_d = K_1 * \rho_d \quad \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$$

$$\gamma_d = K_2 * \rho_d \quad \left[ \frac{lbf}{pie^3} \right]$$

En donde:

$K_1$  – constante de conversión (0.0098066 para densidad en  $\text{kg/m}^3$  o 9.8066 para densidad en  $\text{g/cm}^3$ )

$K_2$  – constante de conversión (0.062428 para densidad en  $\text{kg/m}^3$  o 62.428 para densidad en  $\text{g/cm}^3$ )

g) Humedad de saturación ( $W_{sat}$ ):

$$W_{sat} = \frac{(\gamma_w * G_s) - \gamma_d}{\gamma_d * G_s} * 100$$

En donde:

$\gamma_w$  – peso unitario del agua a 20°C (9.789kN/m<sup>3</sup> o 62.32lbf/pie<sup>3</sup>)

$\gamma_d$  – peso unitario seco del suelo (kN/m<sup>3</sup> o lbf/pie<sup>3</sup>)

$G_s$  – gravedad específica del suelo

#### 4.15 Durabilidad

El ensayo de durabilidad para el caso de la norma ecuatoriana se basa en lo descrito por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011) en la norma NTE INEN 863:2011. La comparación de esta norma se realiza con la norma colombiana INV E-220-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013).

Iniciando la comparación con los equipos requeridos por cada norma, se indica que ni existe diferencia entre ellas. Cuando se haga referencia al análisis de la solución de sulfato de sodio, en el caso de la norma ecuatoriana se especifica las respectivas cantidades a usar para su creación, mientras que la norma colombiana, a pesar que utiliza los mismos componentes, no indica las cantidades necesarias de cada uno; no obstante, en las dos normas se presentan características de temperatura, tiempos y gravedad específica similares. Lo indicado anteriormente en la comparación del sulfato de sodio preparado por las dos normas, ocurre también si se analiza la preparación del sulfato de magnesio con cada una de las normas. La preparación de la solución de cloruro de bario sigue las mismas directrices en ambos casos.

En la parte del muestreo, las dos normas comparadas siguen las mismas indicaciones para el caso de los agregados finos; al hablar por otra parte de los agregados gruesos, cada norma establece su propia determinación de la masa necesaria para el ensayo en función de cada fracción que conforma la muestra. A continuación se presentan las tablas que indican lo mencionado:

Fracción	Tamaño de tamiz de aberturas cuadradas (en mm)	Masa (en g)
1	9.5 a 4.75	300 ±5
	19.0 a 9.5	1000 ±10
2	12.5 a 9.5	330 ±5
	19.0 a 12.5	670 ±10
	37.5 a 19.0	1500 ±50
3	25.0 a 19.0	500 ±30

	37.5 a 25.0	1000 ±50
	63.0 a 37.5	5000 ±300
4	50.0 a 37.5	2000 ±200
	63.0 a 50.0	3000 ±300
	75.0 a 63.0	7000 ±1000
	90.0 a 75.0	7000 ±1000
	100.0 a 90.0	7000 ±1000
5	75.0 a 63.0	7000 ±1000
	90.0 a 75.0	7000 ±1000
	100.0 a 90.0	7000 ±1000

Tabla 80. Pérdida en sulfato. Tamaño de la muestra al aplicar la norma ecuatoriana. Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Tamices, en mm	Masa, g	Composición del material
4.75 a 9.5	300 ±5	
9.5 a 19.0	1000 ±10	De 9.5mm a 12.5mm De 12.5mm a 19.5mm
19.0 a 37.5	1500 ±50	De 19.0mm a 25.0mm De 25.0mm a 37.5mm
37.5 a 63.0	5000 ±300	De 37.5mm a 50.0mm De 50.0mm a 63.0mm
63.0 a 75.0	7000 ±1000	
75.0 a 90.0	7000 ±1000	
90.0 a 100.0	7000 ±1000	

Tabla 81. Pérdida en sulfato. Tamaño de la muestra al aplicar la norma colombiana. Fuente: (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013)

Una vez definido el tamaño y composición de la muestra, se procede a ejecutar el ensayo. la comparación entre la norma ecuatoriana y la norma colombiana, indica que todos los pasos descritos para esto, se repiten en las dos normas sin presentar ninguna variación.

#### 4.16 Resistencia al Deslizamiento

El ensayo de resistencia al deslizamiento para el caso de la norma ecuatoriana, se basa en la norma MTC E 1004 del (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) y para la norma colombiana, dicho ensayo se ejecuta con la aplicación de INV E 792-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), las cuales indican los pasos a seguir para el cálculo del coeficiente de fricción entre un pavimento y la zapata contenida en el péndulo.

La descripción de los equipos e insumos necesarios para la ejecución del ensayo, se comparan en las dos normas, observando que en la descripción del péndulo, la norma colombiana indica que el mismo deberá tener la característica de poder ajustarse verticalmente a fin de obtener el contacto de  $125\text{mm} \pm 1.6\text{mm}$  de entre la zapata y la superficie ensayada para pruebas en superficies planas, mientras que para determinación de pulimento acelerado, el contacto será de 76mm a 78mm. La norma designada por NEVI-12 para ejecutar este ensayo no ofrece este dato ya que el ensayo de pulimento acelerado no se describe.

Si se compara la zapata, se puede observar una pequeña diferencia en cuanto a las medidas de la misma especificada en la norma MTC E 1004 y la norma INV E-792-13. Para el primer caso, se especifican dimensiones de longitud, ancho y espesor iguales a 76.2mm, 25.4mm y 6.5mm, respectivamente para cualquier ensayo; para el segundo caso, la longitud, ancho y espesor serán de 76mm, 25mm y 6mm, respectivamente para el ensayo en superficies planas, mientras que para el ensayo de pulimento acelerado sus dimensiones serán de 32mm de longitud, 25mm de ancho y 6mm de espesor.

La reglilla o regla regulada también tendrá sus diferencias, ya que como se mencionó, MTC E-1004 no describe el procedimiento para determinación de pulimento acelerado, entonces la regla regulada será de longitud igual a 177mm con marcas separadas entre si 127mm y una marca

interior próxima a la exterior, separadas entre sí 2.5mm. Para el caso de la norma INV E-792-13, la reglilla tendrá marcas que permitan determinar longitudes de 124mm a 127mm para el ensayo en superficies planas, mientras que para el ensayo de pulimento acelerado, las marcas permitirán registrar distancias entre 75mm y 78mm.

La norma base para ejecución del ensayo a través de NEVI-12, indica el procedimiento de muestreo utilizado solamente en campo, mientras por su lado, la norma colombiana presenta este procedimiento a más del necesario para la ejecución del ensayo en laboratorio. De igual manera que para ensayos en campo, la muestra de laboratorio deberá estar limpia, libre de partículas sueltas y sostenida firmemente para evitar su movimiento; deberán también ser planas, con una superficie de 89mm por 152mm en el caso del ensayo de superficies planas, mientras que para el ensayo de pulimento acelerado se requiere una superficie en arco (con diámetro de 406mm) de al menos 44mm por 89mm.

En cuanto a la calibración del equipo y el procedimiento de ensayo, las dos normas comparadas presentan las mismas características, es decir, el ensayo sigue las mismas directrices sin variaciones. Cabe mencionar que para el caso de la norma colombiana, el ensayo en una superficie plana y el ensayo de pulimento acelerado, se realizan bajo un mismo procedimiento, variando únicamente las medidas antes mencionadas.

En el caso de la presentación de resultados, la norma MTC E-1004 indica que se deberá realizar una corrección del coeficiente de deslizamiento para obtener uniformidad entre estos y poder presentar todos los resultados a una temperatura del agua igual a 20°C. Esto se logra con la utilización de una gráfica de temperatura versus coeficiente de corrección (ver ilustración 29). La norma colombiana no presenta esta corrección.

#### **4.17 Contenido de asfalto**

Debido a que en la Norma Ecuatoriana Vial no se especifica una norma en concreto para la ejecución de este ensayo, en el presente documento se describe este ensayo en base a lo mencionado por INV E-732-13 del (Instituto Nacional de Vías de Colombia, 2013), por lo cual resulta imposible realizar una comparación entre normas.

## **CAPÍTULO 5: Observaciones, Conclusiones y Anexos**

En este capítulo se presentan las respectivas observaciones y conclusiones a las que el desarrollo del presente documento condujo; se presentan además como anexos: datos necesarios para el diseño de pavimentos, tipos de suelo y estabilizadores y formatos recomendables para la presentación de resultados de ciertos ensayos.

## 5.1 Observaciones

Para un mejor entendimiento sobre el diseño de pavimentos flexibles, se recomienda obtener información directamente desde la norma “AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES” ya que la misma cuenta con varias recomendaciones de diseño que se deben tener en cuenta y que están en función tanto de los materiales a utilizar, así como de la zona en la que se planea construir.

Al hablar del ensayo de resistencia al deslizamiento se indicó que para su ejecución, la superficie del pavimento a ser ensayado deberá tener una temperatura entre 5°C y 40°C; si se analiza esta situación, se puede decir que el análisis no sirve para estudiar el comportamiento entre el vehículo y la superficie de rodadura cuando en esta última exista presencia de hielo o nieve. El número de puntos analizados dependerá de la longitud de la vía en estudio y de la utilidad que se les dará posteriormente a los resultados; si se pretende analizar el pavimento de una longitud superior a 5km, se recomienda ejecutar el ensayo a razón de 4 veces por cada kilómetro; si la longitud es menor a 5km, la recomendación indica realizar un ensayo por cada 100m. El (Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, 2016) recomienda ejecutar el ensayo en la sección de la vía por la que los vehículos dejan su huella, teniendo como prioridad las huellas externas (las más cercanas a los bordes externos de la vía).

Los equipos de laboratorio para un determinado ensayo, si bien son similares, dependiendo de cada productor y/o distribuidor, contarán con un manual específico cada uno en donde se indica todas las consideraciones a tener en cuenta para su uso, por lo que será muy importante que el usuario se asegure que conoce del funcionamiento del mismo, lo cual garantiza el buen estado de los productos.

La Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) basa el desarrollo de los ensayos de calidad a los materiales que forman cada una de las capas de un pavimento en las normas descritas en: NTE INEN del Instituto Ecuatoriano de Normalización, normas MTC E del Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú, normas AASHTO de la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transporte y normas ASTM de la Asociación Americana de Ensayo de Materiales.

## 5.2 Conclusiones

En primera instancia, en el documento se presentan las características generales y definiciones de los materiales granulares utilizados en la construcción de las diferentes capas de pavimento (base, subbase y materiales granulares y betún utilizado en la superficie de rodadura), así como sus requerimientos para lograr una estructura de pavimento durable, resistente, estable, etc., es decir, que cubra todos los requerimientos de diseño.

En este documento se presenta una sección dedicada a las indicaciones generales descritas en la “Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12)” en cuanto a lo que a diseño de pavimentos concierne, describiendo de manera general el método “AASHTO del año 1993” y la “Guía AASHTO para el diseño de Estructuras de Pavimentos”. Se presentan fórmulas y tablas con los datos necesarios para que los lectores tengan una guía base para cuando se pretenda diseñar una mezcla asfáltica.

El punto central de la elaboración de este documento, consiste en la descripción de los ensayos de calidad para los materiales utilizados en la construcción de pavimentos, por lo cual, para iniciar se presenta un método de diseño de mezclas asfálticas (el especificado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador), conjuntamente con la descripción de las diferentes capas de rodadura y los materiales utilizados en cada una.

Para el desarrollo correcto de los ensayos se requiere conocer el equipo e insumos que se utilizarán en el mismo, por lo que se presentó: la descripción, medidas de seguridad, instalación, calibración, entre otras características, de todos los equipos disponibles dentro del laboratorio de asfaltos de la Universidad Católica de Cuenca.

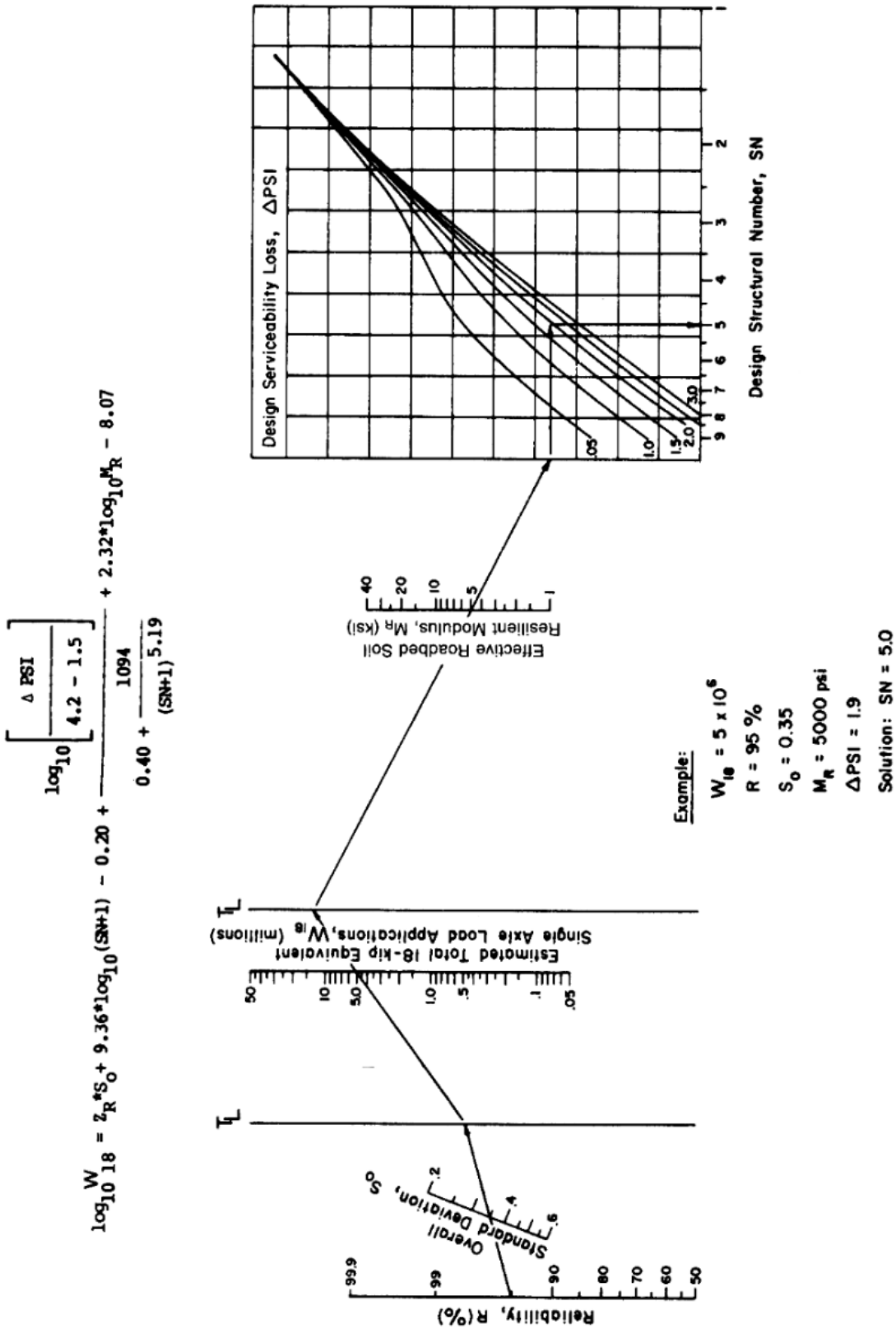
El cumplimiento de las indicaciones mencionadas en los puntos referentes a los equipos utilizados en los ensayos, permiten que dichos equipos e insumos no sufran daños y que funcionen de manera correcta y que por ende, los resultados de los ensayos sean confiables.

Cuando se trata de áridos granulares y el material bituminoso, las normas analizadas indican la metodología de muestreo utilizada en cada ensayo, lo cual fue descrito siguiendo los lineamientos e indicaciones pertinentes, que permitan que los resultados de los ensayos sean lo más posiblemente cercanos a la realidad.

En este documento se han presentado los diferentes ensayos que los materiales utilizados en la construcción de pavimentos requieren para la determinación de su calidad antes, durante o después de su puesta en obra. Dichos ensayos se basan principalmente en las normas “NTE INEN”, “MTC E”, “AASHTO” y “ASTM” (normas que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador indica, se deberán aplicar para la ejecución de los ensayos) y luego de su desarrollo fueron comparados con las normas “INV E” del “Instituto Nacional de Vías de Colombia”, localizando ciertas similitudes que merecen mención e identificando todas las diferencias al comparar el mismo ensayo con la aplicación de la norma colombiana y las normas indicadas a su vez por la Norma Ecuatoriana Vial.

Cada ensayo mencionado en el presente documento se describe paso a paso de manera detallada con el objetivo de que el lector logre ejecutarlos sin problema y de esta manera pueda obtener resultados satisfactorios y verídicos.

5.3 Anexos



Anexo a: Nomogramas de diseño básico para pavimentos flexibles. Fuente: AASHTO (1993)

ÁREA	CLASE DE SUELO (SUCS)	TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	RESTRICCIÓN EN LL Y IP DEL SUELO	RESTRICCIÓN EN EL PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA 200	OBSERVACIONES
1A	SW o SP	(1) Asfalto			
		(2) Cemento Pórtland			
		(3) Cal-Cemento-Cenizas Volantes	IP no excede de 25		
1B	SW-SM o SP-SM o SW-SC o SP-PC	(1) Asfalto	IP no excede de 10		
		(2) Cemento Pórtland	IP no excede de 30		
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas Volantes	IP no excede de 25		
1C	SM o SC o SM-SC	(1) Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	
		(2) Cemento Pórtland	(b)		
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas Volantes	IP no excede de 25		
2A	GW o GP	(1) Asfalto			Solamente material bien granulado
		(2) Cemento Pórtland			El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la malla N°4
		(3) Cal-Cemento-Cenizas Volantes	IP no excede de 25		
2B	GW-GM o GP-GM o GW-GC o GP-GC	(1) Asfalto	IP no excede de 10		Solamente material bien granulado
		(2) Cemento Pórtland	IP no excede de 30		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la malla N°4
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas Volantes	IP no excede de 25		
2C	GM o GC o GM-GC	(1) Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	Solamente material bien granulado
		(2) Cemento Pórtland	(b)		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la malla N°4
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas Volantes	IP no excede de 25		
3	CH o CL o MH o ML o OH o OL o ML-CL	(1) Cemento Pórtland	LL no menor de 40; IP no menor de 20		Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
		(2) Cal	IP no menor de 12		
IP	Índice plástico				
LL	Límite Líquido				
(b)	IP 20+(50 - porcentaje que pasa la malla N°200)/4				

Anexo b: Guía para la selección del tipo de estabilizador. Fuente: US Army Corps of Engineers


**ENSAYO DE GRANULOMETRÍA**



**Universidad  
Católica  
de Cuenca**

FECHA MUESTREO: \_\_\_\_\_  
 FECHA ENSAYO: \_\_\_\_\_  
 LABORATORIO: \_\_\_\_\_  
 NOM. LABORATORISTA: \_\_\_\_\_  
 ID. MUESTRA: \_\_\_\_\_  
 OBRA: \_\_\_\_\_

TAMIZ INEN (ASTM)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	% RETENIDO	% QUE PASA	% QUE PASA ESPECIFICADO
<b>GRAVA</b>					
75mm (3")					
53mm (2,12")					
37,5mm (1 1/2")					
26,5mm (1")					
19mm (3/4")					
13,2mm (1/2")					
9,5mm (3/8")					
4,75mm (N°4)					
Pasa 4,75mm					
Σ =					
<b>ARENA</b>					
4,75mm (N°4)					
2,36mm (N°8)					
2mm (N°10)					
1,18mm (N°16)					
850µm (N°20)					
600µm (N°30)					
425µm (N°40)					
300µm (N°50)					
250µm (N°60)					
150µm (N°100)					
75µm (N°200)					
Pasa 75µm					
Σ =					



**Universidad Católica de Cuenca**

**DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO**

LABORATORIO: \_\_\_\_\_

PROYECTO: \_\_\_\_\_

OBRA: \_\_\_\_\_

LOCALIZACIÓN: \_\_\_\_\_

MUESTRA N°: \_\_\_\_\_

PERFORACIÓN N°: \_\_\_\_\_

PROFUNDIDAD: \_\_\_\_\_

DESCRIPCIÓN: \_\_\_\_\_

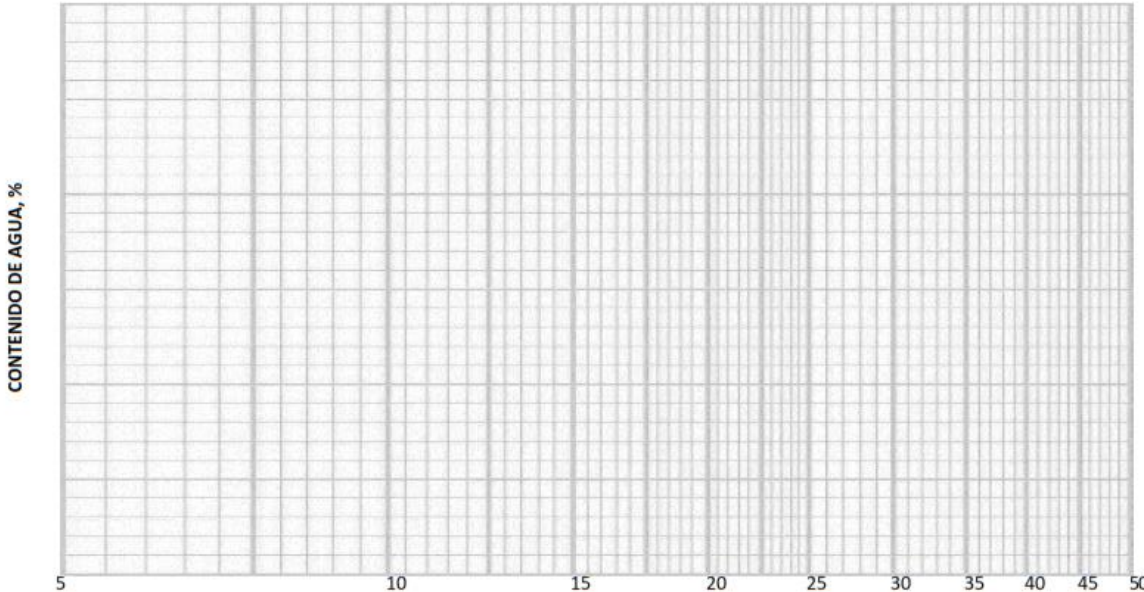
FECHA: \_\_\_\_\_ OPERADOR: \_\_\_\_\_ CALCULADOR: \_\_\_\_\_

ENSAYOS:           CONTENIDO DE AGUA:       LÍMITE LÍQUIDO:       LÍMITE PLÁSTICO:

CONDICIÓN DEL SUELO: \_\_\_\_\_

PERÍODO DE REPOSO: \_\_\_\_\_

ENSAYO N°	1	2	3	4	5	6	7	8
N° DE GOLPES	/							
RECIPIENTE N°								
MASA DEL RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO, g								
MASA DEL RECIPIENTE + SUELO SECO, g								
MASA DEL RECIPIENTE, g								
MASA DEL AGUA, g								
MASA DEL SUELO SECO, g								
CONTENIDO DE AGUA, %								



**NÚMERO DE GOLPES**

**RESULTADOS:**

LÍMITE LÍQUIDO,  $w_L$ : \_\_\_\_\_                      ÍNDICE DE TENACIDAD,  $I_t$ : \_\_\_\_\_

LÍMITE PLÁSTICO,  $w_p$ : \_\_\_\_\_                      ÍNDICE DE CONSISTENCIA,  $I_c$ : \_\_\_\_\_

ÍNDICE DE PLASTICIDAD,  $I_p$ : \_\_\_\_\_                      ÍNDICE DE LIQUIDEZ,  $I_L$ : \_\_\_\_\_

ÍNDICE DE FLUJO,  $I_f$ : \_\_\_\_\_                      CLASIFICACIÓN: \_\_\_\_\_

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Anexo d: Formato para presentación de resultados del ensayo de Límite Líquido

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD



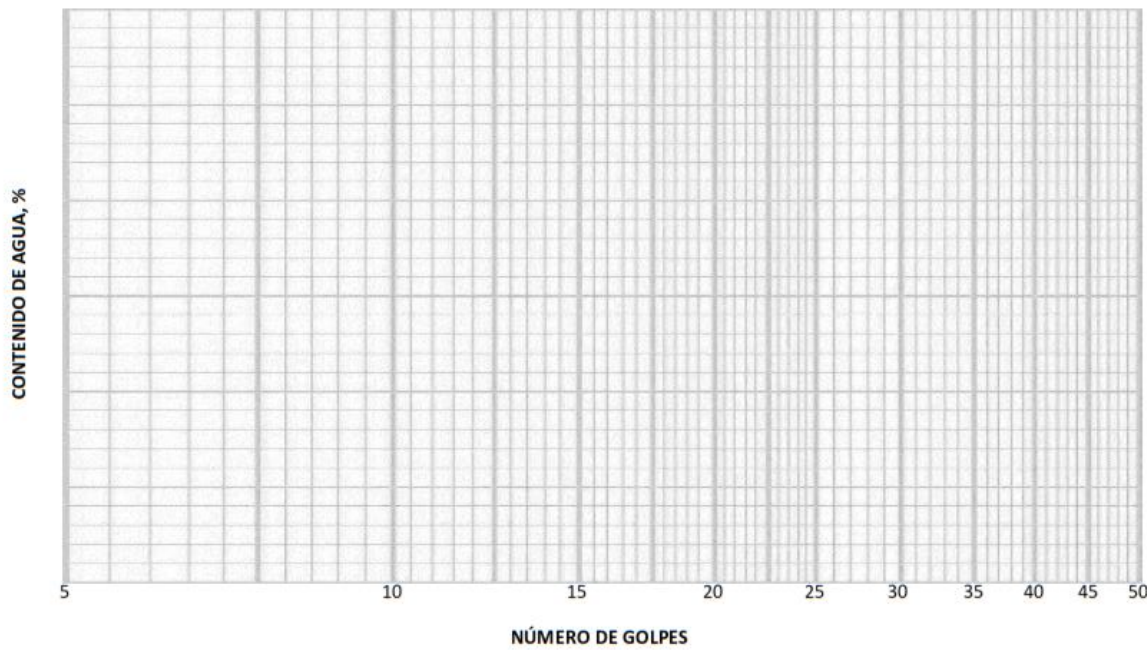
**Universidad Católica de Cuenca**

LABORATORIO: \_\_\_\_\_  
 PROYECTO: \_\_\_\_\_  
 OBRA: \_\_\_\_\_  
 LOCALIZACIÓN: \_\_\_\_\_  
 MUESTRA N°: \_\_\_\_\_  
 PERFORACIÓN N°: \_\_\_\_\_  
 PROFUNDIDAD: \_\_\_\_\_  
 DESCRIPCIÓN: \_\_\_\_\_

FECHA: \_\_\_\_\_ OPERADOR: \_\_\_\_\_ CALCULADOR: \_\_\_\_\_


ENSAYOS:           CONTENIDO DE AGUA:       LÍMITE LÍQUIDO:       LÍMITE PLÁSTICO:   
 CONDICIÓN DEL SUELO: \_\_\_\_\_  
 PERÍODO DE REPOSO: \_\_\_\_\_

ENSAYO N°	1	2	3	4	5	6	7	8
N° DE GOLPES								
RECIPIENTE N°								
MASA DEL RECIPIENTE + SUELO HÚMEDO, g								
MASA DEL RECIPIENTE + SUELO SECO, g								
MASA DEL RECIPIENTE, g								
MASA DEL AGUA, g								
MASA DEL SUELO SECO, g								
CONTENIDO DE AGUA, %								



**RESULTADOS:**           LÍMITE LÍQUIDO,  $w_L$ : \_\_\_\_\_  
                                   LÍMITE PLÁSTICO,  $w_p$ : \_\_\_\_\_  
                                   ÍNDICE DE PLASTICIDAD,  $I_p$ : \_\_\_\_\_  
                                   ÍNDICE DE FLUJO,  $I_f$ : \_\_\_\_\_  
                                   ÍNDICE DE TENACIDAD,  $I_t$ : \_\_\_\_\_  
                                   ÍNDICE DE CONSISTENCIA,  $I_c$ : \_\_\_\_\_  
                                   CLASIFICACIÓN: \_\_\_\_\_

Anexo e: Formato para presentación de resultados del ensayo de Índice de Plasticidad



**ENSAYO DE CLASIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD**

NOMBRE DEL LABORATORIO: \_\_\_\_\_

PROYECTO: \_\_\_\_\_ PROFUNDIDAD: \_\_\_\_\_

OBRA: \_\_\_\_\_ DESCRIPCIÓN: \_\_\_\_\_

LOCALIZACIÓN: \_\_\_\_\_

MUESTRA N°: \_\_\_\_\_ PERFORACIÓN: \_\_\_\_\_

FECHA: \_\_\_\_\_ OPERADOR: \_\_\_\_\_ CALCULADOR: \_\_\_\_\_

**ENSAYO DE CLASIFICACIÓN**

TAMIZ INEN (ASTM)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	% RETENIDO	% QUE PASA	% QUE PASA ESPECIFICADO
<b>GRANULOMETRÍA: GRAVA</b>					
75mm (3")					
53mm (2.12")					
37.5mm (1.1/2")					
26.5mm (1")					
19mm (3/4")					
13.2mm (1/2")					
9.5mm (3/8")					
4.75mm (N°4)					
Pasa 4.75mm					
Σ =					
<b>ARENA</b>					
4.75mm (N°4)					
2.36mm (N°8)					
2mm (N°10)					
1.18mm (N°16)					
850µm (N°20)					
600µm (N°30)					
425µm (N°40)					
300µm (N°50)					
250µm (N°60)					
150µm (N°100)					
75µm (N°200)					
Pasa 75µm					
Σ =					

**ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD**

Muestra N°	Recipiente N°	Número de golpes	Masa del recipiente + suelo húmedo	Masa del recipiente + suelo seco	Masa del recipiente	Masa del agua	Masa del suelo seco	Contenido de agua, %
<b>CONTENIDO DE AGUA</b>								
<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>								
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>								

CLASIFICACIÓN: \_\_\_\_\_

SUCS: \_\_\_\_\_

AAASHTO: \_\_\_\_\_

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

D10= \_\_\_\_\_ Cu= \_\_\_\_\_ Masa inicial= \_\_\_\_\_ B \_\_\_\_\_

D30= \_\_\_\_\_ Cc= \_\_\_\_\_ >75mm= \_\_\_\_\_ % \_\_\_\_\_

D60= \_\_\_\_\_ Grava= \_\_\_\_\_ % \_\_\_\_\_

Arena= \_\_\_\_\_ % \_\_\_\_\_

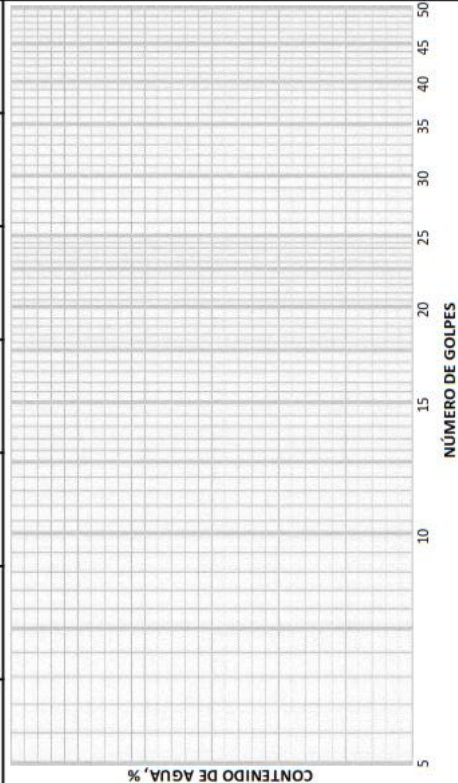
Finos= \_\_\_\_\_ % \_\_\_\_\_

W= \_\_\_\_\_ %

WL= \_\_\_\_\_ %

WP= \_\_\_\_\_ %

Ip= \_\_\_\_\_




CONTENIDO DE AGUA, %

NÚMERO DE GOLPES

Anexo f: Formato para presentación de resultados del ensayo de Granulometría e Índice de Plasticidad o Granulometría y Límite Líquido



<b>ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS Y PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS</b>				
  <b>Universidad Católica de Cuenca</b>	LABORATORIO: _____ PROYECTO: _____ OBRA: _____ LOCALIZACIÓN: _____ MUESTRA N° _____ FECHA MUESTREO: _____ DESCRIPCIÓN: _____ FECHA DE ENSAYO: _____ OPERADOR: _____ CALCULADOR: _____			
<b>ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS</b>				
<b>ENSAYO N°</b>	1	2	3	4
Peso inicial de la muestra, en g				
Peso final de la muestra, en g				
% de caras fracturadas				
<b>ENSAYO DE PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS</b>				
<b>ENSAYO N°</b>	1	2	3	4
Peso inicial de la muestra, en g				
Peso final de la muestra, en g				
% de partículas planas y alargadas				
Observaciones: _____ _____ _____ _____ _____ _____				

Anexo h: Formato recomendado para ensayo de caras fracturadas y partículas planas y alargadas de los agregados gruesos.

ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORDE DE CALIFORNIA (CBR)				
  <b>Universidad Católica de Cuenca</b>	LABORATORIO:	_____		
	PROYECTO:	_____		
	OBRA:	_____		
	LOCALIZACIÓN:	_____		
	MUESTRA N°	_____		
	FECHA MUESTREO:	_____		
	DESCRIPCIÓN:	_____		
	FECHA DE ENSAYO:	_____		
	OPERADOR:	_____		
	CALCULADOR:	_____		
<b>Ensayo Preliminar de Compactación Ensayo Proctor Modificado ASTM D 1557</b>				
Método	_____			
Máxima Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )	_____			
Contenido de Humedad Óptima (%)	_____			
<b>Compactación de moldes</b>				
<b>Molde N°</b>	I	II	III	
<b>N° de capas</b>				
<b>N° de golpes por capa</b>				
<b>Densidad Seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>				
<b>Contenido de Humedad (%)</b>				
Cuadro CBR para				
		0,1 plg	de penetración	
		0,2 plg		
<b>Molde N°</b>	<b>Penetración</b>	<b>Presión aplicada (lb/plg<sup>2</sup>)</b>	<b>Presión patrón (lb/plg<sup>2</sup>)</b>	<b>CBR</b>
I				
II				
III				
CBR para el 100% de la Máxima Densidad Seca: _____ %				
CBR para el 95% de la Máxima Densidad Seca: _____ %				
Expansión: _____ %				

Anexo i: Formato recomendado para la presentación de resultados del ensayo de Relación de Soporte de California (CBR). Se incluirán las gráficas mencionadas en el numeral 3.2.9.6

ENSAYO DE DURABILIDAD									
 <b>Universidad Católica de Cuenca</b>	LABORATORIO:	_____							
	PROYECTO:	_____							
	OBRA:	_____							
	LOCALIZACIÓN:	_____							
	MUESTRA N°:	_____							
	FECHA MUESTREO:	_____							
	SOLUCIÓN:	_____							
DESCRIPCIÓN:	_____								
FECHA ENSAYO: _____	OPERADOR: _____	CALCULADOR: _____							
Tamaño de las aberturas del tamiz	Gradación de la muestra original (%)	Masa de las fracciones de ensayo, antes del	Porcentaje que pasa el tamiz designado, luego	Porcentaje ponderado de pérdida (%)					
<b>Ensayo de desempeño del árido fino</b>									
Menor a 150µm									
de 300µm a 150µm									
de 600 µm a 300µm									
de 1,18mm a 600µm									
de 2,36mm a 1,18mm									
de 4,75mm a 2,36mm									
de 9,5mm a 4,75mm									
Totales									
<b>Ensayo de desempeño del árido grueso</b>									
de 63mm a 50mm	2825g	de 63mm a 37,5mm							
de 50mm a 37,5mm	1958g								
de 37,5mm a 25,0mm	1012g	de 37,5mm a 19,0mm							
de 25,0mm a 19,0mm	513g								
de 19,0mm a 12,5mm	675g	de 19,0mm a 9,5mm							
de 12,5mm a 9,5mm	333g								
de 9,5mm a 4,75mm									
Totales									
<b>EXAMEN CUALITATIVO DE PARTÍCULAS MAYORES A 19,0mm</b>									
Tamaño del tamiz	Partículas según el tipo de disgregación								Número de partículas antes del ensayo
	División		Desmoronamiento		Agrietamiento		Exfoliación		
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%	
63mm a 37,5mm									
37,5mm a 19,0mm									
<b>NOTAS Y DATOS:</b>									
_____									
_____									
_____									
_____									
_____									

Anexo j: Formato recomendable para el ensayo de durabilidad

## Referencias

- AASHTO. (1993). *Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos 1993*. Washington: AASHTO.
- AASHTO. (Noviembre de 2018). *AASHTO*. Obtenido de AASHTO: <https://www.transportation.org/>
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (Enero de 2016). *transportation.org*. Obtenido de [transportation.org](https://www.transportation.org/): [transportation.org](https://www.transportation.org/)
- ASTM International. (1987). *ASTM D 1833. Standard Test Method for Odor of Petroleum Wax*. Publicaciones ASTM.
- ASTM International. (1991). *ASTM D1557-91. Métodos de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo usando esfuerzo modificado (56000pie\*lb/ft<sup>3</sup>(2700kN\*m/m<sup>3</sup>))*. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM International. (1995). *ASTM D 5821-95. Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. West Conshohocken: Publicaciones ASTM.
- ASTM International. (2001). *ASTM D 3625-96. Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water*. Publicaciones ASTM.
- ASTM International. (2002). *ASTM D 2419-02. Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. Publicaciones ASTM.

ASTM International. (2003). *ASTM C 1252-03. Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. West Conshohocken: Publicaciones ASTM.

ASTM International. (2010). *ASTM D 4791-10. Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. Publicaciones ASTM.

Climate-Data.Org. (Diciembre de 2018). *Climate-Data.Org*. Obtenido de Climate-Data.Org:  
<https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-del-azuay/cuenca-875185/>

Cotecno. (2020). *Despachos Cotecno*. Obtenido de Despachos Cotecno:  
<https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/extractor-de-centrifuga-de-asfalto-a-prueba-de-explosiones-h-1451/>

EcuRed. (06 de Junio de 2018). *EcuRed*. Obtenido de EcuRed:  
[https://www.ecured.cu/Cuenca\\_\(Ecuador\)](https://www.ecured.cu/Cuenca_(Ecuador))

Heukelom, W., & Klomp, A. (1962). Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. *1st Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements*.

IGM. (12 de Junio de 2017). *Ministerio de Defensa Nacional*. Obtenido de Ministerio de Defensa Nacional: [http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?wpfb\\_dl=1](http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?wpfb_dl=1)

Instituto de Asfalto. (2005). *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas (MS-22)*. Lexington, Kentucky: Publicaciones del Instituto de Asfalto.

Instituto de Vías de Colombia. (2013). *INV E-239-13. Agregados Finos no Compactados (Influencia por la Forma de las Partículas, la Textura Superficial y la Granulometría)*.

Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto de Vías de Colombia. (2013). *INV E-748-13. Estabilidad y Flujo de Mezclas Asfálticas en Caliente Empleando el Equipo Marshall*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1981). *NTE INEN 691. Mecánica de suelos. Determinación del Límite Líquido. Método de Casagrande*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1981). *NTE INEN 692. Mecánica de suelos. Determinación del Límite Plástico*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1982). *NTE INEN 690. Mecánica de suelos. Determinación del contenido de agua. Método del secado al horno*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *NTE INEN 694:2010. Hormigón y Áridos para Elaborar Hormigón. Terminología*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *NTE INEN 695:2010. Áridos. Muestreo*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *NTE INEN 697:2010. Áridos. Determinación del material más fino que pasa el tamiz con aberturas de 75 $\mu$ m (N°200), mediante lavado*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *NTE INEN 856:2010. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del árido fino*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *NTE INEN 857:2010. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *NTE INEN 858:2010. Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumetrico) y el porcentaje de vacíos*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *NTE INEN 696:2011. Áridos. Análisis Granulométrico en los Áridos, Fino y Grueso*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *NTE INEN 860:2011. Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *NTE INEN 861:2011. Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas mayores a 19mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *NTE INEN 863:2011. Áridos. Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio*. Quito: Publicaciones INEN.

Instituto Nacional de Vías - Colombia. (2013). *INV E-123-13. Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías Colombia. (15 de Agosto de 2007). *INVIAS*. Obtenido de INVIAS:  
<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/987-manual-de-diseno-de-pavimentos-asfalticos-para-vias-con-bajos-volumenes-de-transito>

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *I.N.V.E-217-13. Densidad Bulk (Peso Unitario) y Porcentaje de Vacíos de los Agregados en Estado Suelto y Compacto*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-125-13. Determinación del Límite Líquido de los Suelos*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-126-13. Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-133-13. Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-142-13. Relaciones Humedad-Peso Unitario Seco en los Suelos (Ensayo Modificado de Compactación)*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-148-13. CBR de Suelos Compactados en el Laboratorio y Sobre Muestra Inalterada*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-218-13. Resistencia a la Degradación de los Agregados de Tamaños Menores de 37.5mm (1 1/2plg) por medio de la Máquina de los Ángeles*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *Inv E-219-13. Resistencia a la Degradación de los Agregados Gruesos de Tamaños Mayores de 19mm (3/4plg) por Abrasión e Impacto en la Máquina de los Ángeles*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-220-13. Solidez de los Agregados Frente a la acción de Soluciones de Sulfato de Sodio o Magnesio*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-222-11. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del agregado fino*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-223-7. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del agregado grueso*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-227-13. Porcentaje de Partículas Fracturadas en un Agregado Grueso*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-240-13. Proporción de Partículas Planas, Alargadas o Planas y Alargadas en Agregados Gruesos*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-731-13. Toma de Muestras de Mezclas Asfálticas para Pavimentos*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-732-13. Extracción Cuantitativa del Asfalto en Mezclas para Pavimentos*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-738-13. Efectos del Agua Sobre la Resistencia a la Compresión de las Mezclas Asfálticas Compactadas (Ensayo de Inmersión-Compresión)*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-740-13. Ensayo de Adherencia en Bandeja*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *INV E-792-13. Medida del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento Usando el Péndulo Británico*. Bogotá: Publicaciones INVIAS.

Integral: Ingenieros Consultores. (Enero de 2015). *CORNARE*. Obtenido de CORNARE: [https://www.cornare.gov.co/LA/Gramalote/documentos/I-2250-EIA-Cap03\\_Area\\_influencia.pdf](https://www.cornare.gov.co/LA/Gramalote/documentos/I-2250-EIA-Cap03_Area_influencia.pdf)

Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú. (2016). MTC E 518. Efecto del Agua en la Resistencia a la Compresión de Mezclas Bituminosas. En M. d. Perú, *Manual de ensayo de Materiales* (págs. 653-655). Lima: Publicaciones MTC.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2012). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP*. Quito: Publicaciones del MTOP.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). *Manual de Control de Calidad en la Construcción de las Obras de Infraestructura del Transporte*. Quito: Publicaciones MTOP.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial Volumen 2-Libro B. Normas para Estudios y Diseño Vial*. Quito: Publicaciones MTOP.

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial Volumen 3. Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Quito: Publicaciones MTOP.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2013). *NEVI-12 Complementario II. Manual de control de calidad en la construcción de las obras de infraestructura del transporte*. Quito: Publicaiones MTOP.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas Ecuador. (2017). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Quito: MTOP.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). MTC E 414. Adhesividad y Cohesividad con Emulsiones Asfálticas Mediante la Placa VIALIT. En M. d. Comunicaciones, *Manual de Ensayos de Materiales* (págs. 540-545). Lima: Publicaciones MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. (2016). MTC E 1004. Determinación del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento en el Pavimento con Péndulo Británico. En M. d. Perú, *Manual de Ensayo de Materiales* (págs. 975-988). Publicaciones MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. (2016). MTC E 504. Resistencia de Mezclas Bituminosas Empleando el Aparato Marshall. En M. d. Perú, *Manual de Ensayo de Materiales* (págs. 583-593). Lima: Publicaciones MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. (2016). MTC E 513. Resistencia a compresión Simple de Mezclas Asfálticas. En M. d. Perú, *Manual de ensayo de materiales* (págs. 635-640). Lima: Publicaciones MTC.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles

(2013b). (2013). *Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Lima: Publicaciones MTC.

Pérez, N., Garnica, P., González, J., Curiel, N., & Ruiz, M. (2016). *Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.

Pinzuar LDTA. (2 de Septiembre de 2013). *Manual de usuario. Máquina de los ángeles*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA. Obtenido de ISSUU: [https://issuu.com/pinzuar/docs/web\\_ref\\_pc-117\\_manual\\_m\\_\\_quina\\_de\\_l](https://issuu.com/pinzuar/docs/web_ref_pc-117_manual_m__quina_de_l)

Pinzuar LTDA. (2002). *Manual de Usuario, Maquina Multiusos Automática Computarizada*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA.

Pinzuar LTDA. (2002). *Mesa vibratoria*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA. Obtenido de Pinzuar: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/mesa-vibratoria/>

Pinzuar LTDA. (2002). *Pinzuar*. Obtenido de Pinzuar: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/molde-de-estabilidad/>

Pinzuar LTDA. (2002). *Pinzuar*. Obtenido de Pinzuar: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/wp-content/uploads/2019/05/EQUIPO-PARA-ENSAYO-DE-FLOTABILIDAD-Ref.-PC3-HOJA-DE-PRODUCTO.pdf>

Pinzuar LTDA. (20 de Febrero de 2013). *Manual de Usuario. Baño María en Acero Inoxidable*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA. Obtenido de ISSUU: <https://issuu.com/pinzuar/docs/manualbanomariaenaceroinoxidable>

Pinzuar LTDA. (2013). *Manual de usuario. Centrífuga de operación eléctrica de 1500g*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA.

Pinzuar LTDA. (20 de Marzo de 2013). *Manual de usuario. Compactador de asfaltos*. Bogotá: Editorial Pinzuar. Obtenido de Pinzuar: [https://issuu.com/pinzuar/docs/web\\_ref\\_pa-80\\_compactador\\_autom\\_tico\\_de\\_asfaltos](https://issuu.com/pinzuar/docs/web_ref_pa-80_compactador_autom_tico_de_asfaltos)

Pinzuar LTDA. (5 de Septiembre de 2013). *Manual de Usuario. Equipo para ensayo del Método de RICE*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA. Obtenido de ISSUU: [https://issuu.com/pinzuar/docs/web\\_ref\\_pa-86\\_manual\\_equipo\\_para\\_en](https://issuu.com/pinzuar/docs/web_ref_pa-86_manual_equipo_para_en)

Pinzuar LTDA. (2013). *Manual de usuario. Horno eléctrico digital programable*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA.

Pinzuar LTDA. (2013). *Manual de usuario. Tamizadora Eléctrica*. Bogotá: Editorial Pinzuar LTDA. Obtenido de Pinzuar: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/laboratorios-generales/tamizadora-electrica/>

Pinzuar LTDA. (2013). *Pinzuar*. Obtenido de Pinzuar: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/martillo-compactacion-marshall/>

Pinzuar LTDA. (2013). *Pinzuar*. Obtenido de Pinzuar: <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/suelos/canasta-para-densidades-2/>

Pinzuar LTDA. (2013). *Pinzuar*. Obtenido de Pinzuar:

<https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/molde-compactacion-marshall/>

Pinzuar LTDA. (2013). *Pinzuar*. Obtenido de Pinzuar:

<https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/asfaltos/viga-benkelman-digital/>

Ramos, G. (2014). *Mejoramiento de Subrasantes de Baja Capacidad Portante Mediante el Uso de Polímeros Reciclados en Carreteras, Paucará Huancavelica 2014*. Huancayo: Universidad Nacional del Perú.

RC INGTEC. (Febrero de 2019). *RC INGTEC Suelos y Hormigón*. Obtenido de RC INGTEC Suelos y Hormigón: <http://rcingtec.com/product/horno-electrico-digital-programable/>

Real Academia Española. (2014). *RAE*. Obtenido de RAE: <https://dle.rae.es/poluci%C3%B3n>

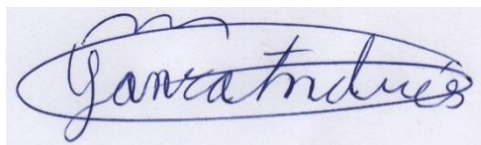
U.S Army Corps of Engineers. (1991). *Design of Pile Foundations*. Washington DC: Engineer Manual. Obtenido de USACE.

Zambrano, W. E. (2016). *Diseño estructural de Pavimentos*. Machala: Publicaciones de la Universidad Técnica de Machala.

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Christian Andrés Yanza Pérez** portador de la cédula de ciudadanía N° 0105793673. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Mezclas asfálticas. Caracterización y Ensayos de Materiales Utilizados en la Ciudad de Cuenca”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de octubre de 2020



F: .....

Christian Andrés Yanza Pérez

0105793673