

**EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA DE
CONCRETO HIDRÁULICO PARA PAVIMENTO RÍGIDO CON LA INCLUSION
DE HORMIGON ASFÁLTICO RECUPERADO TIPO “RAP”**

DAVID ALBERTO SANTOS MONTERO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA (S) (C)
2016**

**EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA DE
CONCRETO HIDRÁULICO PARA PAVIMENTO RÍGIDO CON LA INCLUSION
DE HORMIGON ASFÁLTICO RECUPERADO TIPO “RAP”**

DAVID ALBERTO SANTOS MONTERO

**Tesis de Maestría como requisito de grado para optar al título de:
Mágister en Ingeniería Civil (Énfasis en Transporte e Infraestructura)**

**Directora:
NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS
Ingeniera Civil, MSc. Ingeniería de Vías Terrestres, Esp. en Carreteras, Esp.
en Transportes**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA (S) (C)
2016**

Nota de Aceptacion

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga (S) (C), Octubre de 2016

A Nuestro Señor Dios Todopoderoso, Lina Patricia, Isabellita, Panchita, Pipo y la memoria de mi padre, así como a todas aquellas personas que de una forma u otra forma apoyaron esta nueva etapa en mi vida académica y profesional.

DAVID ALBERTO

ADVERTENCIA

La Universidad Pontificia Bolivariana – UPB, Seccional Bucaramanga, no es responsable de los conceptos emitidos por el autor-investigador del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta del mismo y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores éticos y morales.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos muy particulares a todas y cada una de las personas, instituciones y organizaciones aquí citadas que contribuyeron en la elaboración del presente documento, quienes con sus aportes hicieron posible obtener los resultados y conceptos aquí consignados.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – SECCIONAL BUCARAMANGA, Institucion de formacion superior sede de la Maestría en Ingeniería Civil.

SAD INGENIERÍA S.A.S., Organizacion consultora que presto todo el apoyo financiero en los estudios de la presente investigacion.

ASFALTART S.A., Organizacion de ingenieros contratistas quienes prestaron todo el apoyo logístico y de laboratorio en los estudios de la presente investigacion.

NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS, Ingeniera Civil, Máster en Ingeniería de Vías Terrestres, Especialista en Carreteras y Transportes. Directora del proyecto.

LUIS FERNANDO CANO GOMEZ, Ingeniero Civil, Asesor Nacional e Internacional. Codirector del proyecto.

PEDRO JAVIER VARGAS BAYONA, Ingeniero Civil, Amigo Personal y Director del Laboratorio de Control de Calidad de ASFALTART S.A.

CONTENIDO

	Pág.
ADVERTENCIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACION	26
1. INTRODUCCION	28
1.1. Planteamiento del problema y justificacion	31
1.2. Objetivos	35
1.2.1. Objetivo general	35
1.2.2. Objetivos específicos	35
2. MARCO CONCEPTUAL (GLOSARIO)	36
3. MARCO TEORICO	41
3.1. Aproximacion al concepto de concreto u hormigon hidráulico	41
3.2. Aproximacion al concepto de RAP por técnica de fresado	41
4. METODOLOGÍA	47
4.1. Características del RAP	48
4.2. Características de los agregados pétreos vírgenes	52
4.3. Características del cemento portland	56
4.4. Características del agua de mezclado	60
4.5. Diseño de mezclas hidráulicas	61
4.5.1. Medida de la resistencia a la flexotraccion en viguetas	62
4.5.2. Medida de la resistencia a la compresion en cilindros	66
4.5.3. Medida del modulo de elasticidad en cilindros	68

4.5.4.	Medida de los tiempos de fraguado	72
5.	EQUIPOS DE LABORATORIO	76
5.1.	Certificaciones y calibracion de equipos	76
6.	DESARROLLO	77
6.1.	Antecedentes	77
6.2.	Caracterizacion de los agregados pétreos e insumos componentes de las mezclas hidráulicas	78
6.2.1.	RAP	78
6.2.2.	Agregados pétreos grueso (Grava) y fino (Arena) vírgenes	81
6.2.3.	Cemento portland	88
6.2.4.	Agua de mezclado	89
6.3.	Dosificacion de las mezclas hidráulicas	89
6.3.1.	Obtencion de agregados pétreos (Combinado grueso grava + RAP) y arena	92
6.3.1.1.	Chequeo por teorías granulométricas continuas ideales	96
6.3.1.1.1.	Teoría de Fuller – Thompson	96
6.3.1.1.2.	Teoría de Weymouth	99
6.3.1.1.3.	Teoría de Sánchez De Guzmán	101
6.3.1.1.4.	Teoría de Bolomey	103
6.3.2.	Obtencion final de agregados pétreos (Combinado + arena) por teorías granulométricas en frío para diseño de mezclas	105
6.3.3.	Metodología de diseño de mezclas	105
6.3.3.1.	Comité ACI-211 / Guía Dr. Alejandro Sandino	105
6.3.3.2.	Complemento ACI-211 / Guía Dr. Fernando Sánchez Sabogal	125

6.4.	Resultados en producto final (Resistencia a la flexotraccion, resistencia a la compresion, modulos elásticos y tiempos de fraguado	126
6.5.	Modelacion estructural para alternativas en pavimento rígido	157
6.5.1.	Tipos de subrasante	158
6.5.2.	Granular de soporte	160
6.5.3.	Concreto hidráulico tipo MR	161
6.5.4.	Diseño del pavimento de concreto hidráulico	161
6.5.4.1.	Dimensionamiento AASHTO-1993	161
6.5.4.2.	Dimensionamiento PCA-1984	175
6.5.4.3.	Dimensionamiento manual ICPC-INVÍAS-2008	181
7.	EVALUACION DE COSTOS	200
	CONCLUSIONES	209
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	214
	ANEXOS	

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema obtencion del RAP por técnica de fresado	29
Figura 2. Esquema obtencion del RAP por técnica de reciclado	30
Figura 3. Tipología vehicular	37
Figura 4. Cargas por eje (Ton) en funcion de la tipología vehicular	38
Figura 5. Ilustraciones modelos estructuras pavimento rígido y flexible	45
Figura 6. (Tabla 500-6). Criterios diseño mezclas hidráulicas INVÍAS	47
Figura 7. Tambor rotor-fresador-mezclador recicladora WR200i	50
Figura 8. Gradaciones sugeridas reciclado en frío y fresado original-a.	51
Figura 9. Gradaciones sugeridas reciclado en frío y fresado original-b.	51
Figura 10. (Tabla 500-1). Granulometría para agregado fino INVÍAS	52
Figura 11. (Tabla 500-3). Granulometría para agregado grueso INVÍAS	53
Figura 12. (Tabla 500-2). Requisitos del agregado fino INVÍAS	53
Figura 13. (Tabla 500-4). Requisitos del agregado grueso INVÍAS	54
Figura 14. (Num. 6.1). Requisitos gradacion para agregado fino NTC	55
Figura 15. (Num. 10.1). Requisitos gradacion para agregado grueso NTC	55
Figura 16. (Literal A.2). Ocurrencia de agregados reactivos en Colombia	56
Figura 17. (Literal A.2). Minerales susceptibles a reaccion en Colombia	57
Figura 18. (Literal A.2). Localizacion terrenos geologicos reactivos C/bia	57
Figura 19. Características físicas y mecánicas para el cemento portland	58
Figura 20. Parámetros físicos del cemento portland ART	59
Figura 21. (Tabla 501-1). Especificaciones cementos hidráulicos INVÍAS	59

Figura 22. (Tabla 630-5). Requisitos para el agua de mezclado INVÍAS	60
Figura 23. Resistencia a la flexotraccion del concreto	63
Figura 24. (Tabla 402-1). Número de capas requeridas por espécimen	64
Figura 25. (Tabla 402-2). Número de golpes por capa moldeo espécimen	64
Figura 26. Diagrama esquemático de los patrones típicos de fractura	67
Figura 27. Determinacion de la resistencia a la compresion simple	69
Figura 28. Estados de deformacion de un material	69
Figura 29. Representacion esfuerzo/deformacion-a.	70
Figura 30. Representacion esfuerzo/deformacion-b.	71
Figura 31. Curva esfuerzo/deformacion unitaria	72
Figura 32. Curvas de fraguado en el concreto incididas por temperatura	73
Figura 33. Granulometría y porcentajes de participacion del RAP	78
Figura 34. Ensayos restantes de caracterizacion al RAP	78
Figura 35. Usos granulométricos recomendados para el uso del RAP	79
Figura 36. Granulometrías y porcentajes de participacion	82
Figura 37. Ensayos restantes de caracterizacion – Parte a.	83
Figura 38. Ensayos restantes de caracterizacion – Parte b.	83
Figura 39. Granulometría final promedio agregado fino para diseño	84
Figura 40. (Num. 6.4). Salvedad granulométrica-modulo de finura ag. fino	85
Figura 41. Granulometría final promedio agregado grueso para diseño	86
Figura 42. Usos normativos para el agregado grueso para diseño	86
Figura 43. (Num. 10.1). Salvedad granulométrica agregado grueso	87
Figura 44. Requisitos físicos del cemento portland	89

Figura 45. Resumen clasificatorio cemento portland diseño de mezclas	90
Figura 46. Análisis probabilístico en estadística para coeficiente variacion	90
Figura 47. Dispersion total y testigos por desviacion estándar y (%V)	91
Figura 48. Peso específico y absorcion del agregado grueso combinado	94
Figura 49. Peso específico y absorcion del agregado fino	95
Figura 50. Peso unitario suelto del agregado grueso combinado	95
Figura 51. Peso unitario suelto del agregado fino	96
Figura 52. (Tabla 4.12). Gradaciones ideales “Fuller-Thompson”	98
Figura 53. (Tabla 500-9). Asentamiento y contenido de aire MR - INVÍAS	99
Figura 54. Modelo “Weymouth” para partículas de interferencia	100
Figura 55. (Tabla 4.14). Gradaciones ideales “Weymouth”	102
Figura 56. Resistencia compresion concreto Vs. (n) Sánchez De Guzmán	103
Figura 57. Gradaciones ideales “Sánchez De Guzmán”	103
Figura 58. (Num. 500.2.1.4). Condiciones obtencion curva diseño	104
Figura 59. (Tabla 4.16). Gradaciones ideales “Bolomey”	105
Figura 60. Verificacion teoría granulométrica “Fuller-Thompson” MR-38	106
Figura 61. Verificacion teoría granulométrica “Weymouth” MR-38	107
Figura 62. Verificacion teoría granulométrica “Sánchez D. G.” MR-38	109
Figura 63. Verificacion teoría granulométrica “Bolomey” MR-38	110
Figura 64. Reporte metodologico dosificacion final agregados MR-38	111
Figura 65. Verificacion teoría granulométrica “Fuller-Thompson” MR-40	112
Figura 66. Verificacion teoría granulométrica “Weymouth” MR-40	113
Figura 67. Verificacion teoría granulométrica “Sánchez D. G.” MR-40	114

Figura 68. Verificación teoría granulométrica “Bolomey” MR-40	115
Figura 69. Reporte metodológico dosificación final agregados MR-40	116
Figura 70. Verificación teoría granulométrica “Fuller-Thompson” MR-42	117
Figura 71. Verificación teoría granulométrica “Weymouth” MR-42	118
Figura 72. Verificación teoría granulométrica “Sánchez D. G.” MR-42	119
Figura 73. Verificación teoría granulométrica “Bolomey” MR-42	120
Figura 74. Reporte metodológico dosificación final agregados MR-42	121
Figura 75. (Tabla 11.5). Contenido de aire en el concreto	122
Figura 76. (Tabla 11.9). Agua de mezclado agregado angular/rugoso	122
Figura 77. (Tabla 11.15). Vol. agregado grueso por Vol. unitario concreto	124
Figura 78. Reporte del diseño de mezclas de concreto – MR-38	125
Figura 79. Reporte del diseño de mezclas de concreto – MR-40	126
Figura 80. Reporte del diseño de mezclas de concreto – MR-42	127
Figura 81. Pasos 1-5 – Metodología Dr. Fernando Sánchez Sabogal	128
Figura 82. Pasos 5-6 – Metodología Dr. Fernando Sánchez Sabogal	129
Figura 83. Pasos 7-8 – Metodología Dr. Fernando Sánchez Sabogal	130
Figura 84. Pasos 9-10 – Metodología Dr. Fernando Sánchez Sabogal	131
Figura 85. Alabeo térmico en paños de hormigón para pavimentos	132
Figura 86. Correlación (F'_c) y (MR)	133
Figura 87. Resultados de resistencia a la flexión MR-38	137
Figura 88. Resultados de resistencia a la compresión MR-38	38
Figura 89. Resultados de correlación para ($K=2.3$) en MR-38	139
Figura 90. Tipos de falla en probetas cilíndricas de concreto MR-38	140

Figura 91. Evaluacion estadística al proceso (Flexion-compresion) MR-38	140
Figura 92. Resultados de resistencia a la flexion MR-40	141
Figura 93. Resultados de resistencia a la compresion MR-40	142
Figura 94. Resultados de correlacion para (K=2.2) en MR-40	143
Figura 95. Tipos de falla en probetas cilíndricas de concreto MR-40	144
Figura 96. Evaluacion estadística al proceso (Flexion-compresion) MR-40	144
Figura 97. Resultados de resistencia a la flexion MR-42	145
Figura 98. Resultados de resistencia a la compresion MR-42	146
Figura 99. Resultados de correlacion para (K=2.3) en MR-42	147
Figura 100. Tipos de falla en probetas cilíndricas de concreto MR-42	148
Figura 101. Evaluacion estadística proceso (Flexion-compresion) MR-42	148
Figura 102. Resultados finales modulo de elasticidad (40%*F'c) MR-38	150
Figura 103. Resultados finales modulo de elasticidad (40%*F'c) MR-40	151
Figura 104. Resultados finales modulo de elasticidad (40%*F'c) MR-42	152
Figura 105. Modulos de elasticidad según procedencia geologica	155
Figura 106. Modulos de elasticidad reglamentacion nacional internacional	155
Figura 107. Ventana de corte modulacion paños en pavimento de concreto hidráulico	157
Figura 108. (Fig. 4.1). Esquema representativo pavimento de concreto hidráulico	158
Figura 109. (Tabla 3-2). Clasificacion de subrasante según resistencia	158
Figura 110. (Tabla 2-12). Modulo reaccion ($K_{natural}$) Vs. CBR subrasante	159
Figura 111. (Tabla 4.4). Categorías de subrasante	160

Figura 112. (Tabla 3-6). Variables consideradas análisis diseño pavimento de concreto hidráulico	160
Figura 113. (Fig. 5.29). Variacion coeficiente (a_2) Vs. Resistencia base	162
Figura 114. Variables consideradas en (MR) y ($F'c$) a las mezclas-a.	162
Figura 115. Variables consideradas en (MR) y ($F'c$) a las mezclas-b.	162
Figura 116. Ejemplo utilizacion software ecuacion AASHTO	163
Figura 117. Modulo de reaccion compuesto subrasante+base granular	164
Figura 118. Modulo de reaccion corregido por pérdida de soporte (LS)	165
Figura 119. Valores de pérdida de soporte (LS) gráfica por tipo material	166
Figura 120. Transferencia de carga por canastillas	166
Figura 121. Nivel de confiabilidad (R) en funcion del tipo de vía	167
Figura 122. Valores (Z_r) en funcion del nivel de confiabilidad (R)	168
Figura 123. Valores error estándar combinado (S_o) pavimentos	168
Figura 124. Nivel de serviciabilidad	169
Figura 125. Valores de coeficiente de transmision de carga	170
Figura 126. Valores de coeficiente de drenaje	170
Figura 127. (Tabla 100-1). Niveles de tránsito INVÍAS	170
Figura 128. Porcentaje de ejes simples (8.2 Ton) por el carril de diseño	171
Figura 129. (Tabla 3-1). Categorías de tránsito para seleccion espesores	171
Figura 130. Esquemática estructural modelacion pavimentos AASHTO93	172
Figura 131. Espesores de concreto MR-38	173
Figura 132. Espesores de concreto MR-40	173
Figura 133. Espesores de concreto MR-42	174

Figura 134. Factores de mayoracion y seguridad de cargas	177
Figura 135. (Tabla 2-15). Influencia espesor base granular en valor (K')	178
Figura 136. Recomendaciones erosion potencial materiales de soporte	179
Figura 137. Software BS-PCA-a.	179
Figura 138. Software BS-PCA-b.	180
Figura 139. Esquemática estructural modelacion pavimentos PCA84	180
Figura 140. Manual ICPC-INVÍAS2008	182
Figura 141. Modulo reaccion subrasante y consideraciones especiales	184
Figura 142. Tablas (3-1, 3-2, 3-3, 3-4, y 3-6)	185
Figura 143. Espesor de losa (S1-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-38	186
Figura 144. Espesor de losa (S2-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-38	187
Figura 145. Espesor de losa (S3-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-38	188
Figura 146. Espesor de losa (S1-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-40	189
Figura 147. Espesor de losa (S2-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-40	190
Figura 148. Espesor de losa (S3-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-40	191
Figura 149. Espesor de losa (S1-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-42	192
Figura 150. Espesor de losa (S2-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-42	193
Figura 151. Espesor de losa (S3-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-42	194
Figura 152. Esquemática estructural modelacion pavimentos ICPC2008	195
Figura 153. Resumen general espesores calculados por metodologías	196
Figura 154. Qué es una relacion beneficio/costo?	200
Figura 155. APU MR-38	201
Figura 156. APU MR-38 con adicion de RAP	202

Figura 157. APU MR-40	203
Figura 158. APU MR-40 con adición de RAP	204
Figura 159. APU MR-42	205
Figura 160. APU MR-42 con adición de RAP	206

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Proporciones en frío agregados pétreos para diseño de mezclas	62
Tabla 2. Valores constantes parte elíptica ecuacion “Fuller-Thompson”	97
Tabla 3. Valores de (n) ecuacion “Weymouth” en funcion del tamaño	101
Tabla 4. Valores de (f) ecuacion “Bolomey” en funcion del tamaño	104
Tabla 5. Valores de modulo de elasticidad para modelacion pavimento de concreto hidráulico	156
Tabla 6. Valores porcentuales resitencia compresion-modulo elasticidad	156
Tabla 7. Valores porcentuales modulo rotura-resistencia compresion	156
Tabla 8. Valores de tiempos de fraguado para mezclas estudiadas	157
Tabla 9. Valores de modulo resiliente y reaccion en subrasante natural	159
Tabla 10. Valores de modulo de reaccion compuesto	164
Tabla 11. Valores de modulo de reaccion corregido	165
Tabla 12. Factores de seguridad para nivel de confianza	168
Tabla 13. Repeticiones esperadas según nivel tránsito asumido (T0-T2)	172
Tabla 14. Resumen de espesores MR-38	174
Tabla 15. Resumen de espesores MR-40	175
Tabla 16. Resumen de espesores MR-42	175
Tabla 17. Valores de modulo de reaccion combinado	178
Tabla 18. Resumen de espesores (FM=1) MR-38	180
Tabla 19. Resumen de espesores (FM=1) MR-40	181
Tabla 20. Resumen de espesores (FM=1) MR-42	181

Tabla 21. Resumen de espesores MR-38	195
Tabla 22. Resumen de espesores MR-40	195
Tabla 23. Resumen de espesores MR-42	196
Tabla 24. Resumen diseños convencionales de mezclas tipo MR	207
Tabla 25. Resumen diseños convencionales de mezclas tipo MR+RAP	207

LISTADO DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Pruebas en agregados pétreos (RAP, grava y arena vírgen)	60
Gráfica 2. Pruebas en cemento portland - ART	61
Gráfica 3. Pruebas al agua de mezclado – Fuente “Río Frío”	61
Gráfica 4. Pruebas en el concreto hidráulico como producto final	74
Gráfica 5. Resumen general de pruebas de laboratorio valoradas	75
Gráfica 6. Representacion gráfica uso del RAP en gradaciones abiertas	79
Gráfica 7. Representacion gráfica uso del RAP en gradaciones densas	80
Gráfica 8. Representacion gráfica uso RAP en gradaciones densas C.A.	80
Gráfica 9. Curva granulométrica final promedio agregado fino diseño	84
Gráfica 10. Curva granulométrica final promedio agregado grueso diseño	86
Gráfica 11. Diagramas control (Blaine, %200, autoclave, aire, fraguado)	91
Gráfica 12. Diagramas control (F’c a 1-3-7-28 días / Expansion 14 días)	92
Gráfica 13. Dosificacion agregado pétreo vírgen–grava (80%) RAP (20%)	93
Gráfica 14. Curvas “Fuller” para diferentes tamaños máximos agregados	98
Gráfica 15. Curvas “Weymouth” para diferentes tamaños de agregados	102
Gráfica 16. Gráficas continuas ideales “Fuller-Thompson” MR-38	107
Gráfica 17. Gráficas continuas ideales “Weymouth” MR-38	108
Gráfica 18. Gráficas continuas ideales “Sánchez D. G.” MR-38	109
Gráfica 19. Gráficas continuas ideales “Bolomey” MR-38	110
Gráfica 20. Dosificacion agregados y franjas metodologicas MR-38	111
Gráfica 21. Gráficas continuas ideales “Fuller-Thompson” MR-40	112

Gráfica 22. Gráficas continuas ideales “Weymouth” MR-40	113
Gráfica 23. Gráficas continuas ideales “Sánchez D. G.” MR-40	114
Gráfica 24. Gráficas continuas ideales “Bolomey” MR-40	115
Gráfica 25. Dosificación agregados y franjas metodológicas MR-40	116
Gráfica 26. Gráficas continuas ideales “Fuller-Thompson” MR-42	117
Gráfica 27. Gráficas continuas ideales “Weymouth” MR-42	118
Gráfica 28. Gráficas continuas ideales “Sánchez D. G.” MR-42	119
Gráfica 29. Gráficas continuas ideales “Bolomey” MR-42	120
Gráfica 30. Dosificación agregados y franjas metodológicas MR-42	121
Gráfica 31. Evolución resistencias y valores estadísticos promedio MR-38	139
Gráfica 32. Evolución resistencias y valores estadísticos promedio MR-40	143
Gráfica 33. Evolución resistencias y valores estadísticos promedio MR-42	147
Gráfica 34. Evaluación estadística al proceso (MR-F’c) MR-38-40-42	149
Gráfica 35. Gráficas finales módulo de elasticidad (40%*F’c) MR-38	150
Gráfica 36. Gráficas finales módulo de elasticidad (40%*F’c) MR-40	151
Gráfica 37. Gráficas finales módulo de elasticidad (40%*F’c) MR-42	152
Gráfica 38. Resumen comparativo estadístico (Ec) (33% y 40% F’c)-a.	153
Gráfica 39. Resumen comparativo estadístico (Ec) (33% y 40% F’c)-b.	153
Gráfica 40. Tiempos de fraguado MR-38	154
Gráfica 41. Tiempos de fraguado MR-40	154
Gráfica 42. Tiempos de fraguado MR-42	155
Gráfica 43. Comparativo espesores calculados MR-38	197
Gráfica 44. Comparativo espesores calculados MR-40	198

LISTADO DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuacion 1. Determinacion del modulo de rotura en el tercio medio	65
Ecuacion 2. Determinacion del modulo de rotura por fuera de tercio medio	65
Ecuacion 3. Determinacion del modulo de elasticidad	71
Ecuacion 4. Determinacion del coeficiente de "Poisson"	72
Ecuacion 5. Determinacion elítica de curva	97
Ecuacion 6. Determinacion parábola de "Fuller"	98
Ecuacion 7. Determinacion le de "Weymouth"	101
Ecuacion 8. coeficiente estructural mezcla asfáltica	104
Ecuacion 9. Determinacion del contenido de cemento	123
Ecuacion 10. Determinacion del contenido de agregado grueso	124
Ecuacion 11. Correlacion (MR) Vs. (F'c)	134
Ecuacion 12. Correlacion modulo resiliente Vs. CBR	159
Ecuacion 13. Formulacion original AASHTO	163

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Proceso intervencion y obtencion del RAP por fresado	28
Fotografía 2. Proceso intervencion RAP con adicion afirmado granular	29
Fotografía 3. Fresado superficial	42
Fotografía 4. Fresado poco profundo	43
Fotografía 5. Fresado profundo	43
Fotografía 6. Tambor-desbastador giratorio fresadora W-1500	49
Fotografía 7. Validacion ensayo flexotraccion	65
Fotografía 8. Validacion ensayo compresion	67
Fotografía 9. Test de tiempo de fraguado del concreto	74
Fotografía 10. Extraccion de núcleo en un pavimento tipo “Whitetopping”	77
Fotografía 11. Condicion de confinamiento – no condicion de berma	167
Fotografía 12. Efecto “Bombeo” en un pavimento de concreto	176

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ensayos caracterización agregados e insumos	-
Anexo B. Resúmenes estadísticos consolidados agregados e insumos	-
Anexo C. Soportes teorías granulométricas y diseños de mezclas	-
Anexo D. Resultados de resistencias (MR) (F'c) y modulos elasticidad	-
Anexo E. Coeficiente de pulimiento del agregado	-
Anexo F. Contenido de sulfatos en el agregado	-
Anexo G. Reaccion potencial agregado-álcali	-
Anexo H. Resultados tiempos de fraguado	-
Anexo I. Resumen general pruebas de laboratorio ejecutadas	-
Anexo J. Modelacion estructural de pavimentos	-
Anexo K. Soporte test ensayo flexotraccion	-
Anexo L. Manual de operacion compresometro UPB Seccional B/ga	-
Anexo M. APU's	-
Anexo N. Registro fotográfico (Incluye 23 diapositivas)	-
Anexo O. Certificados de calibracion equipos de laboratorio	-

RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

TÍTULO: EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA PAVIMENTO RÍGIDO CON LA INCLUSION DE HORMIGON ASFÁLTICO RECUPERADO TIPO “RAP”

AUTOR: DAVID ALBERTO SANTOS MONTERO

FACULTAD: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS

RESUMEN

La construcción de pavimentos rígidos y flexibles, generan desarrollo social e impacto económico/ambiental en su concepción, desarrollo y operación posterior. Su construcción requiere de materiales de bajo costo, de alta disponibilidad y aprovechamiento, así como de propiedades que garanticen el cumplimiento mínimo de durabilidad previsto a costos razonables de mantenimiento. Resulta ideal, aprovechar la obtención y uso de materiales que son de considerada abundancia y que para su procesamiento, requieran una tecnología limpia y tradicional con el consecuente bajo impacto ambiental. A materiales corresponden a los agregados reciclables, y en nuestro caso la técnica de fresado de un pavimento flexible: El RAP. Ante ello, las instituciones gubernamentales, además de investigaciones adelantadas por instituciones educativas, es documentar y diversificar su uso, tal que el porcentaje de utilización sea el más alto posible. Su disminución a sitios de disposición final como minimización al consumo de agregados pétreos vírgenes es un beneficio ambiental, así como la calidad por su aprovechamiento de mezclado, lo que permite generar alternativas en la manufactura de mezclas asfálticas e hidráulicas sobre estándares técnicos normativos, así como una economía de escala por su aprovechamiento. Ha existido discusión en torno a la concepción, diseño, estabilidad y durabilidad específica de un pavimento flexible o rígido, entorno a la utilización de los agregados reciclados. Los posibles beneficios a obtener si se seleccionan adecuadamente y se prueban bajo test de laboratorio, podrían garantizar aportes en diseños estructurales, costos económicos y utilización en mezclas de concreto hidráulico, constituyendo una herramienta de gran utilidad.

PALABRAS CLAVES: RAP, MODULO ELÁSTICO, RESISTENCIA FLEXOTRACCION, MODULO ROTURA Y RESISTENCIA COMPRESION.

Vo. Bo. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

GENERAL SUMMARY OF RESEARCH WORK

TITLE: EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND DYNAMICS OF A MIXTURE OF CONCRETE PAVEMENT HYDRAULIC HARD FOR INCLUSION WITH ASPHALT CONCRETE TYPE RECOVERED "RAP"

AUTHOR: DAVID ALBERTO SANTOS MONTERO

FACULTY: Master's Degree in Civil Engineering

DIRECTOR: NORMA CRISTINA SOLARTE VANEGAS

ABSTRACT

The construction of rigid and flexible pavements generate social development and economic / environmental impact in its conception, development and subsequent operation. Its construction requires materials of low cost, high availability and utilization, as well as properties that ensure compliance with the minimum durability provided at reasonable maintenance costs. Ideal, make the collection and use of materials that are abundant and considered for processing, require a clean, traditional technology with consequent low environmental impact. A recyclable materials correspond to aggregates, and in our case the milling technique of a flexible pavement: The RAP. In response, government institutions as well as investigations conducted by educational institutions, is to document and diversify its use, such that the utilization rate is the highest possible. Its decline disposal sites as minimizing the consumption of virgin rock aggregates is an environmental benefit, and quality for its use mixing, allowing generate alternatives in the manufacture of asphalt and hydraulic mixtures on regulatory technical standards and an economy of scale for its use. There has been discussion about the conception, design, stability and durability specific to a flexible or rigid pavement, around the use of recycled aggregates. The possible benefits to be gained if properly selected and tested under laboratory test, could ensure input in structural design, economic costs and use in hydraulic concrete mixtures, constituting a very useful tool.

KEYWORDS: RAP, ELASTIC MODULUS, FLEXURAL STRENGTH RESISTANCE, MODULUS OF RUPTURE AND COMPRESSIVE STRENGTH.

Vo. Bo. DIRECTOR OF RESEARCH WORK

1. INTRODUCCION

La recuperación de agregados se ha convertido en un tema cada vez más importante en la industria de la construcción a nivel global. El agotamiento progresivo de los recursos naturales, el aumento en los obstáculos al desarrollo de nuevas canteras y la creciente conciencia ciudadana respecto a la gestión sostenible de los residuos, le da cada vez más relevancia al uso de agregados reciclados en el sector de la construcción.

A pesar de que este proceso tiene características particulares en cada país, en términos de coyuntura y escala, se espera que materiales procedentes de diferentes tipos de residuos se conviertan en parte sustancial del mercado de los materiales de construcción.

En nuestro país se manipula de manera cotidiana y permanente, el uso del pavimento asfáltico recuperado denominado RAP, del inglés RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT¹. Es el término dado a los materiales extraídos y/o procesados que contienen una presencia contraída de betún asfáltico que por efectos de envejecimiento difiere del contenido óptimo volumétrico, así como de agregados pétreos, ambos provenientes de la intervención de un pavimento flexible próximo a intervenir por técnicas de FRESADO cuando éste ha llegado a su fatiga o pérdida en su nivel de serviciabilidad - Véase Fotografía 1 y Figura 1.



Fotografía 1. Proceso de intervención y obtención del RAP por técnica de fresado
Fuente: WIRTGEN GROUP, EUA (2016)²

¹ Newcomb, D. (NAPA, 2004). National Asphalt Pavement Association. Informe especial SR-191. La industria de la mezcla de asfalto caliente es un líder nacional en el reciclaje de su producto y otros. EUA

² WIRTGEN GROUP. (2016). Tecnologías. Recuperado el 11 de Mayo, 2016, de <http://www.wirtgen-group.com>. EUA

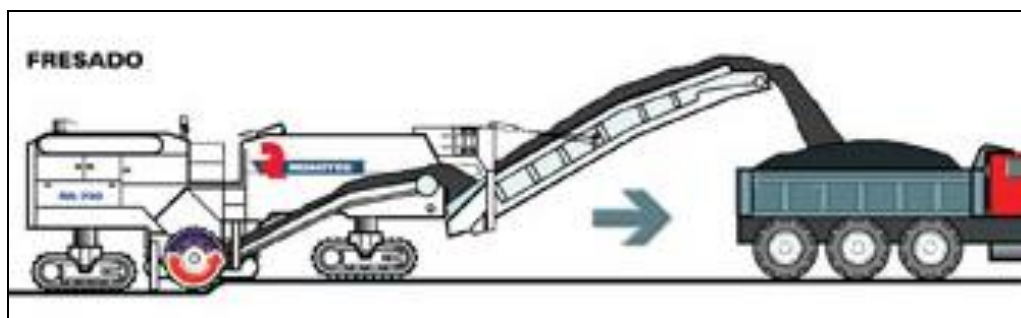


Figura 1. Esquema obtención del RAP por técnica de fresado
Fuente: ROADTEC Inc., EUA (2016)³

Cuando este material se recupera al tiempo con los afirmados existentes de una estructura de pavimento tipo flexible (Entre ellos las bases y/o subbases granulares), y casi de manera inmediata se le incorporan ligantes hidráulicos o asfálticos ya sea en frío o caliente; a esta técnica se le conoce como RECICLADO (Newcomb, 2004) - Véase Fotografía 2 y Figura 2.



Fotografía 2. Proceso de intervención del RAP con adición de afirmado granular por técnica de reciclado
Fuente: WIRTGEN GROUP, EUA (2016)

La información acerca de este tema para su utilización en la manufactura de mezclas hidráulicas para la construcción de pavimentos rígidos, es escasa debido a las pocas publicaciones de origen local relativas al tema.

³ ROADTEC Inc. (2016). Productos. Recuperado el 7 de Mayo, 2016, de <http://www.roadtec.com>.
EUA

Lo anterior permite un espacio valioso de investigación en los estudios de materiales pétreos, dando origen a una exploración novedosa en el campo de la infraestructura vial.

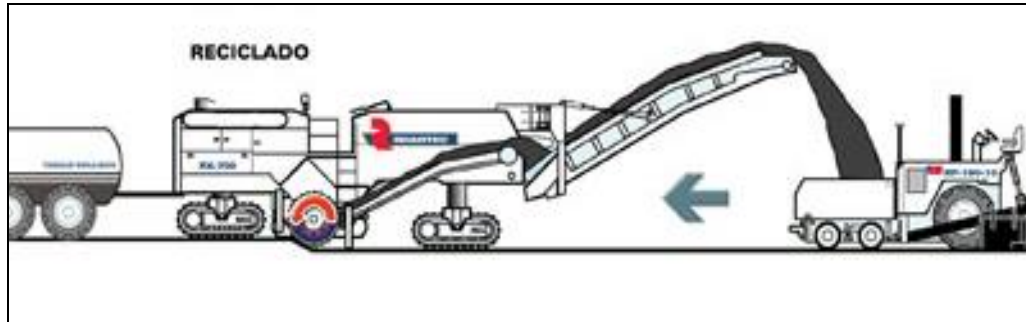


Figura 2. Esquema obtención del RAP por técnica de reciclado
Fuente: ROADTEC Inc., EUA (2016)

La razón principal del presente trabajo, tiene como objeto principal estimar las proporciones de RAP óptimas en el diseño de una mezcla hidráulica, evaluando las principales propiedades mecánicas y dinámicas de caracterización para poder utilizarla como alternativa en un pavimento rígido.

De igual forma y como complemento, se pretende evaluar los beneficios económicos derivados de dicha implementación.

Para el cumplimiento de los anteriores objetivos, se utilizará como base y guía las directrices formuladas por las “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS – 2013”⁴ en sus Artículos 500 y 630 - Pavimentos de Concreto Hidráulico / Concreto Estructural.

La revisión bibliográfica da cuenta de reportes sobre la utilización de otros tipos de insumos reciclados⁵, en donde se han encontrado otras alternativas de adición (Virutas de acero, polímeros, reciclado de ladrillos, estériles del carbón, vidrio reciclado, tamo del arroz, cenizas volantes, escorias de alto horno, micro y macro-fibras sintéticas, fibra de fique, minerales externos, ceniza de bagazo de la caña de azúcar y humo de sílice entre otros), para la transformación de mezclas hidráulicas enfocadas al uso en el ámbito estructural, más no para el área de la ingeniería de pavimentos rígidos.

⁴ INVÍAS (2013). Resolución 0001376. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículos 500 y 630. Colombia

⁵ Bojacá, N. Torres, N. (2013). Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado. *Revista No. 26 / Publicación técnica AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – Seccional Colombia*. ISBN No. 20111592. Colombia

1.1. Planteamiento del problema y justificación

En diversos países del mundo se utiliza el RAP proveniente de las técnicas de fresado o reciclado en el mantenimiento periódico y de rehabilitación de vías, caminos, carreteras y aeropistas.

Los países europeos y EEUU, han utilizado un gran porcentaje del pavimento asfáltico que se fresa o recicla cada año (50% y 25% respectivamente) en diversos proyectos por medio de la re-manufactura de mezclas asfálticas en caliente, en frío o para procesos de incorporación en la estabilización de afirmados granulares⁶. Como complemento a la referencia anteriormente citada, cerca de un 90% y 94% lo constituyen vías en pavimento asfáltico los países europeos y los EEUU respectivamente.

Los primeros desarrollos en la utilización del RAP se dieron precisamente en este último (EEUU) para los años 80, pero la técnica se ha popularizado mundialmente, tanto que en Europa y específicamente en países como Alemania, Dinamarca, España y Suiza, la proporción de mezclas recicladas o fresadas sobre el total de concretos asfálticos es superior en promedio al 15%⁷.

En España a partir de 1990 se ha incrementado mucho más su uso respectivo que en otro país europeo. En EEUU su uso está alrededor del 80%. A nivel latinoamericano, naciones como la nuestra, Argentina, México, Ecuador y Chile entre otros, han liderado estudios, trabajos y desarrollo normativo relacionados con este tema en particular y otros complementarios, como lo es la utilización del GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR), pero su campo de acción ha estado enfocado más hacia la re-manufactura, instalación y compactación de mezclas asfálticas en caliente en el área de pavimentos flexibles. En Argentina su uso en las mezclas asfálticas se permite hasta en un 30%. En Colombia se ha incrementado su consumo y desde el año 2005, el INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO DE BOGOTÁ D.C. - IDU, a través de su actualización en las "Especificaciones Técnicas de Materiales y Construcción IDU-ET-2011"⁸ en sus secciones 450, 451 y 454, describe los temas de reciclado de pavimentos asfálticos con el tratamiento o estabilización de emulsiones asfálticas, cemento portland y asfaltos espumados respectivamente.

⁶ Bolzan, P. (2011). Reciclado de mezclas asfálticas en caliente. Comisión permanente del asfalto. XII Jornadas técnicas. Argentina

⁷ Huang, Y. Bird, R. Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Magazine resources, conservation and recycling* 52.1, (pp 58-73). Recuperado el 9 de Julio, 2015, de <http://www.google.com/patents/US8758597>. Cárdenas, J. Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico del asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiado desde la relación viscosidad-temperatura. Colombia

⁸ IDU (2011). Resolución 4880. Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. Secciones 450, 451 y 454. Colombia

Igualmente el INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS a través de sus “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras – INVÍAS-2013” en sus Artículos 460, 461 y 462, describe temas relacionados al respecto como el fresado de pavimento asfáltico, reciclado de pavimento asfáltico en frío empleando ligantes bituminosos y reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente.

Lo que han pretendido estas instituciones gubernamentales, además de otros estudios adelantados por universidades en nuestro territorio, es documentar y diversificar su uso de tal manera que el porcentaje de utilización sea el más alto posible, para con ello disminuir su retiro a sitios de escombreras, generando por ende, mayores beneficios de tipo ambiental (Problema creciente de su impacto por su no reutilización), de calidad (Aprovechamiento al mezclarlo con agregados vírgenes y betunes nuevos en proporciones adecuadas, tal que permita producir nuevos concretos asfálticos que cumplan con los requisitos de resistencia, calidad y durabilidad exigidos de acuerdo al tipo de capa en las que serán utilizados) y de economía (Aprovechamiento de los recursos económicos del estado).

El lucro del fresado y reciclaje en un pavimento asfáltico tiene impacto tanto a nivel económico, como en materia de mitigación ambiental como se acaba de mencionar. Recuperar pavimento asfáltico constituye un "tesoro" de los materiales de construcción en vías o caminos estructurales flexibles, ya que este insumo se manufactura con los más altos estándares técnicos y de calidad como lo estipulan y consideran normatividades nacionales e internacionales de manera respectiva⁹.

El uso del RAP crece considerablemente reduciendo así, el uso de materiales granulares pétreos vírgenes¹⁰. Igualmente y desde el punto de vista económico, organismos y entidades públicas o privadas que tienen que ver directamente con la contratación de proyectos en infraestructura vial, se benefician sustancialmente porque el reciclaje se extiende en términos de ahorro de dinero, lo que permite más ejecución en metas físicas que bajo condiciones técnicas competentes, pueden ser o no una alternativa de construcción y de durabilidad a los pavimentos.

Como se ha mencionado, RAP es el término dado a los materiales extraídos y/o procesados que contienen asfalto y agregados pétreos presentes en un pavimento flexible. Es igualmente, una técnica de rehabilitación de carreteras que consiste en la reutilización de materiales procedentes de las capas que conforman la estructura de un pavimento flexible que ha estado en servicio y ha perdido capacidades iniciales de servicio.

⁹ Botasso, H. Cuattrochino, A. Rebollo, O. Soengas, C. (2004). Reciclado de pavimentos asfálticos. Centro de investigaciones viales. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional de La Plata. Argentina

¹⁰ CEDEX (2011). Recuperado el 5 de Diciembre, 2015, de <http://www.cedex.es/recicladodepavimentosasfalticos>. DIRECT-MAT. Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed roads materials in asphalt. EUA

Esto bajo los efectos propios de la temperatura, el medio ambiente y el impacto de las cargas vehiculares que han sido soportadas, pero que pueden mejorarse al tratarse, estabilizarse o incorporarse para conformar nuevos elementos.

Por esta razón y dando cabida complementaria, es necesario realizar estudios pertinentes que permitan conocer al RAP como alternativa o posibilidad de empleo en la manufactura de un hormigón hidráulico para la construcción de pavimento de concreto hidráulicos.

Es crucial desarrollar un conjunto de estándares para la producción y uso de agregados reciclados que permita aprovechar al máximo su potencial y al mismo tiempo trate de asegurar niveles aceptables de calidad y transparencia. Un buen ejemplo de este caso es el liderazgo de Alemania, donde el reciclado de materiales es un tema que ha sido debidamente regulado.

En este caso, distintos requisitos aplicables a los agregados reciclados forman parte de las regulaciones más importantes relacionadas con el uso de materiales de construcción. Tal es el caso de las normas DIN 4226-100 (Norma para agregados usados en concreto y mortero), DIN EN 206 - DIN 1045 (Estándares europeos y alemanes para el concreto); y TL Gestein-StB (Requisitos técnicos para proveer agregados en la construcción de caminos).

El RAP puede presentar diferentes tipos de gradaciones y contenidos asfálticos de betún, lo que lo hace dependiente del tipo de proceso y uso de maquinaria para la ejecución propia en este tipo de actividades.

Posee la enorme ventaja de ser un insumo no plástico o de nula presencia de sustancias expansivas o arcillosas, situación totalmente ventajosa para la elaboración de cualquier tipo de mezclas asfálticas o hidráulicas, pero como todo insumo reutilizado, posee desventajas en lo referido a la disminución de su peso específico, hetero-granularidad y moderados niveles de absorción.

Mientras que los agregados reciclados podrían jugar un importante rol en la construcción sostenible, no se debe olvidar que debido a restricciones técnicas y a su restringida disponibilidad, los agregados reciclados “nunca” tendrán el potencial de reemplazar a los agregados primarios o vírgenes por completo.

La investigación invita a abrir un nuevo espacio de exploración (Genere el o los resultado(s) que se obtengan) que muy poco se ha estudiado en este campo de la ingeniería de pavimentos, así como en el mismo sector nacional.

El proyecto tendrá tal vez y de manera recíproca, un impacto económico, ya que se creará de entrada, un diseño de mezcla hidráulica económico o no en donde se priorice el estudio de sus propiedades básicas de durabilidad y caracterización con el objetivo de modelar estructuralmente un pavimento de concreto hidráulico bajo los estándares normativos de las “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras – INVÍAS-2013” y metodologías sistemáticas de diseño AASHTO-1993, PCA-1984 y MANUAL INVÍAS-ICPC-2008¹¹.

Posibles beneficios a obtener derivados del desarrollo del proyecto de investigación, por ser un trabajo más experimental que teórico:

- Si se selecciona adecuadamente el RAP, y se prueban las condiciones de calidad de la(s) mezcla(s) hidráulica(s) para pavimento rígido en el estudio, a través de ensayos de mecánicos en laboratorio, además del uso de correlaciones y análisis de datos, se podrán garantizar sus beneficios en el diseño, costo económico y posible utilización en mezclas para pavimento de concreto hidráulico.
- La alternativa de diseño de la estructura de pavimento rígido, estará en relación directa o ligada con los resultados obtenidos en los test de laboratorio a validar y ejecutar.
- El o los diseños óptimos de la(s) mezcla(s) hidráulica(s) para pavimento rígido que se obtenga(n) como resultado de esta investigación, podrán constituir una herramienta de apoyo para futuras investigaciones.

El alcance de la presente investigación se centra en realizar el diseño de la mezcla hidráulica más la adición de un porcentaje de RAP como sustituyente parcial del agregado grueso y/o fino conformante de acuerdo a los estudios y análisis de valoración y justificaciones técnicas así presentadas.

Finalmente, los diseños de las mezclas tendrán alcance y limitación espacial definida solo como alcance académico, más no como de implementación técnica o normativa a nivel nacional, departamental o municipal. De otro lado, queda abierta la posibilidad para la construcción de un tramo de prueba así como de su respectiva aplicabilidad en un proyecto de infraestructura vial de mediana o baja envergadura.

¹¹ AASHTO (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials. Guía para el diseño de estructuras de pavimento. EUA. PCA (1984). Portland Cement Association. Método para el diseño de pavimentos rígidos. EUA. ICPC-INVÍAS (2008). Instituto Colombiano de Productores de Cemento e Instituto Nacional de Vías. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Colombia

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Obtener las proporciones óptimas de diseño para diferentes mezclas de concreto hidráulico tipo MR con inclusión de RAP, tal que permita la evaluación de las propiedades mecánicas para su implementación en la concepción y construcción de un pavimento rígido.

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar las propiedades mecánicas y de caracterización del RAP como un agregado pétreo reciclable de calidad competente, tal que pueda garantizar la optimización de recursos en la manufactura del concreto hidráulico como reemplazo parcial de la fracción que así se justifique normativamente.
- Generar la mezcla de concreto hidráulico tipo MR con la proporción ideal de RAP, analizando en ella de manera particular, sus propiedades mecánicas resultantes bajo las referidas proporciones ideales.
- Realizar las pruebas y test de laboratorio que en cantidad, permitan comparar los resultados obtenidos con los requisitos mínimos exigidos y establecidos en las especificaciones INVÍAS/2013. De otro lado, analizar y determinar la correlación entre los ensayos de módulo de rotura sobre viguetas prismáticas a la flexotracción y resistencia a la compresión simple en moldes cilíndricos.
- Analizar los datos obtenidos en las pruebas para evidenciar sus alcances, dentro del cumplimiento normativo INVÍAS-2013 y/o NTC.
- Modelar alternativas de pavimento rígido mediante el uso de las metodologías AASHTO, PCA y MANUAL INVÍAS/ICPC, sobre una base clasificatoria en capacidad portante de baja a media en subrasantes de fundación y niveles de tránsito selectivo. Lo anterior, con base en los resultados y datos obtenidos tal que permitan comprobar o no su aplicabilidad definitiva funcional.
- Hacer un balance costo – beneficio de la inclusión del RAP como insumo para la obtención de una mezcla hidráulica tipo MR sobre la base y manufactura en producción.

2. MARCO CONCEPTUAL (GLOSARIO)

El siguiente constituye un recorrido conceptual sobre los diferentes elementos, características y condiciones que son necesarias no solamente mencionar, sino comprenderlas de manera clara y precisa, para el desarrollo de esta investigación:

- AASHTO: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes o por sus siglas en inglés, American Association of State Highway and Transportation Officials. Órgano que establece normas, publica especificaciones y hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de pavimentos.
- Auscultación: Recolección de información sobre la condición estructural y funcional de un pavimento.
- Carga Equivalente de Diseño: Carga de (80 KN) por eje simple con un sistema de rueda doble utilizada como referencia para la evaluación y diseño de pavimentos hidráulicos o flexibles. Véase Figura 3 y 4.
- Carril de Diseño: Carril por el cual se espera la circulación del mayor número de cargas de diseño.
- Concreto u Hormigón Hidráulico: Mezcla de alta calidad y perfectamente controlada de cemento portland, agua, aditivos y agregados pétreos óptimamente gradados y dosificados, que se elabora y vibra para formar una masa densa, estable, resistente y de alta durabilidad con el tiempo.
- Coeficiente de Drenaje: Valor aritmético considerado en las metodologías de diseño, que establece el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada, así como el porcentaje en tiempo sobre el cual un pavimento de concreto hidráulico está expuesto a niveles de humedad aproximándose a la saturación.
- Coeficiente de Transmisión de Carga: Valor aritmético considerado en las metodologías de diseño en pavimento de concreto hidráulico, que establece la condición de transferencia de carga entre un paño de concreto y otro por acción de mecanismos o sistemas adicionados a través de las discontinuidades o modulación de los mismos denominados juntas de construcción.
- Deflexión: Deformación vertical elástica que representa la respuesta del pavimento y la subrasante a la carga aplicada.

- Deformación Admisible: Máxima deformación que puede sufrir un material por determinado concepto, sin fallar.

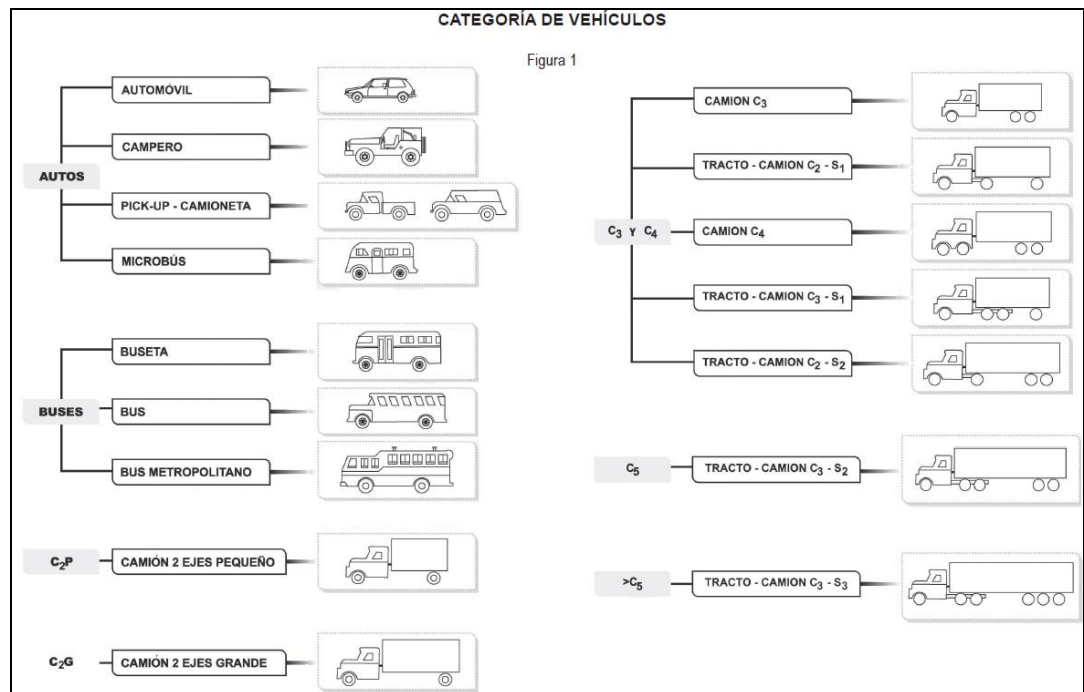


Figura 3. Tipología vehicular

Fuente: Instituto Nacional de Vías - INVÍAS (2011). Volúmenes de Tránsito.
Bogotá: Ministerio del Transporte. Colombia

- Deformación Elástica: Deformación que se recupera totalmente al cesar el esfuerzo que la produjo.
- Deformaciones Elásticas Críticas: Deformación horizontal por tensión en las fibras inferiores de las capas hidráulicas y deformación vertical por compresión en la subrasante.

Si sus valores admisibles son excedidos, se producen agrietamientos y colapsos en la estructura de pavimento.

TIPO DE VEHÍCULO	CARGAS POR EJE (TN)		
	EJE SIMPLE	EJE TANDEM	EJE TRIDEM
BUS	8.0		
C2P	8.0		
C2G	11.0		
C3		22	
C4	8.0	22.0	
C5		22.0(2)	
>C5		22.0	24.0

Fuente. RESOLUCIÓN 004100 DE 28 DIC 2004 (MINISTERIO DE TRANSPORTE)

Figura 4. Cargas por eje (Ton) en función de la tipología vehicular
Fuente: Ministerio del Transporte de Colombia, (2004). Resolución 001400 del 28 de Diciembre/2004. Bogotá: INVÍAS. Colombia

- **Deformación Permanente:** Deformación que se conserva cuando el esfuerzo que la produce ha sido removido.
- **Degradación:** Proceso de desgaste por el cual disminuyen las capacidades funcional y estructural de una calzada, debido a los efectos del tránsito y los agentes ambientales.
- **Eje de Diseño:** Eje utilizado como referencia para la conversión de las cargas reales del tránsito.
- **Erosión:** Es la falla por pérdida de soporte de una losa de pavimento hidráulico objeto de la infiltración y acumulación de agua en su interior.
- **Falla:** Defecto en la superficie de rodamiento de un pavimento que puede afectar adversamente su estabilidad y seguridad, comodidad y rapidez de la circulación del tránsito.
- **Falla Estructural:** Defecto en la superficie de rodamiento, causado por el colapso de una o más de las capas constitutivas del pavimento.
- **Fatiga:** Reducción progresiva de la resistencia de un material debido a la aplicación repetida de esfuerzos o esfuerzos en una losa de pavimento hidráulico objeto del tránsito de diseño.
- **Fresado:** Técnica de extracción de materiales por la intervención de un equipo denominado fresadora.
- **Grieta:** Hendidura vertical que se presenta en la superficie del pavimento, con abertura mayor de (3 mm). Este deterioro es la evolución de una fisura y se desarrolla según las consideraciones establecidas por el pavimento.

- **Índice de Serviciabilidad:** Se define como la condición necesaria de un pavimento para proveer a los usuarios un manejo seguro y confortable en un determinado momento. Se clasifica en serviciabilidad inicial y final. El índice de servicio inicial depende del diseño y de la calidad de la construcción, mientras el final depende de la tolerancia del pavimento antes de que sea imprescindible su rehabilitación o una reconstrucción.
- **Módulo Elástico del Concreto (ME):** Es una medida de la rigidez, o la resistencia del hormigón a la deformación.

El hormigón o concreto hidráulico no es un material verdaderamente elástico, pero cuando ha endurecido por completo y se ha cargado en forma moderada, muestra una curva de esfuerzo de compresión/deformación que, en esencia, es una recta dentro del rango de los esfuerzos usuales de trabajo.

- **Módulo de Reacción:** Es la capacidad de respuesta de una subrasante, suelo de fundación o combinación de éste con afirmados de apoyo (Bases o subbases granulares) para soportar unidades de esfuerzo en función de la deformabilidad aplicada por él. Sus unidades se expresan en (Libras por pulgada cúbica = $\text{Lb/pulg}^3 = \text{pci}$ o en Kg/cm^3 o MPa/m).
- **Módulo de Rotura (MR) del Concreto:** Es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión o flexotracción del concreto u hormigón hidráulico sobre una viga prismática fallada a los tercios medios. Este valor es requerido para el diseño de un pavimento de concreto hidráulico.
- **Pavimento en Concreto Hidráulico:** Es el nombre genérico esgrimido para referirse al concreto u hormigón hidráulico premezclado utilizado como pavimento. Su diseño permite un comportamiento rígido a los esfuerzos de flexión que se encuentran sometidos por el accionar del tránsito y la calidad misma de la subrasante o piso de fundación.
- **Período de Diseño:** Es el intervalo considerado en el diseño de pavimentos, en donde se garantiza la durabilidad de la estructura que depende exclusivamente del análisis de tránsito que soportará el mismo.
- **PCA:** Metodología de diseño en pavimentos rígidos elaborada, experimentada y modelada por la Portland Cement Association en los EEUU. Su traducción en español es la Asociación del Cemento Portland.

- RAP: Pavimento Asfáltico Recuperado, del inglés “RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT”. Es el término dado a los materiales extraídos y/o procesados que contienen una presencia contraída de betún asfáltico que por efectos de envejecimiento difiere de su contenido óptimo volumétrico, y agregados pétreos, ambos provenientes de la intervención de un pavimento flexible por la técnica de “Fresado”.
- Reciclado: Técnica de extracción de materiales por la intervención de un equipo denominado recicladora.
- Resistencia a la Flexo-tracción (MR): Es la medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto dispuesta en un pavimento de concreto. Se mide mediante la aplicación de carga a muestras tomadas en vigas prismáticas con una luz de tres (3) veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa en (MPa = Megapascuales o Kg/cm²) y comúnmente se le conoce como módulo de rotura (MR).

Se utiliza como un ensayo de control en campo, pero puede presentar dificultades en el momento de su evaluación; razón por la cual puede correlacionarse con el ensayo de resistencia a la compresión y/o tracción indirecta para calificar la calidad final del pavimento de concreto hidráulico.

- Resistencia a la Compresión (F'c): Es la característica mecánica principal del concreto hidráulico. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo (Ggeneralmente en Kg/cm², MPa o Libras por pulgada cuadrada = psi = Lb/pulg²).
- Subrasante o Piso de Fundación: Se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. Está basada en las propiedades ingenieriles de clasificación de suelos, resistencia portante y densificación. Se valora a través de ensayos de laboratorio que dichas propiedades en los suelos así la conforman como lo son la determinación con su módulo de reacción y CBR entre otros.

3. MARCO TEORICO

3.1. Aproximación al Concepto de Concreto u Hormigón Hidráulico¹²:

“...El concreto es un material pétreo, artificial, obtenido de la mezcla en proporciones determinadas de cemento portland, agregados y agua. El cemento y el agua forman una pasta que rodea a los agregados (Mortero hidráulico), constituyéndolo en una materia heterogénea...”

El concreto es considerado universalmente como el material de construcción más versátil. Se utiliza en obras arquitectónicas, estructurales, de infraestructura vial, marítima, aérea y ferroviaria. En su estado plástico, se puede moldear y vaciar en cualquier elemento encofrante. Cuando se endurece, brinda propiedades de durabilidad, resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexotracción entre otros.

3.2. Aproximación al Concepto de RAP por Técnica de Fresado¹³:

“...La técnica de fresado para la obtención particular del RAP es utilizada cuando se quiere solo recuperar cierto espesor de un pavimento flexible, con el fin de dejar una superficie plana y regular para un extendido posterior de nueva(s) capa(s) asfáltica(s). A esto se le conoce como “Restitución”...”

La granulometría del material fresado depende principalmente de factores como el espesor, el estado o patología de la capa a intervenir, el tipo de fresadora empleada y la velocidad de avance de la misma. El material recuperado de pavimentos asfálticos se denomina RAP en coincidencia con los enunciados ya realizados, cuya influencia va incidir sobre las características finales del producto a concebir.

Existen (3) tipos de fresados definidos a continuación¹⁴:

¹² Ávila, E. Soto, A. Sánchez, M. (2008). Estériles del carbón y su uso en concreto hidráulico para pavimentos. Congreso internacional de materiales 2013. Medellín: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Colombia. Bolla, G. López, P. Facendini, S. (2008). Hormigón con agregados reciclados de pavimentos colapsados. Buenos Aires: Asociación Argentina del Hormigón Elaborado. Argentina

¹³ Pino, L. (2010). Reciclado de pavimentos en carreteras. La Habana: Universidad de La Habana. Cuba. Don Brock, J. (2004). Fresado y reciclaje. ASTEC International. *Boletín técnico T-127S*. Recuperado el 1 de Noviembre, 1997, de <http://www.astecinc.com>. EUA

¹⁴ Severich, M. Valenzuela, R. (2010). Rehabilitación de pavimentos asfálticos de la ciudad de Cochabamba mediante el fresado y reciclado en frío. *Journal boliviano de ciencias*, (pp 29-39). Recuperado el 3 de Septiembre, 2009, de <http://univalle.edu.co/>. Colombia. WIRTGEN GROUP. (2016). Manual de reciclado en frío. Recuperado el 11 de Mayo, 2016, de <http://www.wirtgen-group.com> - EUA. Valmir, B. (2008). Fresado de pavimentos asfálticos. Sao Paulo: Universidad de Sao Pablo. Brasil. Montejó, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia (2ª Ed). ISBN No. 958-96036-2-9. Colombia

- *Fresado superficial: Es utilizado para corregir problemas superficiales en las capas asfálticas. En países europeos es denominado “Micro-fresado”. Su granulometría es fina con tamaños máximos que oscilan a la altura del tamiz de (9 mm = 3/8”) – Véase Fotografía 3.*



Fotografía 3. Fresado superficial
Fuente: SIMEX GROUP, Francia (2016)

- *Fresado poco profundo: Es utilizado para espesores de capas asfálticas con la que es posible realizar parcheos superficiales a las capas asfálticas. Entiéndase parcheo, aquella intervención a la totalidad del espesor de un concreto asfáltico que se desea restituir por efecto de su fatiga.*

Granulometría de fina a intermedia con tamaños máximos que oscilan a la altura de los tamices (12.5 mm = 1/2”) y (19 mm = 3/4”) – Véase Fotografía 4.

- *Fresado profundo o de profundidad total (Reciclado): Es utilizado para mayores espesores o a niveles profundos pudiendo alcanzar a los afirmados de apoyo (Base o subbase granular).*

A esto se le conoce como bacheo en ciertas oportunidades, cuando el proceso aplica en áreas coyunturales de intervención, y es aquella tarea en donde se recupera el espesor total de un pavimento flexible colapsado desde su plataforma de fundación.

Granulometría de intermedia a gruesa con tamaños máximos que oscilan a la altura de los tamices (19 mm = 3/4”) a (25 mm = 1”) con alguna presencia de sobretamaños coyunturales por encima de (25 mm = 1”) – Véase Fotografía 5.



Fotografía 4 – Fresado poco profundo
Fuente: WIRTGEN GROUP, Alemania (2016)



Fotografía 5 – Fresado profundo
Fuente: WIRTGEN GROUP, Alemania (2016)

El desarrollo mundial ha generado un deterioro global de los recursos naturales, por lo tanto y en la mayoría de los países, se ha creado conciencia de implementar medidas que permitan o adopten un proceso sostenible sobre la búsqueda de un equilibrio económico, ambiental y técnico respectivamente.

Esto se ha venido involucrando de manera paulatina en las políticas públicas de las naciones, desplegándose a las diferentes entidades gubernamentales en todas sus jerarquías.

Una de las formas de generar impacto ambiental, es el vertimiento de sólidos, y dentro de éstos sólidos está el material resultante de los procesos constructivos de las vías, como el caso particular del fresado de las carpetas asfálticas provenientes de los pavimentos flexibles¹⁵.

La disposición final tal como se ha venido realizando durante el tiempo, es retirándolo a las denominadas “Escombreras”, que conduce paralelamente a un “Desperdicio” de un material que aún presta un efectivo servicio, que de no reutilizarse a largo plazo, generará un desabastecimiento de materiales granulares vírgenes con el consecuente aumento de sus costos económicos.

En Colombia, algunas entidades gubernamentales han implementado medidas para la conservación del medio ambiente. Cada día son menos las canteras o fuentes de materiales pétreos que abastecen de productos a las centrales de manufactura en producción de mezclas asfálticas y hormigones hidráulicos. Por lo tanto, para el uso de materiales granulares en proyectos viales, se van reduciendo estas opciones, por lo que es necesario pensar en otro ámbito de aplicación diferente a las mezclas asfálticas de donde se obtiene el RAP objeto de procesos de fresado o reciclado respectivamente.

Ahora bien, siempre ha existido discusión en torno a la concepción, diseño, estabilidad y durabilidad entre un pavimento flexible y uno rígido comúnmente denominado “Pavimento de concreto hidráulico”. El cemento asfáltico es el ligante que se usa para fabricar el concreto asfáltico, y el cemento hidráulico es el ligante que se utiliza en el concreto hidráulico. Ambos son una mezcla homogénea de un ligante (Asfalto o cemento) con agregados pétreos. El concreto asfáltico e hidráulico son dos materiales comúnmente utilizados para la construcción de pavimentos en carreteras.

Montejo et al. (2002), concluye que el término "Flexible" para un pavimento de asfalto y "Rígido" para el pavimento de hormigón, se refiere a la rigidez del material y la forma en que cada uno de ellos transmite las cargas de un vehículo a la base de la carretera subyacente denominada subrasante o plataforma de fundación.

¹⁵ Herrera, C. (2014). Seguimiento al diagnóstico, diseño y construcción de la rehabilitación de las rutas del SITP Suba-Bogotá con estabilización de base granular y asfalto en caliente y reciclado de carpetas asfálticas. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Colombia. Gómez, M. Vásquez, E. Agullo, L. (2011). Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. España. Asociación Colombiana de Productores de Grava. Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOGRAVAS, ASOCRETO, 2011). Experiencia internacional en agregados reciclados. Mitos y realidades. Bogotá, Colombia. Guzmán, M. Pérez, D. (2011). Agregados no convencionales para preparación de concretos ecológicos. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana. Colombia. Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2012). Gestión del RCD. Primer foro internacional manejo integral RCD programa escombros cero. Alcaldía Mayor de Bogotá, Colombia

Los pavimentos flexibles se componen de una capa de asfalto colocada en la parte superior de un afirmado compactado que transiciona a un piso de fundación. El espesor necesario del pavimento o concreto asfáltico, se evalúa mediante la caracterización de las condiciones del suelo o subrasante y el volumen de tráfico por la combinación de vehículos, automóviles, camiones, autobuses y mucho más, que la vía o camino llevará.

Por su parte el hormigón hidráulico dispuesto como pavimento rígido, y que también se coloca sobre un suelo o afirmado de soporte transicional, es calculado en espesor para un pavimento rígido en función del tránsito proyectado, la calidad de la mezcla hidráulica y las propiedades intrínsecas del suelo o subrasante de fundación – Véase Figura 5.

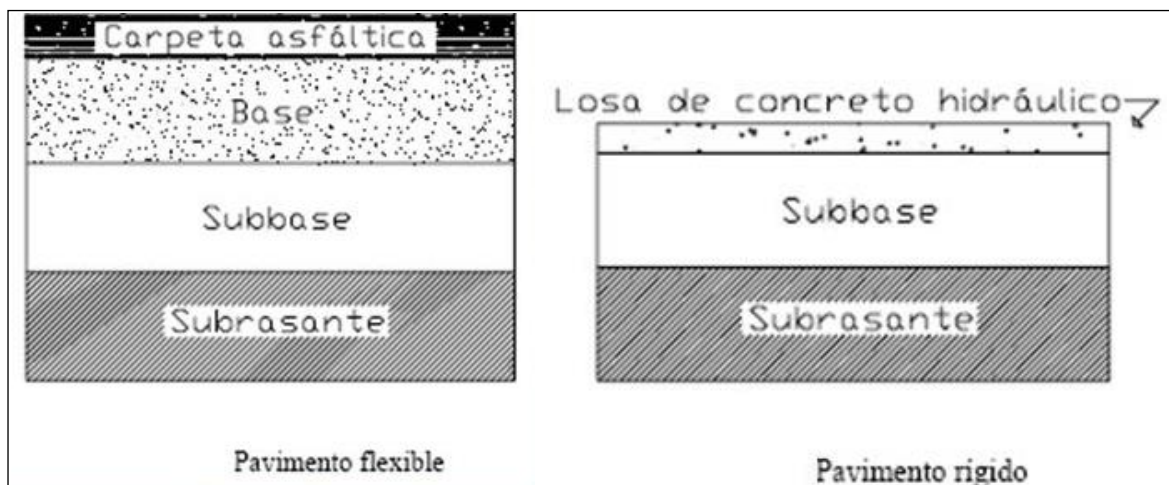


Figura 5. Ilustraciones modelo de estructuras en pavimento flexible y rígido
Fuente: Becker, E. (2013). V Congreso Iberoamericano de Pavimentos. Ciudad de Guatemala: Federación Iberoamericana del Hormigón Premezclado y Asociación Mexicana de la Industria del Concreto. Guatemala

La selección sea del uno o del otro para una aplicación dada, depende de un número limitado de factores. Con frecuencia, un consultor o analista lleva a cabo un estudio de costo del ciclo de vida para evaluar las alternativas de pavimento basado en el precio o costo inicial, así como la rehabilitación y mantenimiento necesario durante la vida útil de diseño estipulada.

Otras consideraciones para la selección del tipo de pavimento incluyen, la facilidad de construcción, los precios unitarios, la durabilidad y seguridad (Resistencia al deslizamiento, ruido, condiciones climáticas o ambientales) entre otros por así mencionar.

Desde el punto de vista energético y de sostenibilidad ambiental, el cemento asfáltico es un subproducto de la refinación del petróleo (Es el residuo del petróleo refinado después de sacar de él las gasolinas, aceites livianos, pesados y polímeros)¹⁶. Son muy pocos los países del mundo que tienen petróleo en el proceso de refinación, utilizando energía para someter a este insumo a ciertas temperaturas y presiones constantes para con ello, derivar los subproductos en donde se encuentra particularmente este material. El cemento hidráulico es un producto fabricado mediante un proceso industrial a partir de la caliza y la arcilla, de amplia abundancia prácticamente en todos los países del mundo¹⁷.

De los (194) países que actualmente existen en el globo terráqueo, entre (94) y (113) de ellos fabrican cemento hidráulico. Esto representa aproximadamente un (54%) del total de las naciones conformadas¹⁸. En los primeros años, la energía utilizada para fabricar cemento era a base de hidrocarburos, como el gasóleo o diésel. Hoy en día, ha ido cambiando para ser menos dependiente del petróleo y librarse de la fluctuación en los precios internacionales cotizados. El costo del cemento asfáltico está íntimamente relacionado al precio internacional del petróleo, lo que lo hace sumamente inestable y variable. Esa variación irregular, muy sensible a los acontecimientos mundiales, se compara con el precio del cemento hidráulico en el mismo periodo, y hace que éste sea mucho más constante, predecible y razonable.

Los pavimentos de concreto no solo son más económicos hoy por hoy, sino que son mucho más eficientes desde el punto de vista energético y totalmente sostenibles en el tiempo (Durabilidad), pues dependen básicamente de un proceso de fabricación más o menos simple que utiliza materias primas abundantes en la naturaleza, y no de un proceso de extracción de un recurso natural cada vez más escaso. Por ello, lo que hoy en día se concibe como aprovechamiento en el uso de agregados no convencionales o reciclables¹⁹ (Caso particular del RAP), son buenas alternativas para conjugar y optimizar la aplicabilidad entre un pavimento y el otro, como alternativa de solución totalmente viable entre las partes.

¹⁶ Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL, 2012). Manual técnico de productos. Bogotá: Colombia

¹⁷ Sánchez De Guzmán, D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

¹⁸ INDEXMUNDI (2014). Recuperado el 1 Agosto, 2014, de http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/cement/cement_t22.html

¹⁹ Guzmán, M. Pérez, D. (2011). Agregados no convencionales para preparación de concretos ecológicos. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana. Colombia. Sánchez De Guzmán, D. Jaramillo, D. (2012). Evaluación de los concretos en pavimentos rígidos. Reunión del Concreto RC-2012. Cartagena: Colombia. Congress Concrete With Recycled Aggregates For Roads – 16th Word Meeting Lisboa (2012). Hormigón con agregados reciclados para carreteras. Paraná: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil. Argentina. Escárraga, A. (2015). Concreto con material reciclado. Blog 360º Concretos Argos S.A. Agregados Reciclados - Qué y Para Qué? Recuperado el 05 Abril, 2015, de <http://www.argos.co/colombia>. Bogotá: Colombia

4. METODOLOGÍA

La metodología presentada a continuación despliega de forma detallada el desarrollo del proyecto para cada una de las fases así planeadas dentro de la ejecución del mismo. El tipo de investigación es descriptiva, explicativa y cuantitativa. El proyecto se basa en estudiar básicamente, la medida de la resistencia a flexotracción (MR), compresión ($f'c$) y modulo elástico (ME) de un concreto hidráulico adicionado en cierta proporción con RAP, teniendo en cuenta la importancia que cumplen los componentes de estas nuevas mezclas con respecto a las directrices formuladas por las “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras – INVÍAS-2013” en su Artículo 500, Tabla 500-6-Véase Figura 6 (Recuadro color rojo).

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Resistencia a la flexotracción a veintiocho (28) días, mínimo (MPa): - Tránsito NT1 - Tránsito NT2 - Tránsito NT3 (Nota 1)	E-414	3.8 4.0 4.2
Contenido de cemento en masa por m ³ de concreto, mínimo (kg) - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	300 350
Relación agua / material cementante, máximo - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	0.48 0.45
Asentamiento (mm): - Formaleta fija - Formaleta deslizante	E-404	25 a 50 13 a 38

Figura 6. (Tabla 500-6). Criterios de diseño para mezclas hidráulicas en pavimento de concreto hidráulicos

Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 500. Colombia

Para el desarrollo y estudio del proyecto, se tomaron algunas directrices metodológicas como las establecidas por la AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (Comité ACI-211 – Formulación SANDINO²⁰ / SÁNCHEZ SABOGAL), además de los principios teóricos formulados por los autores FULLER-THOMPSON, WEYMOUTH²¹, SÁNCHEZ DE GUZMÁN²² y BOLMEY²³, los cuales permitieron obtener datos específicos para los diseños hidráulicos.

²⁰ Sandino, A. (1965). Diseño de mezclas de concreto. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Colombia – Método ACI-211. EUA

²¹ Fuller y Thompson (1907). The laws of proportioning concrete. Weymouth, C. (1933). Effect of particle interference mortars and concrete. University Pensilvania. EUA

De la misma manera fueron contemplados requerimientos complementarios provenientes de la normatividad técnica colombiana – NTC. En este sentido, se tuvo en cuenta las recomendaciones de dicho método, descartando la posibilidad de tener al RAP como un agregado de granulometría uniforme o de tipo monogranular, debido a que este insumo en la elaboración de las mezclas en obra no cumple con esta característica propia como tal.

Principalmente, la incorporación del RAP se hace a través de la participación y reemplazo parcial del agregado grueso en la mezcla, más no como agregado fino. Lo anterior, soportado y justificado según las directrices y formulamiento establecido bajo criterios granulométricos de obtención sobre una fórmula de trabajo “compensada” según las formulaciones consideradas particularmente por los autores FULLER-THOMPSON (1907), WEYMOUTH (1933), SÁNCHEZ DE GUZMÁN (1996) y BOLOMEY (1947) respectivamente.

Por lo tanto, se realizaron ensayos de laboratorio que muestran las características y bondades propias de los materiales, además de ciertos análisis complementarios de control de calidad. Esta metodología mostrará los procedimientos particulares a tener en cuenta dentro de sus propiedades individuales, así como su participación en conjunto para la obtención del concreto normal como producto final adicionado con RAP.

4.1. Características del RAP

Como ya se mencionó y dando una ilustración más agregada, el origen de su obtención se remonta a una técnica de desbaste en frío proveniente de la intervención a superficies fatigadas de concreto asfáltico con ayuda de un engranaje constituido por un “tambor-desbastador” en ángulos diversos, provisto de puntas de carburo de tungsteno en movimiento giratorio continuo ejecutado por técnica de abrasión – Véase Fotografía 6.

Este insumo que aparte de ofrecer un estado intrínseco de nula plasticidad (NP) pero con presencia heterogénea granulométrica, aporta soporte en peso unitario por unidad volumétrica compacta (γ_d normatividad INVE-142, NTC-676, ASTM 1557, AASHTO T-180) que depende en cierta proporción de la cantidad de asfalto residual y porcentaje de absorción presente en él.

Esta propiedad no es estimada como finalidad en la presente investigación, y más que todo, es un complemento al proceso de tipificación aquí mostrado y analizado – Véase Anexo A.

²² Sánchez de Guzmán, D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Universidad Pontificia Javeriana (3ª Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0. Colombia

²³ Bolomey (1947), Neville, A. (1979). Tecnología del concreto. México D.F.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México

En su propiedad de absorción y otras que a continuación se mencionan, se detectaron “ciertas” ventajas y desventajas como lo son, el aprovechamiento en la medida de su gravedad específica, textura y presencia residual de betún, siendo ésta última la de mejor beneficio en la reelaboración de mezclas asfálticas. De la misma forma, pero bajo cierta restricción objeto de su incompatibilidad interactiva cuando se incluye en las mezclas hidráulicas, éste muestra una mínima tendencia al fenómeno de “flotado”, además de descompensar el color y aspecto estético del concreto a la vista.



Fotografía 6. Tambor-desbastador giratorio fresadora W-1500
Fuente: WIRTGEN GROUP, Alemania (2016)

Lo anterior debido a la presencia de algunos signos de meteorización o envejecimiento, pérdida de dureza e impermeabilidad objeto del betún que sigue adherido en menor proporción. Precisamente, son éstas propiedades las que serán evaluadas con respecto a los ensayos de caracterización básicos así establecidos para los agregados nuevos o vírgenes, con los que simultáneamente así se caracterizarán. Esto, basados en los trabajos y trazabilidad ejecutada a lo largo de los (10) meses de investigación.

Como fue debidamente mencionado en el primer numeral de esta tesis de maestría, al reciclarse el RAP, su reutilización - *generalmente luego de cierto tratamiento postulado en diseño para la rehabilitación de un pavimento flexible que ha cumplido una finalidad inicial* -, éste puede emplearse de nuevo en su aprovechamiento para la construcción de capas asfálticas.

Ahora bien, también el RAP puede obtenerse del proceso de reciclado como se mencionó en el Capítulo 1 de la presente investigación, cuya actividad es realizada precisamente con ayuda de una máquina recicladora especialmente diseñada para lograr la capacidad de reciclar en una sola pasada, capas de pavimento en grandes espesores.

Su elemento más importante es el “rotor-fresador-mezclador” equipado con un gran número de puntas similares a las de la Fotografía 6, y que son especialmente diseñadas para este tipo de actividad.

El tambor rota y pulveriza “casi todo” el material de la estructura de pavimento existente (Granulares y concreto asfáltico), y a la vez, puede incorporar dependiendo del proceso constructivo, insumos tales como el agua, aditivos líquidos (Emulsión asfáltica, asfaltos espumados), cemento portland y cal hidratada o viva entre otros – Véase Figura 7.



Figura 7. Tambor rotor-fresador-mezclador recicladora WR-200i
Fuente: WIRTGEN GROUP, Alemania (2016)

Este proceso no fue tenido en cuenta para el desarrollo de la presente investigación, habida cuenta que para la manufactura de los concretos hidráulicos no poseen la incorporación de ningún tipo de agregados complementarios.

Sobre la caracterización adelantada, el RAP no posee un cumplimiento normativo intrínseco a la luz de las propias especificaciones INVÍAS-2013, por lo que su valoración depende más del uso granulométrico que se le quiera brindar, así como de las propiedades mecánicas y dinámicas complementarias que proporcione en compañía de otro agregado o por sí solo para su conversión nuevamente en un producto final, entre ellos las mezclas asfálticas, afirmados granulares y agregado estabilizado con aditivos bituminosos e hidráulicos entre otros por mencionar.

En el país existen algunas especificaciones y trabajos técnicos liderados por el INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO DE BOGOTÁ – IDU, tanto en su actual y vigente Reglamento Técnico IDU-ET-2011, como en el desarrollo de algunas guías complementarias para su utilización y aprovechamiento normativo.

Dentro de ellos se puede mencionar los Artículos 450-11 “Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica”, 451-11 “Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con asfalto espumado” y 454-11 “Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con cemento portland”, además de las guías GU-GE-010 “Estabilización del material producto del reciclaje en frío de pavimentos asfálticos” y GU-GE-011 “Reciclaje de pavimento asfáltico in situ estabilizado con aditivos bituminosos y/o hidráulicos”.

Montejo et al. (2002), recomienda algunos usos granulométricos particulares para su utilización en cualquiera de los escenarios acabados de mencionar. Éstos servirán como línea base para la caracterización del insumo incorporado en una proporción al agregado grueso definitivo – Véase Figuras 8 y 9 respectivamente.

Gradaciones sugeridas para el reciclaje en frío								
Tamiz		Porcentaje que pasa						
		Gradación abierta			Gradación densa			
mm.	Plg.	A	B	C	D	E	F	G
28,3	1 1/2	100			100			
25	1	95-100	100		90-100			
19	3/4		90-100					
12,5	1/2	25-60		100		100	100	100
9,5	3/8		20-55	85-100				
4,5	Nº 4	0-10	0-10		25-85	75-100	75-100	75-100
2,36	Nº 8	0-5	0-5					
1,18	Nº 16			0-5				
0,3	Nº 50						15-30	
0,15	Nº 100							15-65
0,075	Nº 200	0-2	0-2	0-2	3-15	0-12	5-12	12-20

Figura 8. Gradaciones sugeridas reciclaje en frío y gradación fresado original-a.
Fuente: Montejo, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia (2ª Ed). ISBN No. 958-96036-2-9. Colombia

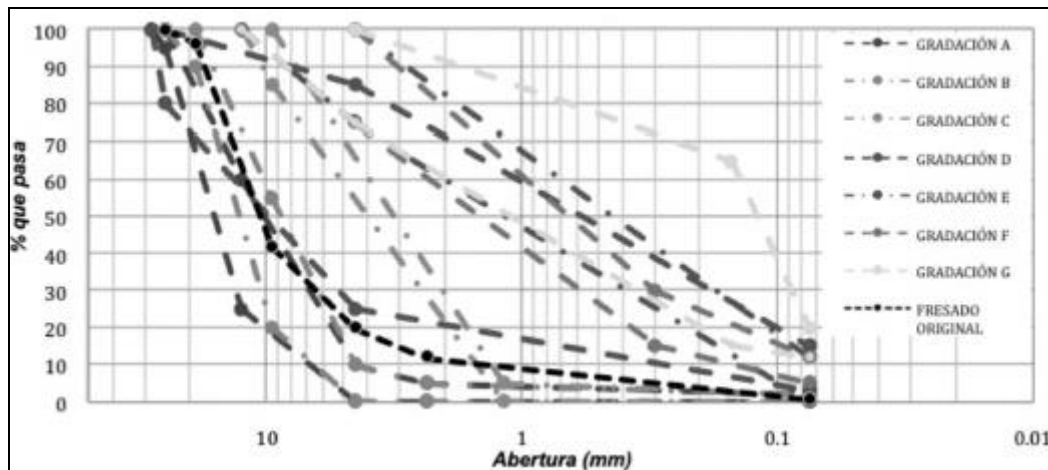


Figura 9. Gradaciones sugeridas reciclaje en frío y gradación fresado original-b.
Fuente: Montejo, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia (2ª Ed). ISBN No. 958-96036-2-9. Colombia

En total, se estudió una única muestra identificada con la nomenclatura AMP-389 para el RAP en mención, proveniente de una gradación típica promedio de mezcla asfáltica densa en caliente (Tamaño máximo $\frac{3}{4}$ "=19 mm), porcentaje de asfalto residual (4.8%) técnicamente denominada MDC-19 según artículo 450 bajo enfoque normativo INVÍAS-2013 – Véase Anexo A.

Como tipificación al RAP se evaluarán algunas de sus propiedades básicas “aplicables” para esta investigación, dentro de las que están su granulometría (INVE-213/782), extracción de asfalto (INVE-732), equivalente de arena (INVE-133), densidad bulk - porcentaje de vacíos de los agregados sueltos y compactos (INVE-217), gravedad específica - absorción de agregados finos y gruesos (INVE-222/223), caras fracturadas (INVE-227), desgaste en máquina de los ángeles (INVE-218/219), desgaste micro-deval (INVE-238), resistencia mecánica del agregado grueso por el método de (10%) finos (INVE-224), angularidad de la fracción fina (INVE-239), índices de forma (INVE-230) y relación (5:1) partículas planas – alargadas (INVE-240) entre otros – Véase Anexos A y N al respecto.

4.2. Características de los agregados pétreos vírgenes

Siguiendo con el proceso de estudio, se mantuvieron las directrices base para la caracterización y manufactura de las mezclas hidráulicas por medio de la incorporación inobjetable de gravas y arenas vírgenes provenientes de la fuente “Pescadero” que utiliza la organización ASFALTART S.A.

Como tipificación a la grava y arena (Agregados grueso y fino respectivamente), se evaluaron las siguientes propiedades básicas objeto al cumplimiento normativo exigido en el Artículo 500 de las especificaciones INVÍAS-2013 y parte de la norma técnica colombiana NTC- 174 – Véase Figuras 10 a 15 respectivamente.

Tabla 500 - 1. Granulometría para el agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico							
TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)						
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.600	0.300	0.150
	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100
% PASA							
UNICA	100	95-100	80-100	80-85	25-60	10-30	2-10

Figura 10. (Tabla 500-1). Granulometría para el agregado fino en pavimentos de concreto hidráulico²⁴

Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 500. Colombia

²⁴ Nota 1 – Elaboración propia: Existe un error en la normatividad INVÍAS-2013 al estipular para el tamiz No. 16, un uso granulométrico sobre el % pasa de (80-85) cuando realmente es (50-85)

Tabla 500 - 3. Granulometrías para el agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico										
TIPO DE GRADACIÓN		TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
		63.0	50.0	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36
		2 ½"	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	No. 4	No. 8
		% PASA								
AG 1	Fracción 1: 2 ½" a 1"	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-
	Fracción 2: 1 ½" a No.4	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5
AG 2	Fracción 1: 2" a ¾"	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-
	Fracción 2: 1" a No. 4	-	-	-	100	90-100	-	20-5	0-10	0-5
AG 3	1 ½" a No. 4	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5

Figura 11. (Tabla 500-3). Granulometría para el agregado grueso en pavimentos de concreto hidráulico²⁵
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 500. Colombia

En total se estudiaron (3) muestras para cada pétreo, identificándolos con las nomenclaturas AMP-11, 50, 106 y AMP-13, 54 y 104 respectivamente – Véase Anexo A.

Tabla 500 - 2. Requisitos del agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico		
CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220	10
- Sulfato de sodio		15
- Sulfato de magnesio		
Limpieza (F)		
Índice de plasticidad (%)	E-125 y E-126	NP
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	60
Terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	3
Partículas livianas, máximo (%)	E-221	0.5
Material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200), máximo (%).	E-14	3
Contenido de materia orgánica (F)		
Color más oscuro permisible	E-212	Igual a muestra patrón
Características químicas (O)		
Contenido de sulfatos, expresado como SO ₄ ²⁻ , máximo (%)	E-233	1.2
Absorción (O)		
Absorción de agua, máximo (%)	E-222	4

Figura 12. (Tabla 500-2). Requisitos del agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 500. Colombia

²⁵ Nota 2 – Elaboración propia: Existe un error en la normatividad INVÍAS-2013 al estipular para el tamiz de 3/8", un uso granulométrico sobre el % pasa de (20-5) cuando realmente es (20-55)

Tabla 500 - 4. Requisitos del agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico		
CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E-218	40 8
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	30
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	90 75
Durabilidad (O)		
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	10 15
Limpieza (F)		
Terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).	E-211	3
Partículas livianas, máximo (%).	E-221	0.5
Geometría de las partículas (F)		
Partículas fracturadas mecánicamente (una cara), mínimo (%)	E-227	60
Partículas planas y alargadas (relación 5:1), máximo (%)	E-240	10
Características químicas (O)		
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como SO_4^{2-} , máximo (%)	E-233	1.0
Reactividad álcali - agregado grueso y fino: Concentración SiO_2 y reducción de alcalinidad R Nota: ver numeral 500.2.1.5.3	E-234	$SiO_2 \leq R$ cuando $R \geq 70$ $SiO_2 \leq 35 + 0.5R$ cuando $R < 70$

Figura 13. (Tabla 500-4). Requisitos del agregado grueso para pavimentos de concreto

Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 500. Colombia

Dentro ellos se puede referenciar su composición granulométrica (INVE-213/782), solidez en sulfato de sodio y magnesio (INVE-220), terrones de arcilla y partículas deleznales (INVE-211), partículas livianas (INVE-221), equivalente de arena (INVE-133), densidad bulk - porcentaje de vacíos de los agregados sueltos y compactos (INVE-217), gravedad específica - absorción de agregados finos y gruesos (INVE-222/223), contenido de materia orgánica (INVE-212), caras fracturadas (INVE-227), desgaste en máquina de los ángeles (INVE-218/219), desgaste micro-deval (INVE-238), resistencia mecánica del agregado grueso por el método de (10%) finos (INVE-224), angularidad de la fracción fina (INVE-239), índice de aplanamiento – alargamiento (INVE-230), relación (5:1) partículas planas – alargadas (INVE-240), coeficiente de pulimiento (INVE-232) y contenido de sulfatos (INVE-233) entre otros – Véase Anexos A, E, F y N respectivamente.

En reactividad “Álcali-agregado grueso/fino” (INVE-234), la organización ASFALTART S.A. tiene incluido en su proceso de manufactura la incorporación de la ceniza cementante procedente de “*Termotasajero*” en un contenido que oscila entre un (15-20%). Lo anterior no aplica en la metodología de investigación.

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 μ m	25 a 60
300 μ m	10 a 30
150 μ m	2 a 10

Figura 14. (Numeral 6.1). Requisitos de gradación para agregado fino
Fuente: NTC-174 (2000). Especificaciones de los agregados para concretos.
Versión 2000-06-21(5ª Actualización). Colombia

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	1,18 mm (No.16)
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25- 60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 mm	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0- 5	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0- 5	-	-
4	37,5 mm a 19,0 mm	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0- 5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10- 30	0- 5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0- 10	0- 5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40- 85	10- 40	0- 15	0- 5	-	-
57	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0- 10	0- 5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20- 55	0- 15	0- 5	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20- 55	0- 10	0- 5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90- 100	40- 70	0- 15	0- 5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85- 100	10- 30	0- 10	0- 5

Figura 15. (Numeral 10.1). Requisitos de gradación para agregado grueso
Fuente: NTC-174 (2000). Especificaciones de los agregados para concretos.
Versión 2000-06-21 (5ª Actualización). Colombia

Para esta investigación, y siendo menos crítico en la manufactura de concretos hidráulicos para pavimentos que en elementos estructurales puestos en servicio, éste valor se consideró con una participación del (15%) en la combinación restante (85%) con el cemento “Concretero” tipo ART (Alta Resistencia Temprana) de CEMEX S.A. – Véase Anexo G.

Los registros adjuntos en la presente memoria, son de uso “Restringido” por parte de la organización que presto la colaboración logística en la ejecución de la presente tesis. Por lo anterior, éstos forman parte del “Know-how” de la empresa, y su reproducción parcial o total (Diferente al uso académico aquí considerado), se encuentra totalmente prohibida, y deberá contar con el permiso pertinente de ASFALTART S.A.

El complemento técnico referido a la caracterización química de los agregados pétreos, incluye simultáneamente la valoración del contenido de sulfatos (SO_4^-) que se mencionó anteriormente y que se encuentra en el Anexo F.

Tanto la normatividad técnica INVÍAS-2013 (Figura 11), como la NTC-174, consideran de estricto cumplimiento a los requisitos anteriormente mencionados, siendo la segunda (NTC-174) la de mayor entendimiento e ilustración respectiva. En la Figuras 16 a 18, se muestra el soporte correspondiente a lo acabado recientemente de mencionar.

A.2 OCURRENCIA DE AGREGADOS REACTIVOS EN COLOMBIA
La extensión y localización de los terrenos geológicos en los que se encuentran los materiales considerados potencialmente reactivos se ilustran en la Figura 2.
En la Figura 1 se sintetiza la información sobre la ocurrencia de rocas con minerales susceptibles a reaccionar con los álcalis del cemento en Colombia, discriminada según los diferentes terrenos geológicos.
La ocurrencia de los minerales reactivos en aluviones y materiales de arrastre, que constituyen la fuente más común de agregados pétreos para la construcción. La explotación de los aluviones y materiales de arrastre da lugar a la utilización de materiales recogidos en sitios relativamente alejados de su lugar de origen, e incluso a la concentración de algunos materiales reactivos que, como la lidita y el cuarzo, son físicamente más resistentes que otros componentes de la roca de la cual proceden.

Figura 16. (Literal A.2). Ocurrencia de agregados reactivos en Colombia
Fuente: NTC-174 (2000) – Anexo A. Especificaciones de los agregados para concretos. Versión 2000-06-21(5ª Actualización). Colombia

4.3. Características del cemento portland

Siguiendo con los procesos de caracterización, el insumo utilizado y con el que la organización ASFALTART S.A. manufactura sus mezclas hidráulicas para pavimentos y es objeto de la presente investigación, es el cemento portland tipo III denominado comercialmente “Concretero (Tipo III)” o ART (Alta Resistencia Temprana).

Este insumo está enmarcado dentro de los lineamientos considerados por las especificaciones NTC-321 y recientemente la NTC-121, que no se modificaba desde el año 1982.

Por lo tanto, buscando que la regulación fuera coherente con el momento de desarrollo en infraestructura por la que atraviesa el país, el comité técnico (99) del ICONTEC, trabajo en desarrollar una nueva normatividad, ajustada a las necesidades reales de la industria.

No.	Terreno	Rocas fuente de agregados
1	Garzón	Intrusivos granitoides, charnoquitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos.
2	Payandé	Intrusivos granitoides, riolitas, traquitas, andesitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos, calizas, areniscas.
3	Cajamarca	Intrusivos granitoides, neises, cuarcitas, mármoles.
4	Cauca Romeral	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos toleíticos, neises, esquistos, liditas o cherts.
5	Dagua	Plutones calcoalcalinos, basaltos toleíticos, calizas, liditas o cherts.
6	Cañas Gordas	Plutones calcoalcalinos, basaltos toleíticos, calizas, liditas o cherts.
7	Baudó	Basaltos pobres en k, liditas, calizas.
8	Sinú	Liditas y calizas
9	Buriticá	Plutones calcoalcalinos, andesita, basaltos, tobas, liditas
10	San Jacinto	Calizas, liditas, areniscas calcáreas.
11	San Lucas	Granitoides, lavas riolíticas y riolitas, tobas, neises cuarzo fedespláticos.
12	Santander	Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, mármoles, calizas.
13	Perijá	Granitoides, riolitas, tobas riolíticas, calizas.
14	Sierra Nevada	Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, calizas.
15	Baja Guajira	Riolitas, espilitas de bajo Al, esquistos félsicos, mármoles, calizas.
16	Cosinas	Granitoides, flujos riolíticos, neises félsicos, mármoles, calizas.

Tomado de INGEOMINAS, U.S.G.S., 1983, mapa de terrenos geológicos de Colombia, publicaciones geológicas especiales de Ingeominas, Bogotá; HOYOS P.F. Y Mejía V.M. VIII Simposio sobre patología de construcciones. reactividad alcalina de los agregados pétreos en Colombia. Universidad Nacional de Colombia Seccional Medellín.

Figura 17. (Literal A.2). Minerales susceptibles a reacción en Colombia
Fuente: NTC-174 (2000) – Anexo A. Especificaciones de los agregados para concretos. Versión 2000-06-21(5ª Actualización). Colombia

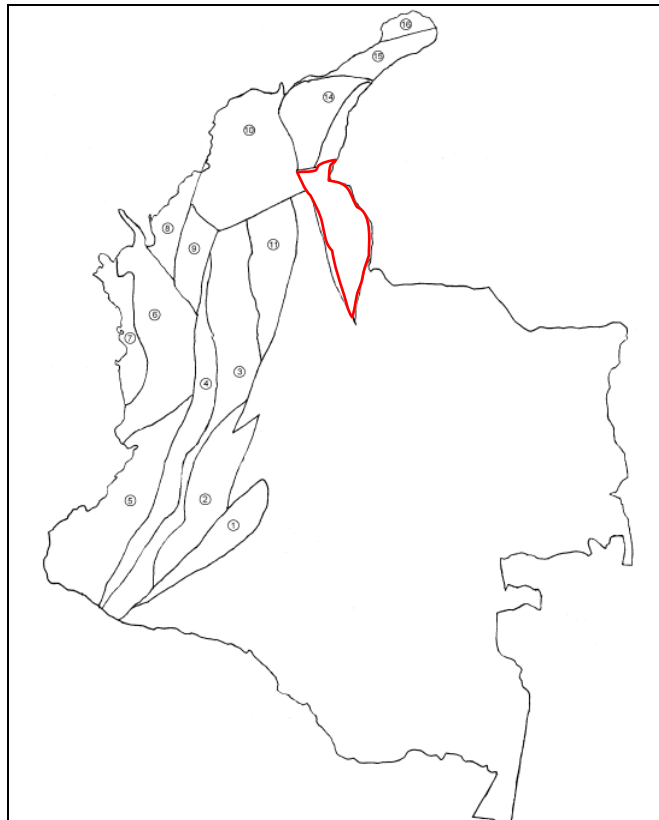


Figura 18. (Literal A.2). Localización terrenos geológicos reactivos en Colombia
Fuente: NTC-174 (2000) – Anexo A. Especificaciones de los agregados para concretos. Versión 2000-06-21(5ª Actualización). Colombia

Ahora, existe una nueva designación en nomenclatura y características especiales en uso, dentro de las que se categorizan la (UG = Uso general para concretos cuando uno o más de los tipos especiales no sean requeridos / ART = Alta resistencia temprana para producción industrializada – estructuras de concreto con puesta en servicio rápida y altas solicitudes estructurales – desempeños en ambientes agresivos / MRS = Moderada resistencia a los sulfatos para concretos con desempeños moderados en resistencias a la compresión y resistencia a los sulfatos – producción de concretos en cimentaciones, muros, contenciones, estructuras y rellenos entre otros / ARS = Alta resistencia a los sulfatos para concretos en ambientes agresivos (Agua de mar y suelos con actividad química) – obras portuarias, plantas de tratamiento de aguas, canales y alcantarillas / MCH = Moderado calor de hidratación para concretos con requerimientos de desempeño especial en temperatura – puentes y tuberías prefabricadas de concreto / BCH = Bajo calor de hidratación para obras en donde no se deban producir dilataciones durante el fraguado ni retracciones durante el secado – estructuras de gran volumen o masivas (Presas, muros, diques entre otros).

También se contempla una opción adicional: Cementos donde se requiera baja reactividad con agregados reactivos álcali-sílice (BRA) y cementos con incorporadores de aire (A). Para cualquiera de los tipos de cemento anteriormente citados, pueden aplicar una o ambas de estas opciones.

Los requisitos formulados por las normas NTC, se consideran más profundos que por los exigidos y estipulados en el Artículo 501 de la normatividad INVÍAS-2013 – Véase Figuras 19 a 21 respectivamente.

PARAMETRO	VALOR
Finura de Blaine, m ² /Kg, min	280
Expansión autoclave, % máx.	0,8
Tiempo de fraguado en minutos (método de Vicat)	
Fraguado inicial, en minutos	45
Fraguado final, en horas	8
Resistencia mínima, MPa	
3 días	8,0
7 días	15,0
28 días	24,0

Figura 19. Características físicas y mecánicas para el cemento portland
Fuente: NTC-121 (2014). Especificación de desempeño para cemento hidráulico.
Versión 2014-06-18 (2ª Actualización). Colombia

PARÁMETROS FÍSICOS		Norma de Ensayo	NTC 121 Tipo ART
Finura	Blaine, mín. (cm ² /gr)	NTC 33	*A
	Retenido Tamiz 45-µm (%)	NTC 294	*A
Cambio de longitud por autoclave expansión, máx. (%)		NTC 107	Máx. 0.8
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat ^B	No menos de, (minutos)	NTC 118	45
	No mas de, (minutos)	NTC 118	420
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx. (%)		NTC 4927	0.020
Resistencia mínima a la compresión, (MPa)			
1 días		NTC 220	11.0
3 días		NTC 220	22.0
28 días		NTC 220	----

Figura 20. Parámetros físicos del cemento portland ART
Fuente: NTC-121 (2014). Especificación de desempeño para cemento hidráulico. Versión 2014-06-18 (2ª Actualización). Colombia

Tabla 501 - 1. Especificaciones de cementos hidráulicos		
DENOMINACIÓN	NORMA ASTM	TIPO DE REQUISITOS QUE ESTABLECE LA NORMA
Cemento Portland	C150	- Ingredientes - Proporciones - Composición química - Requisitos físicos - Algunas propiedades de desempeño
Cemento hidráulico adicionado (nota 1)	C595	
Cemento hidráulico especificado por desempeño	C1157	- Propiedades de desempeño - No hay restricciones sobre la composición del cemento o sus ingredientes.

Nota 1: se excluyen los cementos tipo IS (>70).

Figura 21. (Tabla 501-1). Especificaciones de cementos hidráulicos
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 501. Colombia

De igual manera se incluyen formalmente las “Adiciones activas” que le confieren al cemento mayor durabilidad y densificación, regulando su estabilidad y permitiendo concretos de menor permeabilidad, alto desempeño, deslizado, resistencia inicial, desencofrados rápidos, mejor color a la vista y moderado control en su calor de hidratación. Dentro de ellas se mencionan categóricamente las puzolanas naturales/artificiales, cenizas volantes y las escorias de alto horno. En el Anexo A, se consignan las pruebas de caracterización objeto del estudio durante los meses de investigación según las remisiones llegadas a planta.

4.4. Características del agua de mezclado

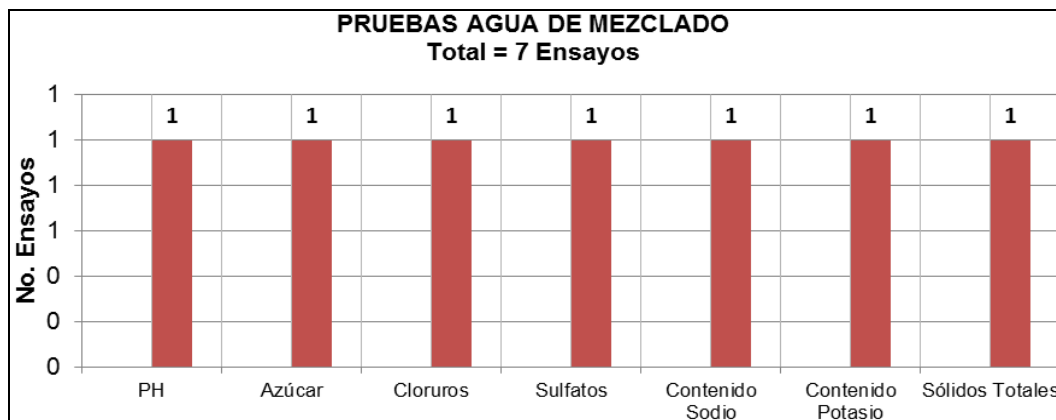
Fueron evaluadas las siguientes propiedades básicas a la fuente “Río Frío”, objeto al cumplimiento normativo exigido en el Artículo 500 de las especificaciones INVÍAS-2013 – Véase Figura 22. Adicionalmente, se procedió con la caracterización complementaria en la media al contenido de azúcar, cloruros, sulfatos, sodio, potasio y sólidos totales como se muestra en el Anexo A.

Las pruebas fueron subcontratadas en compra de servicios al “Laboratorio Químico de Consultas Industriales” de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER – UIS, por parte del operador de servicios internos de ASFALTART S.A. - Laboratorio CONTROLAB INGENIERÍA S.A.S.

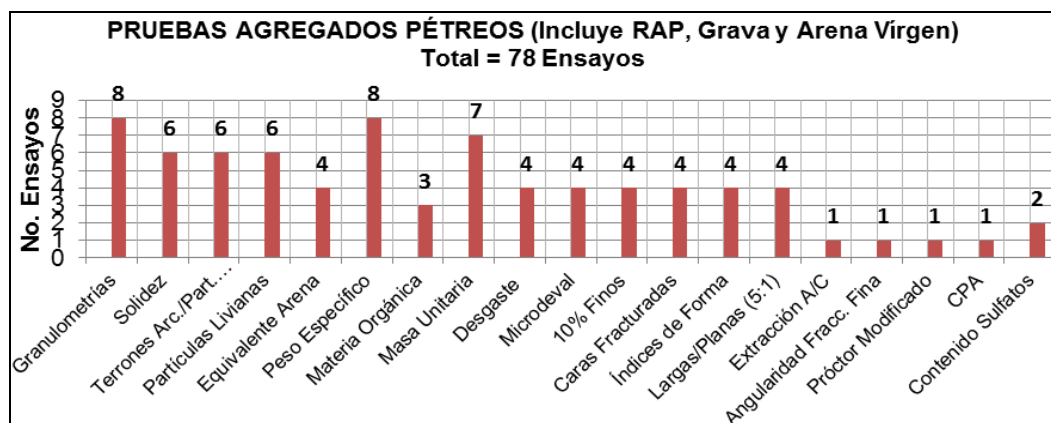
Tabla 630 -5.Requisitos para el agua de mezcla		
PROPIEDAD	NORMA DE ENSAYO	LÍMITES
pH	ASTM D 1293	5.5 – 8.5
Resistencia a compresión, % mínimo en control a 7 días	INV E-410	90
Tiempo de fraguado, desviación respecto del tiempo de control (horas:minutos)	ASTM C 403	de 1:00 inicial a 1:30 final

Figura 22. (Tabla 630-5). Requisitos para el agua de mezclado
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
Artículo 630. Colombia

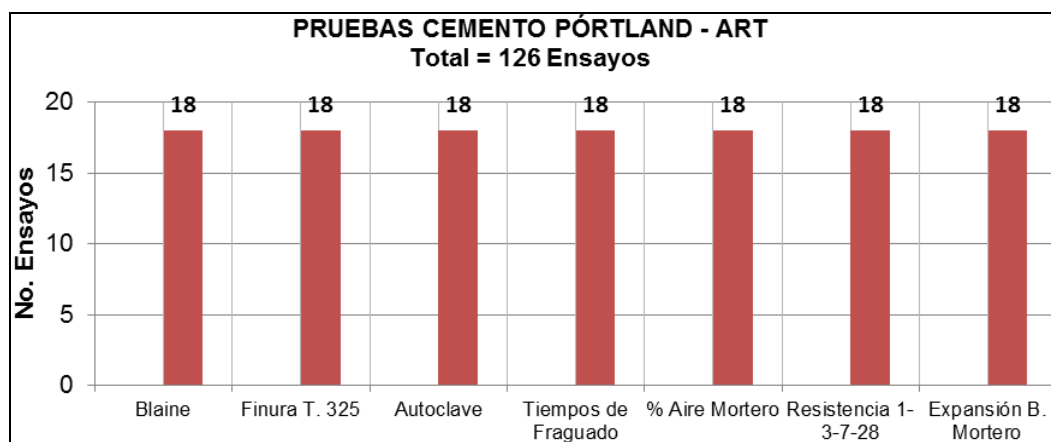
En el Anexo I de la presente investigación y como se muestra en las Gráficas 1 a 3, se consolida estadística y complementariamente a lo citado, todas y cada una de las pruebas de caracterización correspondientes a los insumos utilizados durante el tiempo de estudio en el laboratorio operador de ASFALTART S.A.



Gráfica 1. Pruebas al agua de mezclado - Fuente “Río Frío”
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2. Pruebas en agregados pétreos (Incluye RAP, grava y arena vírgen)
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3. Pruebas en cemento portland - ART
Fuente: Elaboración propia

4.5. Diseño de mezclas hidráulicas

Cumpliendo con las exigencias estipuladas en la Tabla 500-6 de las ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCION DE CARRETERAS – INVÍAS-2013 en su Artículo 500 - Véase Figura 6 ya referenciada, se procedió a realizar los diseños de las mezclas hidráulicas para uso en pavimentos de concreto hidráulico tipos (MR-3.8 MPa = 38 Kg/cm² = 543 PSI / MR-4.0 MPa = 40 Kg/cm² = 571 PSI / MR-4.2 MPa = 42 Kg/cm² = 600 PSI) – Véase Anexo C.

Estas formulaciones de trabajo se obtuvieron previo chequeo y análisis, con los principios teóricos de los autores enunciados en el segundo párrafo del Capítulo 4 de la presente investigación.

Con ayuda de ellos, se seleccionó en función del tamaño máximo nominal (TMN) y compensación granulométrica más ajustada, optar por un porcentaje de combinación entre el agregado grueso definitivo – que es la suma de la grava virgen y el RAP - y la arena respectivamente.

En total se realizaron (3) diseños, dentro de los cuales se obtuvieron los siguientes porcentajes de combinación final – Véase Tabla 1 y Anexo C.

Tabla 1. Proporciones en frío de agregados pétreos para diseño de mezclas

Mezcla	Ag. Grueso (80% grava + 20% RAP)	Ag. Fino (100%)
MR-3.8 MPa	60%	40%
MR-4.0 MPa	57%	43%
MR-4.2 MPa	57%	43%

Fuente: Elaboración propia

Los materiales que componen las mezclas de concreto con adición de RAP, fueron proporcionadas exclusivamente por la organización auspiciadora, quienes apoyaron el estudio de esta investigación, con el objetivo de aprovechar la optimización y reducción de materiales que se obtienen simultáneamente entre su fuente de explotación de agregados pétreos vírgenes en el río “Chicamocha”, y algunos contratos de infraestructura vial en donde consideran reprocesos de calidad objeto la instalación compacta de mezclas asfálticas en superficies de rodadura para pavimentos flexibles.

4.5.1. Medida de la resistencia a la flexotracción en viguetas

La resistencia a la flexión de una mezcla hidráulica se encuentra referida de manera directa con su módulo de rotura, denominado MR. Este factor, es la principal valoración en el comportamiento estructural de un pavimento de concreto hidráulico. Comúnmente se evalúa sometiendo un molde tipo “vigüeta” de concreto a un esfuerzo de flexión mediante dos cargas concentradas. Este test es prácticamente un ensayo a la fatiga, cuya duración es totalmente diferente a la falla que convencionalmente genera la rotura de un cilindro a la compresión. Su diferencia está en la velocidad de aplicación de carga y otros factores complementarios como se muestra en el Anexo K.

El alcance técnico que rige el test bajo especificación INVÍAS-2013 sobre su Artículo 500, es la norma de ensayo INVE-414, basado igualmente en correspondencia y analogía con la norma ASTM C 78 - 880, así como la norma técnica colombiana NTC-2871 – Ver Figura 23.

Las viguetas tienen una sección transversal cuadrada de aproximadamente (150 mm) de lado y una longitud que puede variar entre (450 a 500 mm), siendo la primera la más común entre ellas – Ver Anexo N.

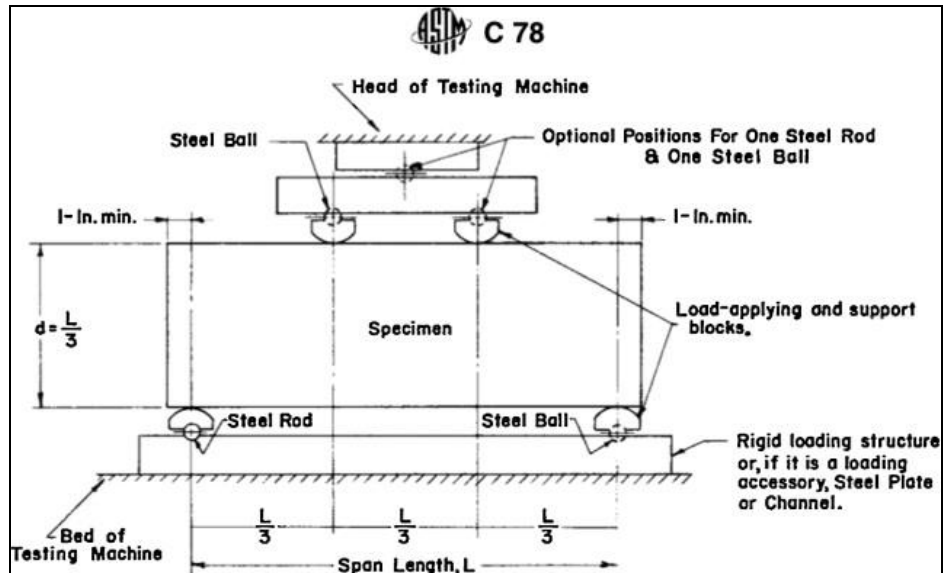


Figura 23. Resistencia a la flexión del concreto

Fuente: ASTM C78 – C78 M (2002). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (Utilizando viga simple con carga en los tercios del claro). EUA.

Las probetas se elaboraran vaciando el concreto fresco en dos capas sobre moldes metálicos, compactando cada capa con la varilla empleada para hacer las probetas cilíndricas como los exige la norma de ensayo INVE-402 (Tablas 402-1) – Véase Figura 24. Los especímenes se fallaron a catorce (14) y veintiocho (28) días de edad.

El número de golpes por capa, es el establecido de acuerdo a los requisitos fijados por la Tabla 402-2 – Véase Figura 25.

Este ensayo consiste en apoyar la vigueta sobre un par de pines de asentamiento, dejando una luz intermedia, en la que se carga por dos puntos situados entre los tercios medios de sus apoyos, una fuerza tal produzca fracturación de tipo transversal dentro de longitud abarcada por los mismos – Véase Fotografía 7.

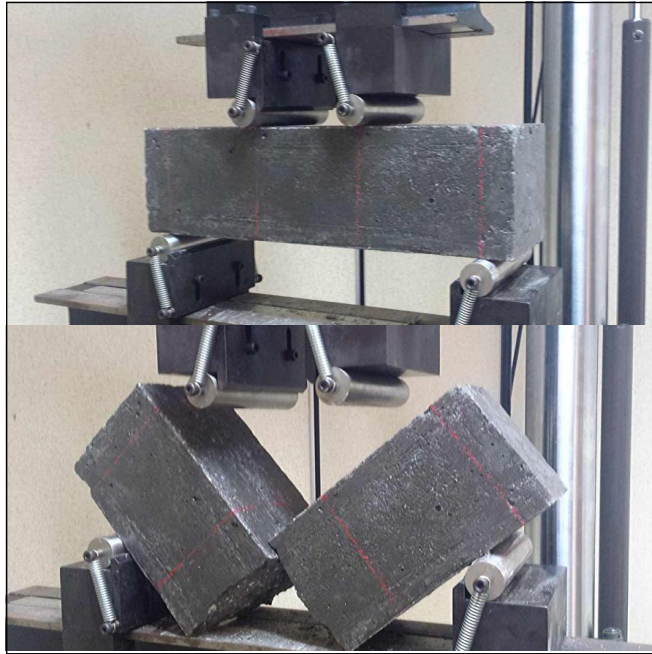
La resistencia a la flexión o módulo de rotura (MR) se calcula mediante la siguiente expresión, siempre y cuando la falla ocurra dentro del tercio medio de la luz libre en la vigueta fallada – Véase Ecuación 1.

Tabla 402 - 1. Número de capas requeridas por espécimen		
TIPO Y TAMAÑO DEL ESPÉCIMEN	MÉTODO DE CONSOLIDACIÓN	NÚMERO DE CAPAS DE ESPESOR APROXIMADAMENTE IGUAL
Cilindros		
<i>Diámetro, mm (pg.):</i>		
75 a 100 (3 a 4)	Apisonado	2
150 (6)	Apisonado	3
225 (9)	Vibración	4
hasta 225 (9)	Vibración	2
Prismas y cilindros para <i>creep</i> horizontal		
<i>Espesor, mm (pg.):</i>		
hasta 200 (8)	Apisonado	2
más de 200 (8)	Apisonado	3 o más
hasta 200 (8)	Vibración	1
más de 200 (8)	Vibración	2 o más

Figura 24. (Tabla 402-1). Número de capas requeridas por espécimen
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
Norma de ensayo INVE-402. Colombia

Tabla 402 - 2. Diámetro de la varilla y número de golpes por capa para el moldeo de los especímenes		
CILINDROS		
DIÁMETRO DEL CILINDRO mm (pg.)	DIÁMETRO DE VARILLA mm (pg.)	NÚMERO DE GOLPES POR CAPA
75 (3) a < 150 (6)	10 (3/8)	25
150 (6)	16 (5/8)	25
200 (8)	16 (5/8)	50
250 (10)	16 (5/8)	75
VIGAS Y PRISMAS		
ÁREA DE LA SUPERFICIE SUPERIOR DE LA MUESTRA cm ² (pg ²)	DIÁMETRO DE VARILLA mm (pg.)	NÚMERO DE GOLPES POR CAPA
160 (25) o menos	10 (3/8)	25
165 a 310 (26 a 49)	10 (3/8)	1 por cada 7 cm ² (1 pg ²) de área
320 (50) ó más	16 (5/8)	1 por cada 14 cm ² (2 pg ²) de área
CILINDROS DE <i>CREEP</i> HORIZONTAL		
DIÁMETRO DEL CILINDRO mm (pg.)	DIÁMETRO DE VARILLA mm (pg.)	NÚMERO DE GOLPES POR CAPA
150 (6)	16 (5/8)	50 en total, 25 a lo largo de cada lado del eje

Figura 25. (Tabla 402-2). Número de golpes por capa moldeo de especímenes
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
Norma de ensayo INVE-402. Colombia



Fotografía 7. Validación ensayo flexotraccion
Fuente: Elaboración propia

$$MR = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2}$$

Ecuación 1. Determinación del módulo de rotura en el tercio medio

Fuente: ASTM C78 – C78 M (2002). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (Utilizando viga simple con carga en los tercios del claro). EUA.

Cuando la falla ocurre fuera del tercio medio de la vigueta pero a menos del (5%) de la luz libre, la resistencia a la flexión o módulo de rotura (MR) se calcula mediante la expresión mostrada en la Ecuación 2.

$$MR = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot d^2}$$

Ecuación 2. Determinación del módulo de rotura por fuera del tercio medio

Fuente: ASTM C78 – C78 M (2002). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (Utilizando viga simple con carga en los tercios del claro). EUA.

En el evento que la distancia resulte mayor al (5%), el ensayo se debe repetir. En ambos casos, la nomenclatura mostrada obedece a la siguiente interpretación:

- P = Carga de rotura
- L = Luz efectiva entre apoyos extremos
- b = Ancho de la vigueta
- d = Alto de la vigueta
- a = Distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara interior de la vigueta

4.5.2. Medida de la resistencia a la compresión en cilindros

Se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (Kg/cm^2), megapascuales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ($\text{Lb}/\text{pulg}^2 = \text{PSI}$) a una edad de (28) días.

Un megapascal (1 MPa) equivale a la fuerza de un newton por milímetro cuadrado ($1 \text{ N}/\text{mm}^2$) o ($10.2 \text{ Kg-f}/\text{cm}^2$) kilogramos-fuerza por centímetro cuadrado.

Se pueden usar otras edades para las pruebas, pero es importante saber la relación entre la resistencia a los (28) días y la resistencia en otras edades. La resistencia a los (7) días normalmente se estima entre un (70%) o (75%) de la resistencia a los (28) días y las resistencias a los (56) y (90) días son aproximadamente el (10%) y (15%) mayores que la resistencia a los (28) días.

La resistencia a la compresión especificada se designa con el símbolo (f'_c) y la resistencia a compresión real del concreto (f_{cr}) debe excederla. Esta última variable es función de la relación agua-cemento (A/C), cuanto la hidratación ha progresado, el curado, sus condiciones ambientales y la misma edad del concreto.

Comúnmente se evalúa sometiendo un molde tipo “cilindro” a un esfuerzo uniaxial de compresión mediante una carga. Este test posee correlación con el ensayo a la fatiga, y parte de la presente justificación se puede consultar en el Anexo K de esta investigación. La patología en agrietamiento se clasifica según las esquematizaciones mostradas en la Figura 26 y Anexo D, sobre alguna base literaria recomendada por la American Concrete Institute – ACI.

El alcance técnico que rige el test bajo especificación INVÍAS-2013 sobre su Artículo 630, es la norma de ensayo INVE-410, basado igualmente en correspondencia y analogía con la norma ASTM C 39/39M, así como la norma técnica colombiana NTC-550/673 – Ver Figura 27.

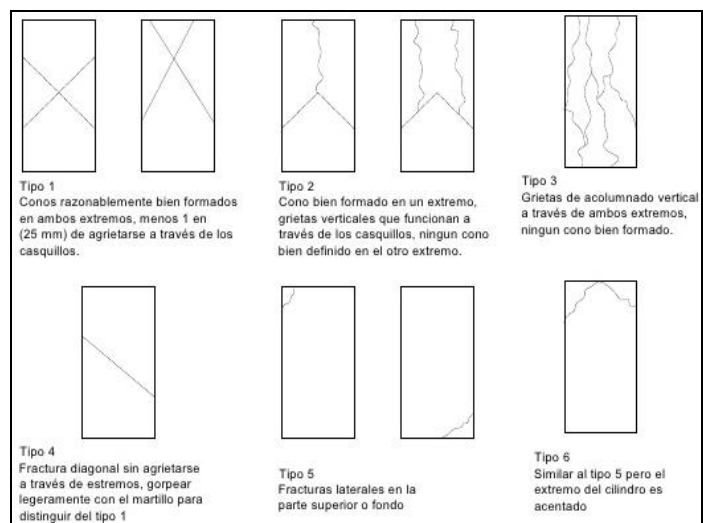


Figura 26. Diagrama esquemático de los patrones típicos de fractura

Fuente: ACI. www.utpl.edu.ec/aci

Las cilindros para pruebas de aceptación deben tener un tamaño de (6"X12" = 150X300 mm) o (4"X8" = 100X200 mm), cuando así se especifique. Para la presente investigación se utilizaron las primeras – Véase Fotografía 8 y Anexo N. Las probetas más pequeñas tienden a ser más fáciles de elaborar y manipular en campo y en laboratorio. El diámetro del cilindro utilizado deberá ser como mínimo tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplee.



Fotografía 8. Validación ensayo compresión

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga, generalmente los cilindros se “cabecean” con mortero de azufre según enfoque normativo ASTM C 617 o con almohadillas de neopreno bajo norma ASTM C 1231. El “cabeceo” de azufre se debe aplicar como mínimo dos horas antes y preferiblemente un día antes de la prueba. La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección – Véase Figura 27.

La norma ASTM C 39 presenta los factores de corrección en caso de que la razón longitud-diámetro del cilindro se halle entre (1.75) y (1.00), lo cual es poco común. Se someten a prueba por lo menos dos cilindros de la misma edad y se reporta la resistencia promedio como el resultado de la prueba, al intervalo más próximo de (0.1 MPa). Para nuestro caso, se evaluaron edades por parejas a (7, 14 y 28) días de edad respectivamente.

4.5.3. Medida del módulo de elasticidad en cilindros

Es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el concreto y su deformación unitaria. Representa la rigidez ante una carga impuesta sobre el mismo.

La elasticidad, es la propiedad mecánica que hace que los materiales sufran deformaciones reversibles por la acción de las fuerzas exteriores que actúan sobre ellos. La deformación, es la variación de forma y dimensión de un cuerpo. Un material es elástico cuando la deformación que sufre ante la acción de una fuerza, cesa al desaparecer la misma.

Los materiales totalmente elásticos pueden llegar hasta cierta deformación máxima, que es lo que se conoce como “límite elástico”. Si se sobrepasa este límite, la deformación del material es permanente y sus propiedades cambian.

Si el esfuerzo que incide sobre el material supera las fuerzas internas de cohesión, el material se fisura y termina por fallar. Lo anterior se puede observar y entender en la Figura 28, en donde se esclarece los estados de deformación de un material.

Su medida se hace a los (28) días de edad según norma de ensayo INVE-424 o sus correspondientes NTC-4025 / ASTM C 469. Tiene como principio, la aplicación de una carga estática y de la correspondiente deformación unitaria que así sea producida.

La primera fase es la zona elástica, donde el esfuerzo y la deformación unitaria pueden extenderse aproximadamente entre (0% al 40% o 45%) de la resistencia a la compresión del concreto – Véase Figura 29.

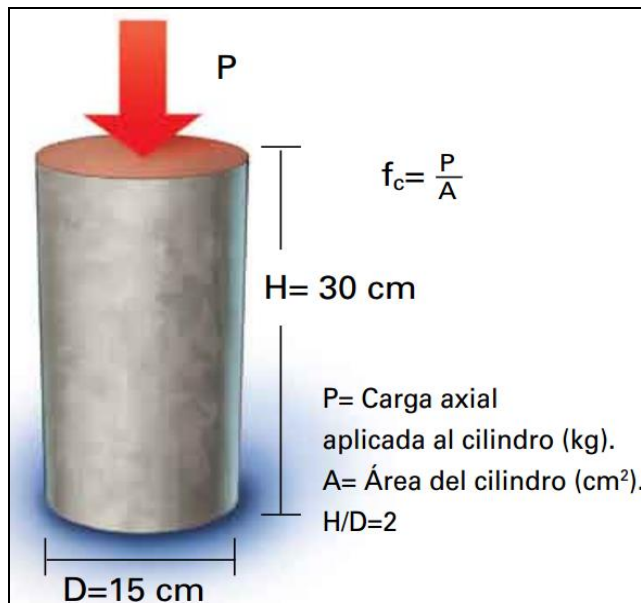


Figura 27. Determinación de la resistencia a la compresión simple
Fuente: Fuente: IMCYC C39 (2008). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. El concreto en obra: Problemas, causas y soluciones. Sección coleccionable 15. México. www.imcyc.com

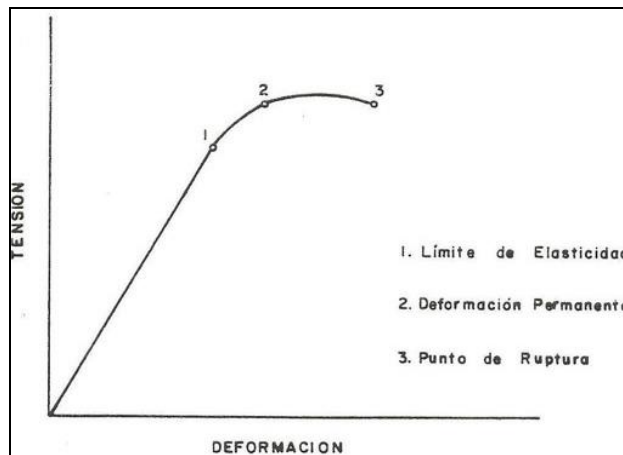


Figura 28. Estados de deformación de un material
Fuente: Blog 360 grados en concreto – Organización ARGOS S.A. - <http://blog.360gradosenconcreto.com/>

Para este proyecto de investigación y sobre la base de secuencia experimental valorada en el equipo disponible del laboratorio de Ingeniería Civil de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – Seccional Bucaramanga, ésta variable se trabajó con el (33%) de acuerdo al manual de operación, e igualmente con el requisito normativo considerado por las normativas recientemente mencionadas - al (40%) – Véase Anexos D y L respectivamente.

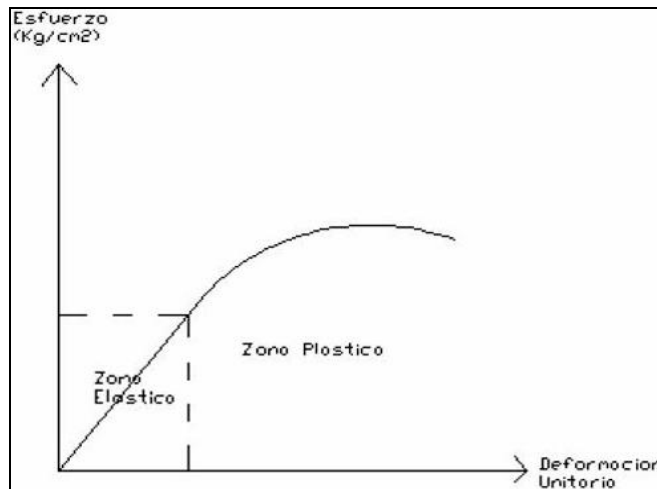


Figura 29. Representación esfuerzo/deformación-a.

Fuente: Blog 360 grados en concreto – Organización ARGOS S.A. - <http://blog.360gradosenconcreto.com/>

Una segunda fase, representa una línea curva como consecuencia de una microfisuración que se produce en el concreto al recibir una carga. Estas fisuras se ubican en la interface “agregado- pasta” y está comprendida entre el (45% y 98%) de la resistencia del concreto – Véase Figuras 28, 29 y 30 respectivamente.

En esta última (Figura 30), se pueden observar ciertas propiedades de la relación “esfuerzo-deformación”. En primer lugar, se puede ver que el término “módulo de elasticidad”, puede aplicarse estrictamente en la parte recta. En segundo lugar, el incremento en la deformación unitaria - mientras actúa la carga durante el ensayo -, se debe en parte a algo de elasticidad y en parte a la fluencia del concreto; en consecuencia se determina que el concreto no es un material completamente elástico.

En general, el módulo de elasticidad se determina a partir de pruebas a la compresión en cilindros de hormigón. Este parámetro estructural normalmente varía entre (1.4E+05 y 4.2E+05 Kg/cm²).

Finalmente y para la determinación en su cálculo definitivo, se pueden tomar los siguientes lineamientos:

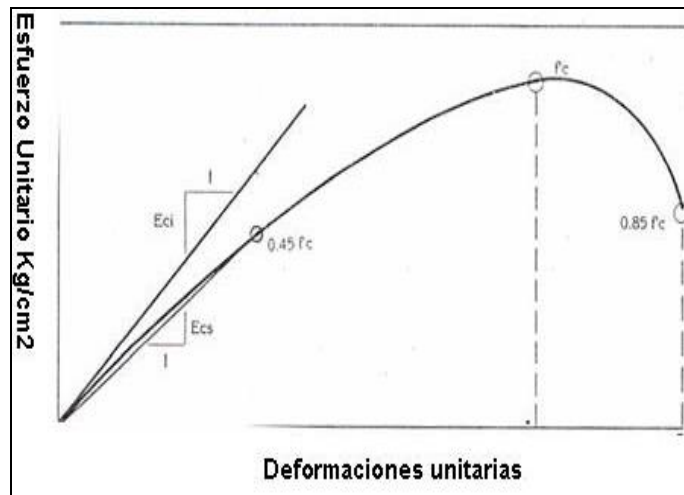


Figura 30. Representación esfuerzo/deformación-b.

Fuente: Blog 360 grados en concreto – Organización ARGOS S.A. -

<http://blog.360gradosenconcreto.com/>

- Con el área del espécimen, las cargas, las lecturas de deformación y la longitud de medición, se calculan los esfuerzos y las deformaciones unitarias correspondientes a cada carga, así como su esfuerzo máximo.
- Trazar la curva de “esfuerzo-deformación unitaria” – Véase Figura 31.
- Determinar el esfuerzo “S1” en (Kg/cm^2) correspondiente a la deformación unitaria (ϵ_1) para (0.000050).

Luego se procede con el cálculo del esfuerzo “S2” correspondiente al (40%) del esfuerzo máximo, que para nuestro caso también se realizó para el (33%) de manera simultánea.

Con ello se determina la deformación unitaria (ϵ_2) correspondiente al esfuerzo “S2”.

- Calcular el módulo de elasticidad (E) según Ecuación 3.

$$E (\text{Kg}/\text{cm}^2) = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.000050)$$

Ecuación 3. Determinación del módulo de elasticidad

Fuente: IMCYC C39 (2008). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

El concreto en obra: Problemas, causas y soluciones. Sección coleccionable 18. México. www.imcyc.com

- Calcular la relación de “Poisson” (μ) según Ecuación 4.

$$\mu = (\epsilon t2 - \epsilon t1) / (\epsilon 2 - 0,000050)$$

Ecuación 4. Determinación del coeficiente "Poisson"

Fuente: IMCYC C39 (2008). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
El concreto en obra: Problemas, causas y soluciones. Sección
coleccionable 18. México. www.imcyc.com

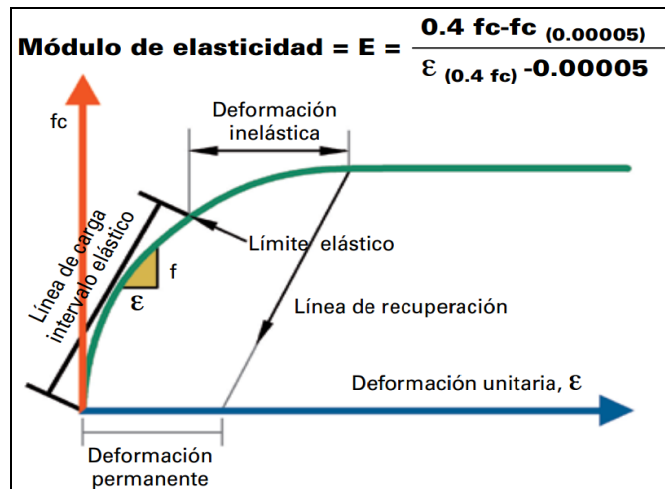


Figura 31. Curva esfuerzo/deformación unitaria

Fuente: IMCYC C39 (2008). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
El concreto en obra: Problemas, causas y soluciones. Sección
coleccionable 18. México. www.imcyc.com

Dónde:

$\epsilon t2$ = Deformación transversal unitaria a la altura media del espécimen, producida por el esfuerzo "S2".

$\epsilon t1$ = Deformación transversal unitaria a la altura media del espécimen, producida por el esfuerzo "S1".

4.5.4. Medida de los tiempos de fraguado

Se puede definir como el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos - procedentes de la reacción química del agua de mezclado - con los óxidos metálicos presentes en el Clinker que compone el cemento portland. Se expresa en unidades de tiempo. Su utilización permite determinar efectos de algunas variables presentes en el concreto, tales como el control de la temperatura, cantidad de cemento, diseño de mezclas, inclusión de aditivos, modificadores del tiempo de fraguado y características al endurecimiento – Véase Anexo H.

Sobre esto último (Endurecimiento), el hormigón presenta un estado de fraguado inicial en que la mezcla pierde su plasticidad.

De otro lado, la mezcla hidráulica absorbe un estado de fraguado final en el cual, la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable, siendo ésta, la principal característica factor para determinar la “ventana de corte” en la modulación del concreto en pavimentos.

El tiempo comprendido entre estos dos estados se llama tiempo de “fraguado de la mezcla” que se estima en unas (10) horas, aunque varía dependiendo de la humedad relativa, temperatura ambiente y condiciones locales de la zona de instalación.

El tiempo de fraguado inicial, es el lapso que transcurre a partir del momento del contacto inicial del cemento con el agua hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de (35 Kg/cm^2).

Del mismo modo, el tiempo de fraguado final es el período que transcurre, a partir del momento que el cemento entra en contacto con el agua hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de ($280,7 \text{ Kg/cm}^2$) – Véase Figura 32.

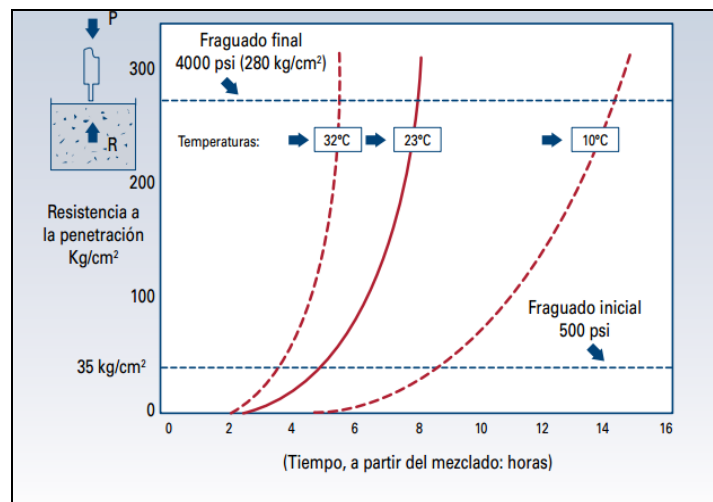


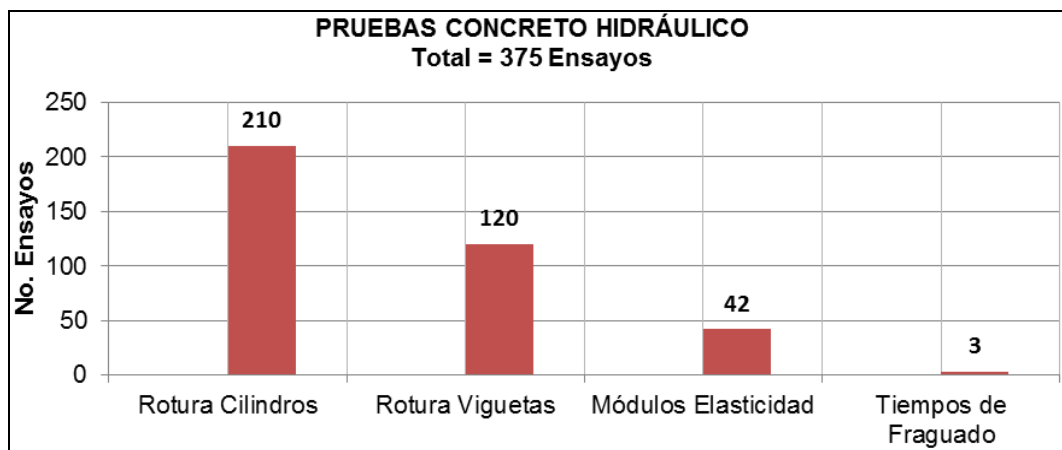
Figura 32. Curvas de fraguado en el concreto incididas por temperatura
Fuente: IMCYC C39 (2008). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. El concreto en obra: Problemas, causas y soluciones. Sección coleccionable 10. México. www.imcyc.com

En la Fotografía 9, se muestra un ejemplo a lo anteriormente citado.

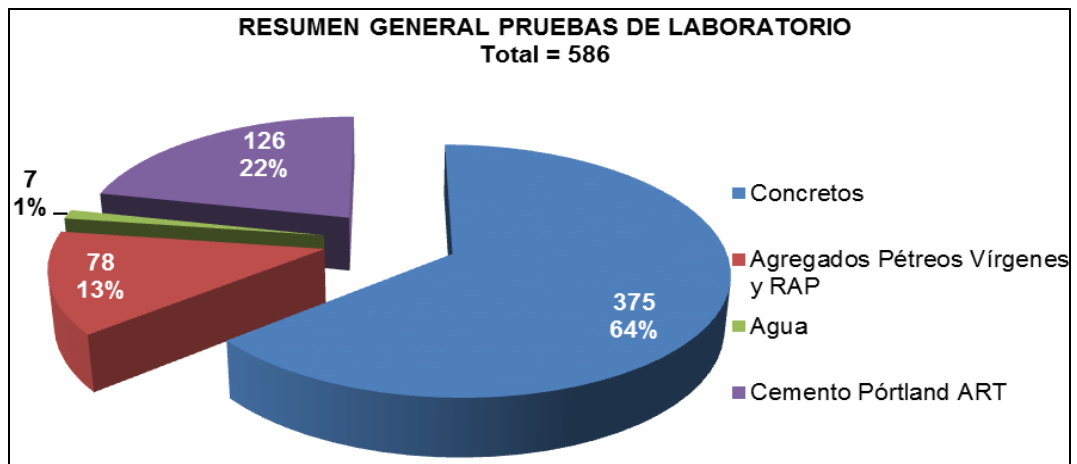


Fotografía 9. Test de tiempo de fraguado al concreto
Fuente: Elaboración propia

En resumen y como lo muestran las Gráficas 4, 5 y Anexo I respectivamente, se muestra un consolidado estadístico a los ensayos de producto final y totales practicados en el desarrollo de la presente investigación.



Gráfica 4. Pruebas en el concreto hidráulico como producto final
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 5. Resumen general de pruebas de laboratorio valoradas
Fuente: Elaboración propia

5. EQUIPO DE LABORATORIO

5.1. Certificaciones y calibración de equipos de laboratorio

Como complemento y seguridad en la toma de datos para la ejecución de todas las pruebas y ensayos de laboratorio, fueron tenidas en cuenta las correcciones que por incertidumbre operativa suministraban los instrumentos de medición en las tomas de lecturas de precisión y corrección de datos en cálculo aritmético.

Dichos resultados fueron ajustados con ayuda de los certificados de calibración de los equipos de laboratorio “patronables” más críticos, como lo fueron en el área de masas, fuerza y longitud respectivamente. Para ello, se solicitó muy amablemente la colaboración a la organización auspiciadora y a la misma UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UPB - Seccional Bucaramanga, el suministrar una copia correspondiente a las certificaciones de equipos utilizados de manera específica para el desarrollo de la presente investigación.

Todos y cada uno de los certificados se encuentran en el Anexo O.

6. DESARROLLO

6.1. Antecedentes

Desde el año 2005 se lideró un proceso de investigación en consultoría y diseño de pavimentos de hormigón, en el que se pretendía entender como un material hidráulico de segunda fase se unía eficazmente con una mezcla asfáltica – Véase Fotografía 10.



Fotografía 10. Extracción de núcleo en un pavimento tipo “Whitetopping”
Fuente: Elaboración propia

Ante ello, se inicia un proceso de investigación sobre la caracterización de hormigones con agregados provenientes de la demolición de pavimentos flexibles o rígidos. En este trabajo, sobre una muestra de pavimento asfáltico colapsado de donde se obtuvo el RAP, se han encontrado y reafirmado distintos tipos de comportamiento en dicho material residual cuando se combina con otros, reproduciéndose a escala de laboratorio dentro de sus procesos de separación, trituración, clasificación y valoración mecánica/dinámica, siendo éstas características el punto de partida para que dicho insumo sea apto para ser reutilizado en la manufactura de un concreto hidráulico.

Se ha realizado la determinación de las características físicas y mecánicas de los materiales componentes, así como de las mezclas hidráulicas valoradas para su posterior utilización en la fundación de pavimento de concreto hidráulicos. Éstas, se procedieron a elaborar con un porcentaje óptimo de participación granulométrico dentro del marco normativo y formulación estipulada por las metodologías más comunes de diseño hidráulico, aplicables eso sí, al alcance técnico que como agregado reciclado pudiese formular para la concepción de diseños teóricos.

Estos diseños fueron confeccionados con idénticas técnicas de elaboración a los que convencionalmente se hacen, eso sí, sin la ausencia participativa de agregados pétreos vírgenes. La investigación se realizó sobre un caso real, utilizando una muestra extraída de la demolición del pavimento asfáltico instalado y acopiado en el proyecto vial “Ruta del Sol – Tramo 2 – Sector La Lizama” – Véase Anexo N (Diapositiva 1), donde la organización auspiciadora es subcontratista de obras de infraestructura vial en pavimentos. Posteriormente al análisis, separación y clasificación del agregado reciclado, se procedió a realizar ensayos físicos, químicos, mecánicos y dinámicos para la caracterización de los agregados como también de los productos finales a obtener (Mezclas hidráulicas tipo MR). Todo lo anterior utilizando como referencia principal, el cumplimiento normativo de las “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS-2013” en su Artículo 500.

6.2. Caracterización de los agregados pétreos e insumos componentes de las mezclas hidráulicas

6.2.1. RAP

Como se mencionó en los numerales 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 del presente resumen investigativo, se muestra ahora en las Figuras 33 a 35, Gráficas 6 a 8 y Anexo B, un resumen consolidado estadístico objeto de la tipificación en mención.

Muestra	Granulometrías															(%) Participación			
	No.	1-1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 10	No. 16	No. 30	No. 40	No. 50	No. 80	No. 100	No. 200	Gravas	Arenas	Fines
AMP-389		100.0	100.0	99.3	89.0	78.9	54.4	34.4	29.8	14.8	3.3	1.4	0.5	0.1	0.1	0.0	45.6	54.4	0.0
Promedio		100.0	100.0	99.3	89.0	78.9	54.4	34.4	29.8	14.8	3.3	1.4	0.5	0.1	0.1	0.0	45.6	54.4	0.0

Figura 33. Granulometría y porcentajes de participación del RAP

Fuente: Elaboración propia

Límites Atterberg			Gravedad Específica y % Abs. Finos		Gravedad Específica y % Abs. Gruesos		% Extracción Asfalto	Equivalente de Arena	Masa Unitaria (Kg/m³)		Próctor Modificado		Dureza DMA-500 rev	Micro-deval	Resistencia 10%		Formas		Alarg/aplan 5:1	Caras Fracturadas 1 Arista (s)	Angularidad Agregado Fino
LL	LP	IP	Bulk	%	Bulk	%			Compacta	Suelta	γ _d	% _o			Seco	R=Hum/sec	Alarg	Aplan			
0.00	0.00	0.00	2.270	1.14	2.299	0.81	4.88	61.0	1323	1249	2.04	6.6	29.7	22.6	104.8	108.7	10.0	13.0	1.1	90.1	37.7
0.0	0.0	NP	2.270	1.14	2.299	0.81	4.88	61.0	1323	1249	2.04	6.6	29.7	22.6	104.8	108.7	10.0	13.0	1.1	90.1	37.7

Figura 34. Ensayos restantes de caracterización al RAP

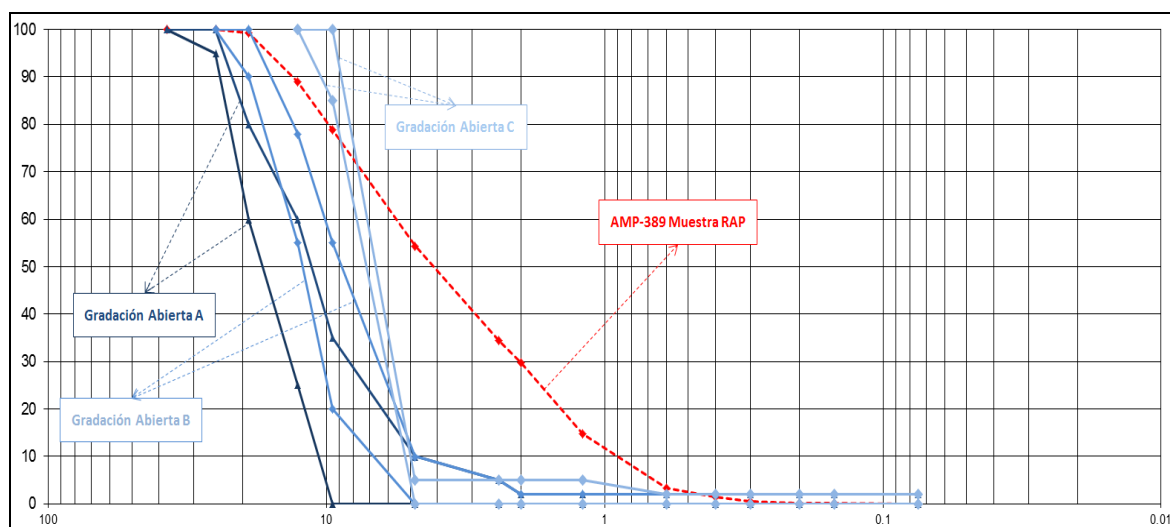
Fuente: Elaboración propia

La principal propiedad para definir el uso del RAP, así como de su calidad para ser componente final de las mezclas hidráulicas, fue su componente granulométrico. Como se mostró en las Figuras 8 y 9, de allí se determinó el tamaño máximo nominal (TMN), así como su respectivo uso dentro de una clasificación abierta o densa para la calificación intermedia sobre el aprovechamiento en el uso de un concreto asfáltico.

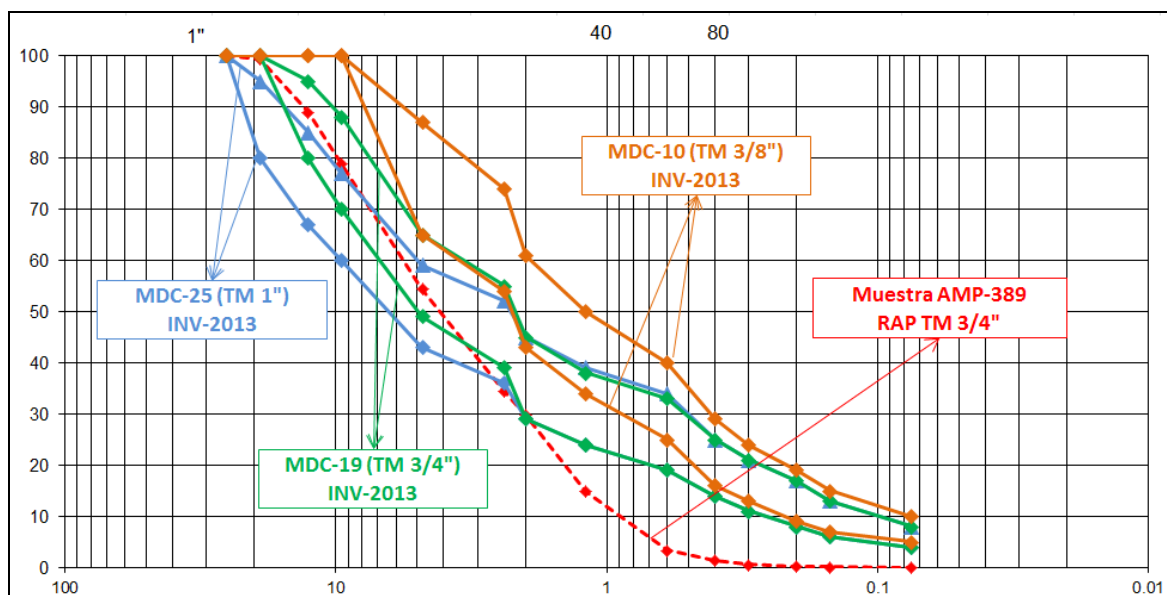
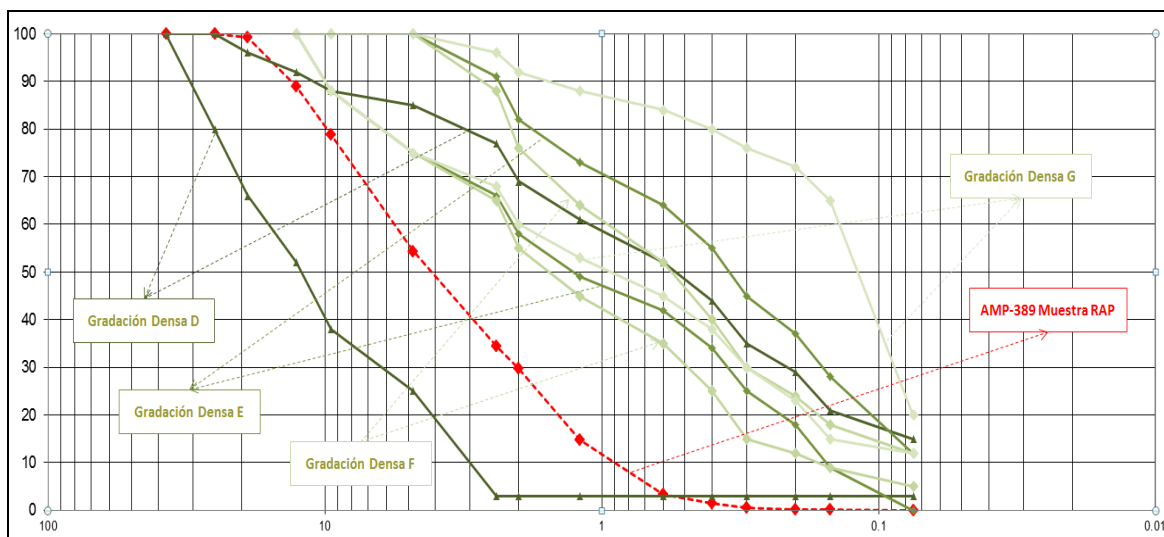
Gradaciones sugeridas para el reciclaje en frío y gradación fresado original TM 1"			Fresado	Gradaciones Abiertas						Gradaciones Densas							
TAMIZ		FINAL		A		B		C		D		E		F		G	
			% Pasa	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
1-1/2"	37.50	100.0	100.0	100.0	100.0					100.0	100.0						
1"	25.00	100.0	100.0	95.0	100.0	100	100			80.0	100.0						
3/4"	19.00	99.3	99.3	60.0	80.0	90.0	100.0			66.0	96.0						
1/2"	12.70	89.0	89.0	25.0	60.0	55.0	78.0	100.0	100.0	52.0	92.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/8"	9.50	78.9	78.9	0.0	35.0	20.0	55.0	85.0	100.0	38.0	88.0	88.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No. 4	4.8	54.4	54.4	0.0	10.0	0.0	10.0	0.0	5.0	25.0	85.0	75.0	100.0	75.0	100.0	75.0	100.0
No. 8	2.40	34.4	34.4	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	3.0	15.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No. 10	2.000	29.8	29.8	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	5.0	3.0	15.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No. 16	1.200	14.8	14.8	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	5.0	3.0	15.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No. 30	0.600	3.3	3.3	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	3.0	15.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No. 40	0.400	1.4	1.4	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	3.0	15.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No. 50	0.300	0.5	0.5	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	3.0	15.0	0.0	12.0	15.0	30.0	0.0	0.0
No. 80	0.200	0.1	0.1	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	3.0	15.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No. 100	0.150	0.1	0.1	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	3.0	15.0	0.0	12.0	0.0	0.0	15.0	65.0
No. 200	0.075	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	3.0	15.0	0.0	12.0	5.0	12.0	12.0	20.0

Montejo, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia (2ª Ed). ISBN No. 958-96036-2-9. Colombia

Figura 35. Usos granulométricos recomendados para el uso del RAP
Fuente: Montejo, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia (2ª Ed). ISBN No. 958-96036-2-9. Colombia



Gráfica 6. Representación gráfica para el uso del RAP en gradaciones abiertas
Fuente: Elaboración propia



Como conclusión, el agregado reciclado RAP muestra y como era de esperarse por provenir de un uso denso intermedio para manufactura de concretos asfálticos tipo MDC-19\25 INVÍAS-2013 (TM=1"3/4"), un comportamiento granulométrico "compensado", ya que es más ventajosa su participación en fracción gruesa (46%), que en la fina (54%) desde el punto de vista estructural para el diseño de las mezclas hidráulicas (Esqueleto mineral para sostenimiento de resistencias).

De otro lado, y evaluando su intervención dentro del uso en mezclas reciclables de tipo asfáltico, éste encaja en una gradación densa tipo D. Recordar que este agregado reciclado proviene de la más alta calificación objeto en la manufactura de un concreto asfáltico.

Por eso tiene tanto requerimiento técnico en ésta área de la ingeniería de pavimentos, y por ende, su alto costo económico de obtención.

Ahora bien, el agregado posee un tamaño máximo (TM=1"), excelente limpieza (EA=61%), nivel inexistente de plasticidad (NP), nula participación de filler como inhibidor a la hidratación del cemento portland (% pasa tamiz No. 200=0%), competente peso específico bulk promedio entre fracciones (2.280 Grs/cm³), proporcionado nivel de absorción a pesar de su presencia residual en porcentaje de betún asfáltico todavía adherido (Tasa de disminución referida al diseño Marshall original en un (7%) – 4.7% Vs. 5.1%), excelente fracturación por una arista (>90%), buena forma en la geometría de sus partículas para el control del asentamiento, manejabilidad y posibles encapsulamientos de contenido de aire en el concreto (Alargamiento/aplanamiento_{prom}=11.5% y relación 5:1=1.0%), perseverancia en la medida de su dureza aprovechable (DMA<30%, resistencia 10% finos o rotura de granos=105 KN y micro-deval=23%) y adecuada angularidad en la fracción fina del (38%).

Por todo lo anterior y como era de esperarse, el agregado reciclado tipo RAP posee competencia para su utilización en la manufactura de mezclas hidráulicas para uso no estructural; es decir, para aprovechamiento complementario como lo es y puede ser la elaboración de pavimento de concreto hidráulicos.

6.2.2. Agregados pétreos grueso (*Grava*) y fino (*Arena*) vírgenes

Así las cosas y ante la imperiosa necesidad de mantener dentro de las propiedades básicas de control y desempeño en las mezclas hidráulicas objeto del presente estudio, es ineludible e intransferible contar con la participación imperiosa de los agregados pétreos vírgenes (Agregado grueso - *grava* y fino – *arena*). Para ello y como lo vamos a sustentar en el siguiente numeral, se presenta en las Figuras 36 a 38 los resultados consolidados estadísticos correspondientes a la caracterización de dichos agregados en seis (6) muestras estudiadas e identificadas con las nomenclaturas AMP-11-50-106 para la *arena*, y AMP-13-54-104 para la *grava* respectivamente – Véase igualmente Anexo B.

Lo anterior sobre la base normativa estipulada por el Artículo 500 de las “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras – INVÍAS-2013”, además de su correspondencia en norma técnica colombiana NTC-174 que es idéntica para sus términos granulométricos, pero menos conveniente que los umbrales tasados por la normativa INVÍAS.

Esto es totalmente lógico de entender, que el enfoque que rige la norma técnica colombiana NTC, está relacionada con el uso y aprovechamiento exclusivo de las mezclas hidráulicas para obras en general, diferentes a la construcción específica de proyectos de infraestructura vial – específicamente en la ingeniería de pavimentos -. Pero como se verá más adelante, su conveniencia y uso final para el desarrollo del presente trabajo, obligo a ajustarse con los límites de control de la primera (NTC) y no a la segunda (INVÍAS), ya que el material así es manufacturado y remisionado desde su misma fuente de explotación; además debe considerarse la consideración NTC-174 definida en la Figura 40.

La fuente de materiales de donde provienen dichos insumos es el río “Chicamocha”, ubicada a (43 Kms) del Área Metropolitana de Bucaramanga. Esta zona geológicamente hablando, la constituyen unidades litológicas de tipo “sedimentario”, que como ya se justificó en el numeral 4.2, hace necesario la inclusión de adiciones cementicias en los diseños y manufactura de las mezclas hidráulicas con el objetivo de mitigar y controlar el efecto “agregado-álcali”.

	Muestra No.	Granulometrías												(%) Participación		
		1-1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200	Gravas	Arenas	Filler
AGREGADO FINO	AMP-11	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.4	97.4	84.9	65.9	31.9	10.3	3.3	2.6	94.1	3.3
	AMP-50	100.0	100.0	100.0	100.0	99.0	85.0	76.2	65.5	46.3	25.1	12.0	3.2	15.0	81.8	3.2
	AMP-106	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	89.6	77.1	62.8	43.7	26.5	15.6	3.3	10.4	86.3	3.3
	Promedio	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	90.7	83.6	71.1	52.0	27.8	12.6	3.3	9.3	87.4	3.3
	Tablas 500-1/2 Normativa INVÍAS/2013					100-100 (%)	95-100 (%)	80-100 (%)	50-85 (%)	25-60 (%)	10-30 (%)	2-10 (%)	0-3 (%)			
AGREGADO GRUESO	AMP-13	100.0	100.0	90.9	34.2	9.9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	99.4	0.0	0.6
	AMP-54	100.0	100.0	74.7	5.8	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	99.6	0.0	0.4
	AMP-104	100.0	100.0	80.9	24.2	9.0	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	99.2	0.3	0.5
	Promedio	100.0	100.0	82.2	21.4	6.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	99.4	0.1	0.5
	Tablas 500-3/4 Normativa INVÍAS/2013		100-100 (%)	90-100 (%)		20-55 (%)	0-10 (%)	0-5 (%)								

Figura 36. Granulometrías y porcentajes de participación agregados pétreos vírgenes (Fuente “Río Chicamocha – Sector Pescadero”)

Fuente: Elaboración propia

	Límites Atterberg			MF	Solidez (Na)		Solidez (Mg)		Terrones y Deleznables	Livianas	Equivalente de Arena	Gravedad Específica	% Absorción	Masa Unitaria (Kg/m³)	
	LL	LP	IP		Fg	Ff	Fg	Ff						Compacta	Suelta
AGREGADO FINO	0.00	0.00	0.00	2.2	5.6	9.5	7.9	8.9	1.80	0.30	72.0	2.624	0.53	1277	1215
	0.00	0.00	0.00	2.9	6.8	10.7	6.9	9.7	1.10	0.40	75.0	2.606	1.10	1501	1362
	0.00	0.00	0.00	2.8	7.3	10.2	4.2	10.4	1.60	0.50	77.0	2.622	0.82	1526	1370
	0.0	0.0	0.0	2.6	6.5	10.1	6.3	9.7	1.50	0.40	74.7	2.617	0.8	1435	1316
	0 (%)	0 (%)	NP	2.3-3.1	<=10%		<=15%		<=3%	<=0.5%	>=60%		<=4%		
AGREGADO GRUESO					4.0	0.0	8.5	0.0	0.20	0.40		2.668	0.83	1535	1436
					9.0	0.0	7.3	0.0	0.14	0.40		2.631	0.81	1481	1408
					6.6	0.0	7.1	0.0	0.21	0.40		2.637	0.78	1537	1436
					6.5	0.0	7.6	0.0	0.18	0.40		2.645	0.81	1518	1427
					<=10%		<=15%		<=0.25%	<=0.5%			<=4%		

Figura 37. Ensayos restantes de caracterización – Parte a. (“Río Chicamocha”)
Fuente: Elaboración propia

	Materia Orgánica	Dureza			Micro-deval	Resistencia 10%		Formas		Alarg/aplan 5:1	Caras Fracturadas
		DMA-500 rev	DMA-100 rev	R=Hum/sec		Seco	R=Hum/sec	Alarg	Aplan		1 Arista (s)
AGREGADO FINO	1										
	1										
	1										
	1										
	<=3										
AGREGADO GRUESO		25.5	6.4	0.9	21.4	103.0	125.7	10.7	14.3	1.7	88.4
		26.0	6.9	0.9	20.2	105.8	95.8	15.2	14.6	1.6	95.4
		27.0	4.0	0.9	20.0	99.8	119.6	14.5	17.8	1.8	
		26.2	5.8	0.9	20.5	102.9	113.7	13.5	15.6	1.7	91.9
		<=40%	<=8%	<=2	<=30%	>=90 KN	>=75%	<=15%		<=10%	>=60%

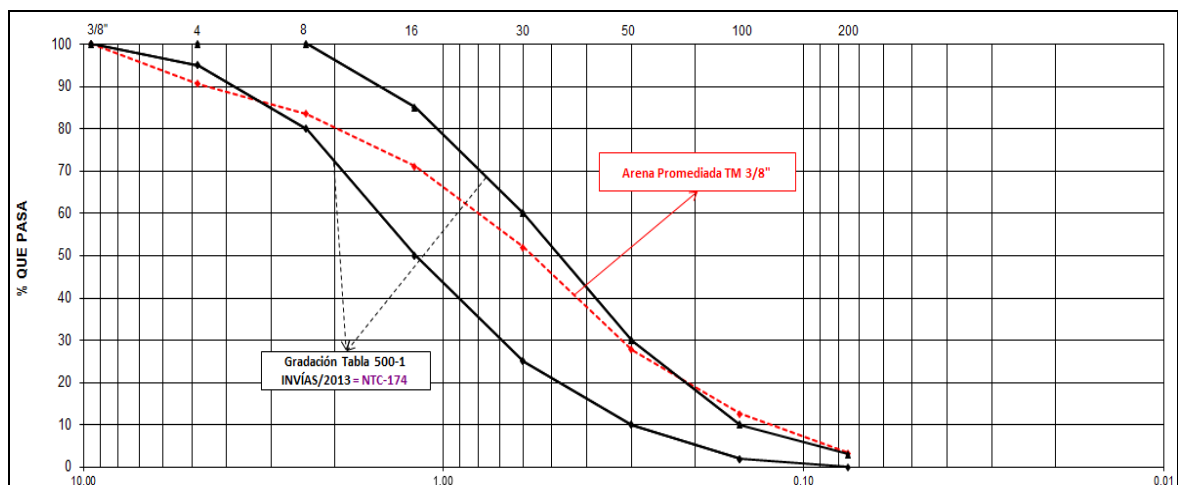
Figura 38. Ensayos restantes de caracterización – Parte b. (“Río Chicamocha”)
Fuente: Elaboración propia

Granulométricamente hablando, se promediaron todos los tamaños por abertura de tamiz, habida cuenta que mientras se ejecutaba el trabajo de investigación la fuente de explotación estaba afectada por el pasado fenómeno del “Niño”.

Por ello, la arena remitida presento algunas variaciones y saltos dentro de su compensación durante los análisis ejecutados, que para nada reviste inconveniente técnico alguno en el diseño y manufactura de los concretos como lo soporta la normatividad técnica colombiana – NTC-174, más no las mismas especificaciones INVÍAS-2013 – Véase Figuras 39 a 40 y Gráfica 9 respectivamente.

Gradación Tabla 500-1 - Artículo 500			Gradación	Normativa	
			Arena		
TAMIZ		FINAL	% Pasa	MIN.	MAX.
3/8"	9.50	99.7	100.0	100.0	100.0
No. 4	4.8	90.7	90.7	95.0	100.0
No. 8	2.40	83.6	83.6	80.0	100.0
No. 16	1.200	71.1	71.1	50.0	85.0
No. 30	0.600	52.0	52.0	25.0	60.0
No. 50	0.300	27.8	27.8	10.0	30.0
No. 100	0.150	12.6	12.6	2.0	10.0
No. 200	0.075	3.3	3.3	0.0	3.0

Figura 39. Granulometría final promedio agregado fino para diseño - arena
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 9. Curva granulométrica final promedio agregado fino en diseño – arena
("Río Chicamocha" – Sector "Pescadero")
Fuente: Elaboración propia

6.3 No debe suceder que cualquier tamiz pase más del 45 % del agregado fino y quede retenido en el siguiente tamiz según lo mostrado en el numeral 6.1. Los módulos de finura no deben ser menores de 2,3 ni mayores de 3,1.

6.4 El agregado fino que no cumpla los requisitos de granulometría y módulos de finura, de los numerales 6.1, 6.2 o 6.3 puede ser aceptado si existen registros de comportamiento aceptables del concreto fabricado con este material. Si no se tienen dichos registros se debe ensayar el agregado fino de acuerdo con su comportamiento en el concreto, así:

Un ensayo para elaborar el concreto con el agregado fino bajo consideración y otro ensayo para elaborar el concreto con agregado de calidad demostrada. Se someten las muestras bajo las mismas condiciones de la obra de tal manera que el resultado obtenido con el agregado bajo consideración sea al menos igual al testigo de calidad demostrada.

Nota 2. El agregado fino que se ajuste a los requisitos de gradación de una especificación dispuesta por otra organización, la cual sea de uso general en la zona, puede ser tomada en cuenta si tiene un registro de comportamiento satisfactorio con relación a aquellas propiedades del concreto afectadas por dicha gradación.

Nota 3. Las propiedades relevantes son aquellas propiedades del concreto que son importantes para la aplicación particular en consideración.

Figura 40. (Numeral 6.4). Salvedad granulométrica y modulo finura agregado fino
Fuente: NTC-174 (2000). Especificaciones de los agregados para concretos.
Versión 2000-06-21(5ª Actualización). Colombia

Esta arena que por provenir de una fuente aluvial en constante proceso de lavado, posee un tamaño máximo ($TM=3/8"$), excelente limpieza ($EA=75\%$), nivel inexistente de plasticidad (NP), participación de filler como inhibidor a la hidratación del cemento portland ($\%$ pasa tamiz No. 200= 3.3% - *No solicitado por NTC y sí por INVÍAS-2013* $\leq 3\%$ - Véase Figura 12) y muy buena gravedad específica/porcentaje de absorción para diseño ($2.617 \text{ Grs/cm}^3 / 0.8\%$).

Igualmente, no reviste presencia de materia orgánica ($1 < 3$, siendo este último el color neutro "Ámbar" – *Método colorimétrico*) y al ataque a la acciones de sales en sulfato de sodio y magnesio ($< \text{al } 10\% \text{ y } 15\%$ respectivamente), baja participación de partículas livianas (0.4%), terrones de arcilla/partículas deleznable (1.5%), además de un perfecto módulo de finura ($MF=2.6$).

Por todo lo anterior y como era de esperarse, el agregado fino (*Arena*) posee cumplimiento normativo para su utilización en la manufactura de mezclas hidráulicas en usos estructurales y aprovechamiento en la elaboración de pavimentos de hormigón.

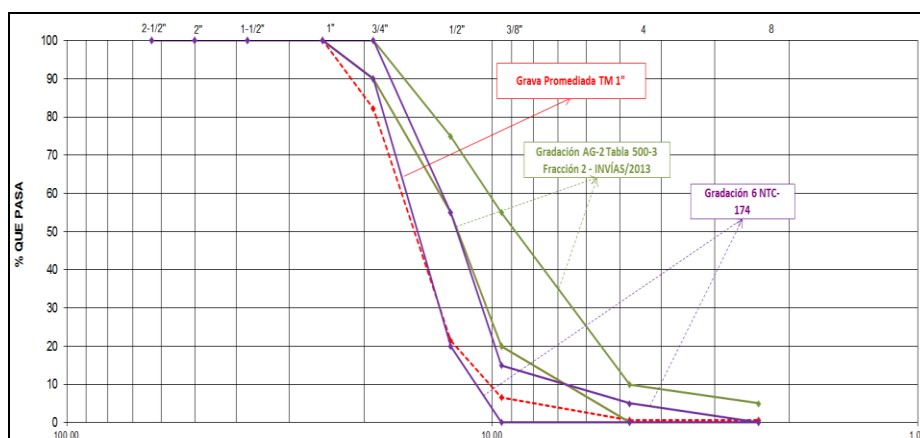
En el agregado grueso (*Grava*), se poseen similares comportamientos. Este insumo al calificarse granulométricamente hablando, tiene un grado diferido entre las solicitudes que requieren los usos considerados por las normas NTC-174 e INVÍAS-2013 respectivamente – Véase Figuras 11, 15, 41 a 43 y Gráfica 10.

Gradación Tabla 500-3 - Artículo 500			Gradación
			Grava
TAMIZ	FINAL	FINAL	% Pasa
2-1/2"	63.00	100.0	100.0
2"	50.00	100.0	100.0
1-1/2"	37.50	100.0	100.0
1"	25.00	100.0	100.0
3/4"	19.00	82.2	82.2
1/2"	12.50	21.4	21.4
3/8"	9.50	6.5	6.5
No. 4	4.75	0.6	0.6
No. 8	2.36	0.6	0.6

Figura 41. Granulometría final promedio agregado grueso para diseño - grava
Fuente: Elaboración propia

Gradación Tabla 500-3 - Artículo 500			Normativa INVÍAS/2013										Normativa NTC-174	
			AG-1				AG-2				AG-3		Agregado 6	
TAMIZ	FINAL		Fracción 1 (2-1/2" a 1")		Fracción 2 (1-1/2" a No. 4)		Fracción 1 (2 a 3/4)"		Fracción 2 (1" a No. 4)		Fracción 1 (1-1/2" a No. 4)		Fracción 1 (1" a No. 4)	
			MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.	MIN.	MÁX.
2-1/2"	63.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50.00	100.0	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1-1/2"	37.50	100.0	35.0	70.0	100.0	100.0	90.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1"	25.00	100.0	0.0	15.0	95.0	100.0	20.0	55.0	100.0	100.0	95.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.00	82.2	0.0	10.0	80.0	80.0	0.0	15.0	90.0	100.0	55.0	80.0	90.0	100.0
1/2"	12.50	21.4	0.0	5.0	25.0	60.0	0.0	10.0	55.0	75.0	25.0	60.0	20.0	55.0
3/8"	9.50	6.5	0.0	5.0	0.0	35.0	0.0	5.0	20.0	55.0	19.0	35.0	0.0	15.0
No. 4	4.75	0.6	0.0	5.0	0.0	10.0	0.0	5.0	0.0	10.0	0.0	10.0	0.0	5.0
No. 8	2.36	0.6	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	0.0

Figura 42. Usos normativos para el agregado grueso para diseño-grava ("Río Chicamocha – Sector Pescadero")
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 10. Curva granulométrica final promedio agregado grueso en diseño-grava (Río Chicamocha – Sector Pescadero)
Fuente: Elaboración propia

10. GRADACION

10.1 El agregado grueso debe cumplir con los requisitos establecidos en la Tabla 2 para el número de tamaño especificado.

Nota 6. Los intervalos mostrados en la Tabla 2 son necesariamente muy amplios con el fin de cobijar las condiciones variables del país. Para realizar el control de calidad de cualquier obra específica, el productor puede desarrollar una gradación promedio de una fuente particular e instalaciones de producción, y controlar la gradación con unas tolerancias razonables de este mismo promedio. Cuando se utilicen agregados gruesos de números 357 ó 467, es recomendable suministrar dichos agregados al menos en dos tamaños separados.

Figura 43. (Numeral 10.1). Salvedad granulométrica agregado grueso
Fuente: NTC-174 (2000). Especificaciones de los agregados para concretos.
Versión 2000-06-21(5ª Actualización). Colombia

Entonces así las cosas, y teniendo en cuenta que para diseñar una mezcla hidráulica se concibe la selección del tamaño máximo nominal (TMN) dentro de la participación del agregado grueso que es finalmente el que aporta “esqueleto mineral”, el insumo encaja dentro de la gradaciones (6-NTC-174) y (AG-2, fracción 2-INVIAS-2013), siendo la primera por la que se optaría para la fase de combinación con el RAP en un porcentaje de su reemplazo – Véase Gráfica 10.

A partir de ello, y reconociendo que la grava vírgen y el RAP poseen igual tamaño máximo (TM=1”), se concluye que existe un “principio de compatibilidad” para poder considerar el reemplazo del agregado grueso vírgen por el insumo reciclado (RAP). Esta tasa o porcentaje de participación lo avalarán los métodos de diseño y soportes literarios referenciados en el numeral 4 de la presente investigación.

De antemano es ilógico y anti-técnico pensar, que el agregado reciclado (RAP) en su fracción fina, pretenda reemplazar parcialmente el agregado pétreo vírgen fino (Arena). Por ello para el diseño de las mezclas, la única opción y salida técnica en la validación participativa del RAP, es su inclusión inequívoca como *grava*.

La grava vírgen posee un tamaño máximo (TM=1” y TMN=3/4”), poca por no decir nula participación de filler como inhibidor a la hidratación del cemento portland (% pasa tamiz No. 200=0.5%), muy buena gravedad específica/porcentaje de absorción para diseño (2.645 Grs/cm³ / 0.81%), excelente fracturación por una arista (92%), adecuado forma en la geometría de sus partículas para el control del asentamiento, manejabilidad y posibles encapsulamientos de contenido de aire en el concreto (Alargamiento/aplanamiento_{prom}=14.5% y relación 5:1=1.7%), dureza (DMA<30%, resistencia 10% finos o rotura de granos=103 KN y micro-deval=20%) y no reviste ataque a la acciones de sales en sulfato de sodio y magnesio (< al 10% y 15% respectivamente), baja participación de partículas livianas (<0.25%), terrones de arcilla/partículas deleznales (1.5%).

Por todo lo anterior y como era de esperarse, el agregado grueso (*Grava*) posee cumplimiento normativo para su utilización en la manufactura de mezclas hidráulicas en usos estructurales y aprovechamiento en la elaboración de pavimentos de hormigón.

6.2.3. Cemento portland

Como ya se sustentó en el numeral 4.3, y dado que en el laboratorio de la organización auspiciadora no se encuentran a disposición los equipos básicos en caracterización física y química para realizar los ensayos de chequeo al cemento, se validó técnicamente el insumo por medio de la verificación e interpretación estadística de sus protocolos.

Esta tarea comprendió el chequeo de lotes que por trazabilidad llegaron a la planta de producción desde el pasado 29 de Diciembre de 2015 al 22 de Abril del año en curso – Véase Anexo B. El insumo utilizado para la presente investigación, fue el cemento portland “Concretero” tipo ART (Alta Resistencia Temprana) de muy similar desempeño con el referenciado por categoría III.

El promedio a las muestra evaluadas, corresponden a la interpretación estadística mostradas en las Figuras 45 a 47 y Gráficas 11 a 12, enmarcadas dentro de los lineamientos físicos considerados por la especificación NTC-121 de la Figura 20.

De la misma manera, se muestran los gráficos de control validados por análisis probabilístico – Véase Gráficas 11 a 12. Como soporte a los efectos generados por la exotermicidad proveniente del calor de hidratación, en el Anexo C se muestra en los “Reportes de diseño de mezclas de concreto” las temperaturas medidas en el producto final para los casos en estudio que en ningunos de los mismos superaron los 32°C.

En conclusión, el cemento utilizado para el diseño y manufactura de las mezclas hidráulicas, cumple las especificaciones técnicas referidas. Debe mencionarse que dentro de los procesos analizados, se evidencian algunas irregularidades en la medida de la finura “Blaine” y tamiz No. 325, expansión en barras de mortero (*Tema para el control “agregado/álcali”*) y la resistencia a (28) días de edad.

	Tipo 1	Tipo 1M	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Finura, superficie específica en m ² /kg						
- Ensayo por medio de permeabilidad al aire, mínimo.	280	280	280	-	280	280
Estabilidad	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Expansión en autoclave, máximo, %						
Tiempo de fraguado (Métodos alternativos).						
- Ensayo por agujas de Vicat: Tiempo inicial, en minutos, no debe ser menor de	45	45	45	45	45	45
Tiempo final, en horas, no debe ser mayor de	8	8	8	8	8	8
Resistencia a la compresión en Mpa (aprox. kgf/cm ²).						
La resistencia a la compresión de cubos de mortero hechos con una parte de cemento y 2,75 partes de una arena gradada normalizada para este ensayo, preparados y probados de acuerdo con la NTC 220, no debe ser menor que , los valores indicados abajo, para cada edad.						
1 d		-	-	10,0 (100)		
3 días	8,0 (80)	12,5 (125)	10,5 (105)	21,0 (210)	-	8,5 (85)
7 días	15,0 (150)	19,5 (195)	17,5 (175)	-	7,0 (70)	15,5 (155)
28 días	24,0 (240)	-	-	-	17,5 (175)	21,0 (210)

Figura 44. Requisitos físicos del cemento portland

Fuente: NTC-121 (2014). Especificación de desempeño para cemento hidráulico.

Versión 2014-06-18 (2ª Actualización). Colombia

6.2.4. Agua de mezclado

De acuerdo a lo sustentado en el numeral 4.4, los ensayos físico-químicos fueron subcontratados en compra de servicios al “Laboratorio Químico de Consultas Industriales” de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER – UIS, por parte del operador de servicios internos de la organización auspiciadora - Laboratorio CONTROLAB INGENIERÍA S.A.S.

En conclusión el agua de mezclado proveniente de la fuente “Río Frío”, cumple con los requisitos normativos exigidos por la normatividad INVÍAS-2013 y demás complementaria mostradas en el Anexo A.

6.3. Dosificación de las mezclas hidráulicas

Antes de iniciar el presente numeral, se enuncia que el proceso de manufactura, control de procesos y gráficas de control será validado con base en los requisitos de control estadístico establecidos por el “Reglamento ACI-318”.

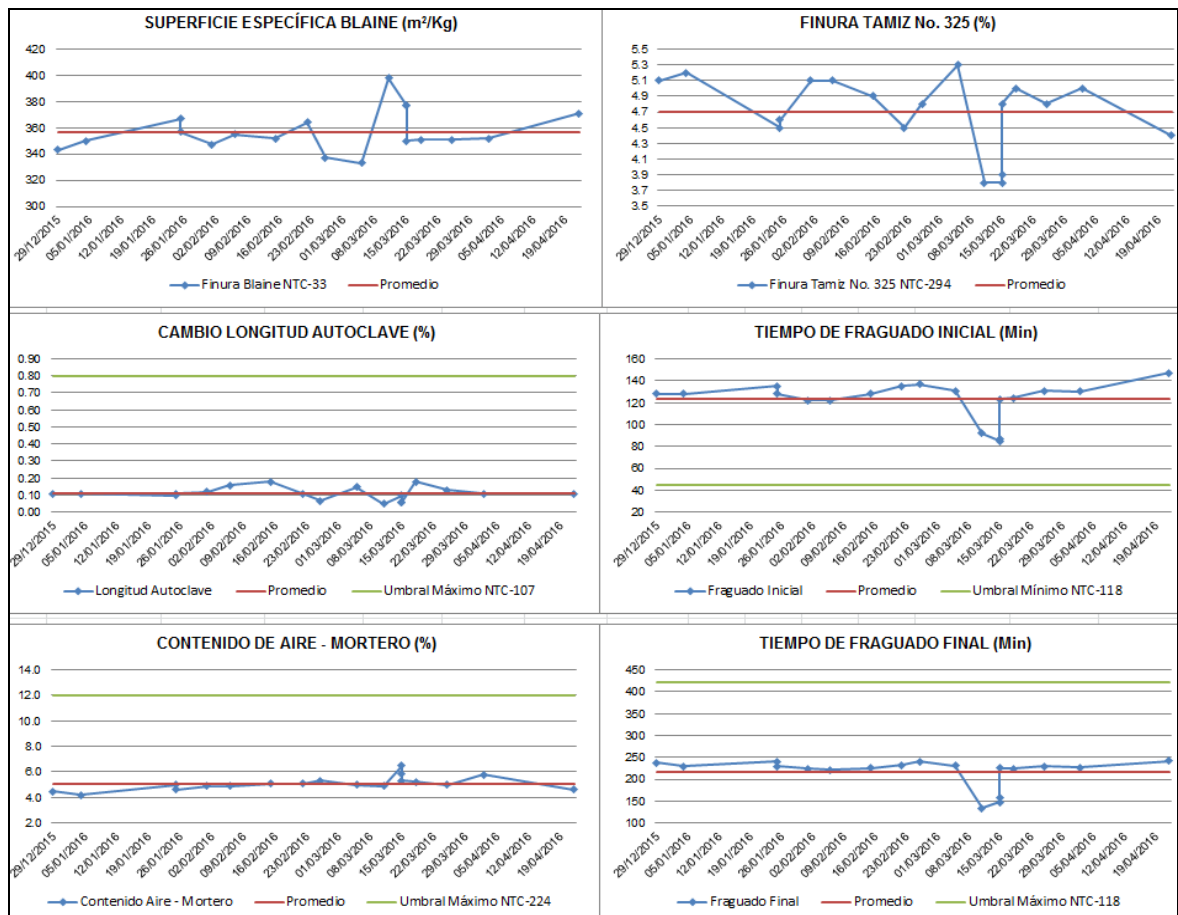
En la Figura 51, se muestra los valores de dispersión total en función de la desviación estándar para diferentes grados de control en (Kg/cm²), y de dispersión entre testigos o muestras para el coeficiente de variación en (%).

CEMENTO PÓRTLAND TIPO CONCRETO (ALTA RESISTENCIA TEMPRANA - ART) - T III	RESUMEN CLASIFICATORIO CEMENTO PÓRTLAND PARA DISEÑO DE MEZCLAS HIDRÁULICAS TIPO MR - NORMATIVIDAD NTC											
	Fecha	Superficie Específica - Finura Blaine	Finura Tamiz No. 325	Cambio Longitud Autoclave	Tiempos de Fraguado		Contenido de Aire - Mortero	Resistencia a la Compresión				Expansión Barras Mortero
	Muestra				Inicial	Final		1 d	3 d	7 d	28 d	
	29/12/2015	343	5.1	0.11	128	237	4.5	15.0	28.1	33.8	41.7	0.018
	04/01/2016	350	5.2	0.11	128	230	4.2	15.0	28.0	33.4	44.2	0.012
	25/01/2016	367	4.5	0.10	135	240	5.0	16.0	29.3	34.3	42.2	0.008
	25/01/2016	357	4.6	0.11	128	230	4.6	16.5	29.2	34.3	40.9	0.011
	01/02/2016	347	5.1	0.12	122	224	4.9	16.0	28.7	33.5	40.4	0.019
	06/02/2016	355	5.1	0.16	122	222	4.9	15.9	28.9	34.0	40.1	0.016
	15/02/2016	352	4.9	0.18	128	225	5.1	15.8	28.6	33.8	41.7	0.018
	22/02/2016	364	4.5	0.11	135	232	5.1	14.4	27.6	33.0	40.9	0.015
	26/02/2016	337	4.8	0.07	137	240	5.3	15.2	28.5	34.1	41.2	0.017
	05/03/2016	333	5.3	0.15	131	231	5.0	15.0	28.0	33.9	41.3	0.019
	11/03/2016	398	3.8	0.05	92	134	4.9	17.9	29.8	36.3	41.6	0.006
	15/03/2016	377	3.8	0.10	85	147	6.5	14.6	26.0	32.8	39.0	0.005
	15/03/2016	377	3.9	0.06	87	159	5.9	15.5	25.9	31.1	39.8	0.006
	15/03/2016	350	4.8	0.06	123	226	5.3	15.3	28.6	34.5	41.4	0.014
	18/03/2016	351	5.0	0.18	124	224	5.2	14.7	27.9	33.6	40.3	0.016
	25/03/2016	351	4.8	0.13	131	229	5.0	14.6	27.6	33.5	41.9	0.012
	02/04/2016	352	5.0	0.11	130	227	5.8	15.1	28.1	33.7	41.6	0.006
	22/04/2016	371	4.4	0.11	147	242	4.6	16.0	29.9	34.9	41.9	0.015
	Promedio	357	4.7	0.11	123	217	5.1	15.5	28.3	33.8	41.2	0.013
	Desviación	16	0.5	0.04	17	33	0.5	0.8	1.1	1.0	1.1	0.005
	Coef. Variación	4.5%	10.0%	34.0%	14.0%	15.2%	10.6%	5.5%	3.8%	3.0%	2.7%	37.8%
	Umbrales	-	-	<=0.8%	>45 min	<420 min	<12%	>11 Mpa	>22 Mpa	-	-	<=0.02%
		NTC-33	NTC-294	NTC-107	NTC-118		NTC-224	NTC-220				NTC-4927

Figura 45. Resumen clasificatorio cemento portland para diseño de mezclas
Fuente: Elaboración propia

$CV \leq 10\%$	Existe poca variabilidad
$10\% \leq CV \leq 33\%$	Existe una variabilidad aceptable
$33\% \leq CV \leq 50\%$	Existe una variabilidad excesiva pero tolerable
$CV > 50\%$	Existe una variabilidad excesiva

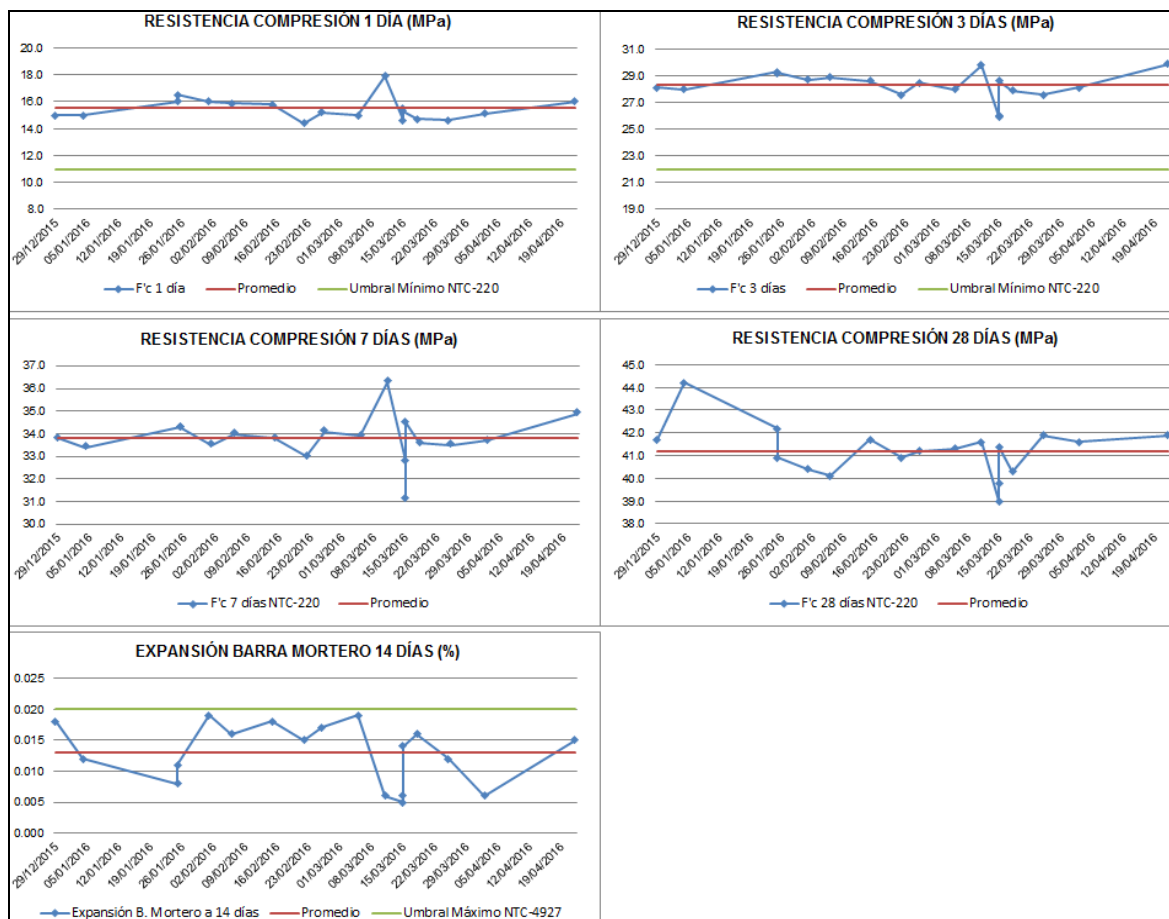
Figura 46. Análisis probabilístico en estadística para coeficiente de variación
Fuente: Reglamento ACI-318



Gráfica 11. Diagramas control (F. Blaine, F. %200, Autoclave, % Aire y Fraguado)
Fuente: Elaboración propia

DISPERSION TOTAL					
Clase de Operación	Desviación Estándar para diferentes grados de control (Kg/cm²)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	> 49.2
Concreto en Laboratorio	< a 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	> 24.6
DISPERSIÓN ENTRE TESTIGOS					
Clase de Operación	Coeficiente de variación V para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6.0
Concreto en Laboratorio	< a 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5.0

Figura 47. Dispersión total y testigos por desviación estándar y coef. de variación
Fuente: Reglamento ACI-318



Gráfica 12. Diagramas control (F'c a 1, 3, 7 y 28 días / Expansión 14 días)

Fuente: Elaboración propia

El conocimiento de las propiedades del concreto tanto en estado endurecido (Producto final), como en estado fluido tiene como finalidad primordial determinar el diseño de la mezcla en función de la granulometría componente y la relación agua/cemento (A/C) establecida por el principio de asentamiento de Abrams²⁶.

6.3.1. Obtención de agregados pétreos (Combinado grueso Grava + RAP) y arena

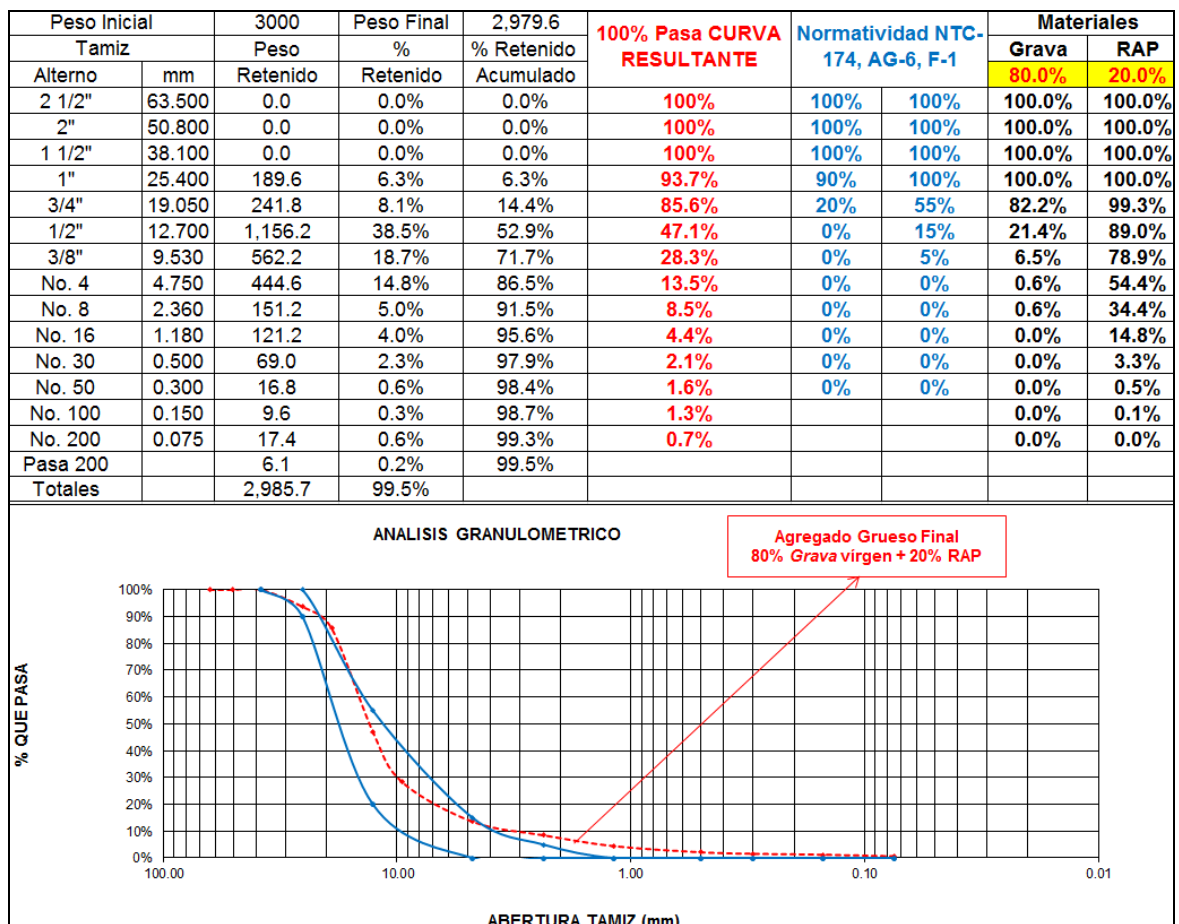
Como ya se mostró en la Gráfica 10, el material pétreo vírgen grueso - Grava tiende mejor su acomodación al uso granulométrico fijado por la normativa NTC-174 (Gradación 6) que por la INVÍAS-2013 (Tabla 500-3, gradación AG-2 – fracción 2). Lo anterior debido a que la organización ASFALTART S.A., provee la mayor parte de su comercialización en mezclas hidráulicas destinadas como usos generales, más que para pavimentos de concreto hidráulico.

²⁶ NTC-396 (1992). Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Versión (1992-01-15) (1ª actualización). Colombia

Por lo anterior, se adoptó el uso más ajustable, y sobre él, postular la combinación final con el RAP según lo enunciado y justificado en los numerales 6.2.1 y 6.2.2 respectivamente.

Para ello, se realizaron varias medidas porcentuales de mezclado como normalmente se estudia a nivel experimental en laboratorio: (50/50 – 60/40– 67/33 – 75/25 – 80/20). La opción final, será aquella que soporte en primera instancia, su validación técnica y normativa, y al mismo tiempo permita como segunda pretensión, valorar su aprovechamiento económico dentro de los beneficios en costos financieros para la manufactura del concreto.

Como respuesta a los tanteos calculados, la opción que mejor se ajustó por combinación entre el agregado grueso pétreo vírgen – *grava* y el RAP fue la proporción (80% *grava* + 20% RAP) para con ello, validar todas las categorías de las mezclas hidráulicas tipo MR (38-40-42 Kg/cm²) – Ver Gráfica 13.



Gráfica 13. Dosificación agregado pétreo vírgen – *grava* (80%) + (20%) RAP
Fuente: Elaboración propia

Con este punto de partida, se fijan las demás variables complementarias requeridas para el diseño de las mezclas hidráulicas objeto de las metodologías propuestas en el numeral 4 de la presente investigación. Para el agregado pétreo vírgen fino – *arena*, fue invariable la valoración granulométrica mostrada en la Figura 38 y Gráfica 9 (NTC-174=Tabla 500-1 INVÍAS-2013) – Véase Anexo C.

Como datos complementarios para el diseño de las mezclas, se tiene el siguiente resumen para las hojas de cálculo modeladas – Véase Figuras 48 a 51.

PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO COMBINADO						
PROYECTO:		Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.				
MATERIAL:		Agregado Virgen Grueso TMN 1" (80%) + RAP (20%)				GRAVA
FUENTE:		Río Chicamocha - Pescadero				
FECHA:		DD	MM	AA	Normatividad	
RECEPCIÓN:		10	11	2015	NTC-1974	
ENSAYO:		22	11	2015	INV E-217	
REPORTE:		30	11	2015		
RESULTADOS DE LABORATORIO						
Número de Pruebas		Unidades	1	2	3	PROMEDIO
A: Peso muestra seca		gr	4033.4	4030.1	4035.0	
B: Peso muestra SSS		gr	4066.1	4062.6	4068.2	
C: Peso muestra en agua		gr	2518.7	2511.6	2522.6	
B - C			1547.4	1551.0	1545.6	
A - C			1514.7	1518.5	1512.4	
B - A			32.7	32.5	33.2	
Gs BULK = A /(B-C)		gr / cm ³	2.607	2.598	2.611	2.605
Gs BULK sss = B/(B-C)		gr / cm ³	2.628	2.619	2.632	2.626
Gs APARENTE = A/(A-C)		gr / cm ³	2.663	2.654	2.668	2.662
ABSORCION % = (B-A)/A *100		%	0.8%	0.8%	0.8%	0.81%
A = Peso en el aire de la muestra seca (g) B = Peso en el aire de la muestra saturada superficialmente seca (g) C = Peso en el agua de la muestra saturada superficialmente seca (g) Gs = Peso específico						

Figura 48. Peso específico y absorción del agregado grueso combinado
Fuente: Elaboración propia

PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

PROYECTO:
MATERIAL:

FUENTE:
FECHA:
RECEPCIÓN:
ENSAYO:
REPORTE:

Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.
Agregado Virgen Fino (100%) ARENA

Río Chicamocha - Pescadero

DD	MM	AA
10	11	2015
22	11	2015
30	11	2015

Normatividad
NTC-1974
INV E-222

RESULTADOS DE LABORATORIO

Número de Pruebas	Unidades	1	2	PROMEDIO	
A: Peso muestra seca	Gr	496.8	496.5		
C: Peso matraz + agua + muestra	Cm³	982.6	982.7		
B: Peso matraz + agua	Cm³	675.4	676.0		
B+500-C		192.9	193.4		
B+A-C		189.6	189.8		
250-A		3.2	3.5		
Gs BULK = A/B+A-C	Gr/cm³	2.576	2.568	2.572	
Gs BULK SSS = 250/B+250-C	Gr/cm³	2.592	2.586	2.589	
Gs APARENTE = A/B+250-C	Gr/cm³	2.620	2.616	2.618	
ABSORCIÓN % = 250-A/A *100	%	0.7%	0.7%	0.7%	

A = Peso de la muestra seca (g)
C = Peso del matraz + muestra + agua (g)
B = Peso del matraz + agua (g)
Gs = Peso específico
250 = Peso de la muestra saturada superficialmente seca (SSS)

Figura 49. Peso específico y absorción del agregado fino
Fuente: Elaboración propia

PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GRUESO COMBINADO					
PROYECTO:	Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.				
MATERIAL:	Agregado Virgen Grueso TMN 1" (80%) + RAP (20%)				GRAVA
FUENTE:	Río Chicamocha - Pescadero				
FECHA:	DD	MM	AA	Normatividad INV E-217	
RECEPCIÓN:	22	11	2015		
ENSAYO:	25	11	2015		
REPORTE:	30	11	2015		
RESULTADOS DE LABORATORIO					
Número de Pruebas		1	2	3	
PESO SUELO SUELTO + MOLDE	gr	6,326	6,355	6,411	
PESO DEL MOLDE	gr	1,635	1,635	1,635	
PESO SUELO SUELTO	gr	4,621	4,635	4,611	
VOLUMEN DEL MOLDE	cm ³	3,084	3,084	3,084	
PESO UNITARIO SUELTO SECO	g/cm ³	1.498	1.503	1.495	
PESO UNITARIO PROMEDIO SECO	g/cm ³	1.499			

Figura 50. Peso unitario suelto del agregado grueso combinado
Fuente: Elaboración propia

PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO FINO					
PROYECTO:	Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.				
MATERIAL:	Agregado Virgen Fino (100%)			ARENA	
FUENTE:	Río Chicamocha - Pescadero				
FECHA:	DD	MM	AA	Normatividad INV E-217	
RECEPCIÓN:	22	11	2015		
ENSAYO:	25	11	2015		
REPORTE:	30	11	2015		
RESULTADOS DE LABORATORIO					
Número de Pruebas		1	2	3	
PESO SUELO SUELTO + MOLDE	gr	6,291	6,297	6,356	
PESO DEL MOLDE	gr	1,635	1,635	1,635	
PESO SUELO SUELTO	gr	4,656	4,662	4,721	
VOLUMEN DEL MOLDE	cm ³	3,084	3,084	3,084	
PESO UNITARIO SUELTO SECO	g/cm ³	1.509	1.511	1.531	
PESO UNITARIO PROMEDIO SECO	g/cm ³	1.517			

Figura 51. Peso unitario suelto del agregado fino
Fuente: Elaboración propia

6.3.1.1. Chequeo por teorías granulométricas continuas ideales

Dentro del desarrollo a la investigación, se pudo indagar que existen diversas teorías acerca de lo que “idealmente es el uso” de adecuadas granulometrías para la elaboración de concretos. La mayoría de los autores citados en el segundo párrafo del numeral 4, basan sus criterios en la “*capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas (Compacidad) dentro de un volumen dado*”, para lograr la máxima densidad y con esto, la mejor resistencia. Esto también puede conllevar igualmente, al diseño de mezclas poco trabajables en estado plástico.

6.3.1.1.1. Teoría de Fuller y Thompson

El trabajo titulado “Las leyes del proporcionamiento del concreto” presentado en (1907) por los autores “Fuller y Thompson” en los Estados Unidos de América, se considera como el punto de partida para todos los desarrollos posteriores sobre curvas granulométricas. Los autores *concluyen que toda curva de gradación ideal presenta un comportamiento elíptico en su fracción fina, la cual incluye al cemento*, y esta curva converge con una línea recta tangente a la elipse en las siguientes fracciones. La ecuación general para la parte elíptica de esta curva, está dada por la Ecuación 5.

$$\frac{(y-b)^2}{b} + \frac{(x-a)^2}{a} = 1$$

Ecuación 5. Determinación elíptica de curva

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Dónde:

(y) = Porcentaje de material que pasa el tamiz de abertura (x)

(a/b) = Constantes que representan los ejes de la elipse y su valor depende del tamaño máximo (D) del agregado y de la forma de las partículas – Véase Tabla 2.

Tabla 2. Valores de las constantes parte elíptica ecuación de “Fuller-Thompson”

Clase de Material	a	b
Agregados redondeados	0.164 D	28.6
Arena natural y grava “zarandeada”	0.150 D	30.4
Agregados “zarandeados”	0.147 D	30.8

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Estas constantes fueron dadas de tal manera que a más angulosas son las partículas de agregado es más amplio el porcentaje de material fino representado por la parte elíptica. En esta curva ideal, los autores encontraron que para un valor de (y) igual al 7% el valor de (x) era de 0.074 mm, es decir, que el 7% de la masa está constituida por partículas de diámetro inferior a 0.074 mm, o sea la fracción que pasa el tamiz N° 200, más el cemento.

Posteriormente, la curva continua con su forma elíptica, hasta un valor de (x) aproximadamente igual al (10%) del tamaño máximo (TM), y a partir de este punto sigue como una línea recta.

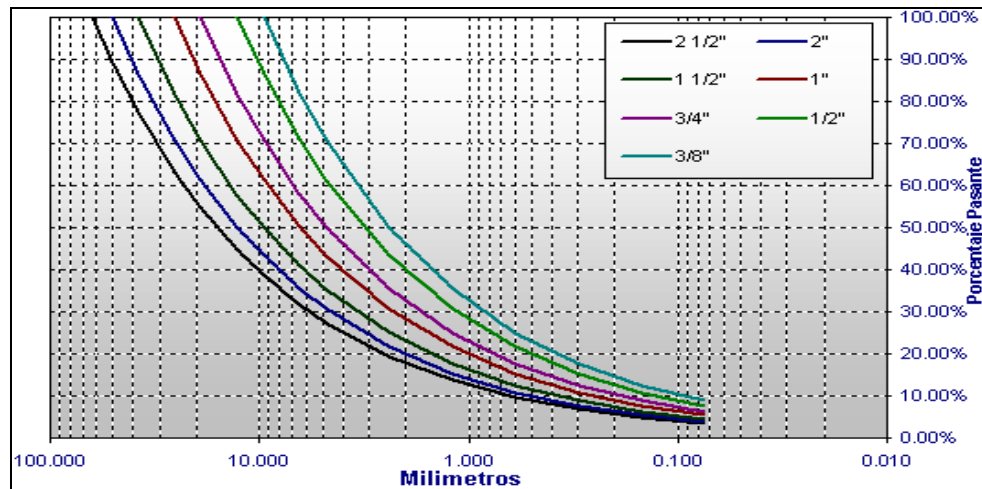
Fuller y Thompson et al. (1907), concluyeron que cuando se desea obtener la curva para el agregado solo, debe restarse la porción de cemento prevista en cada caso y tomar el resto como un 100%. Al hacer esto se obtiene una curva de forma aproximadamente parabólica, la cual se ha llamado “curva o parábola de Fuller”, y es expresada de la siguiente manera – Véase Ecuación 6, Gráfica 14 y Figura 52 respectivamente.

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Ecuación 6. Determinación parábola de "Fuller"

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

En donde, (P) es el porcentaje de material que pasa por el tamiz de abertura (d), y (D) es el tamaño máximo (TM) del agregado.



Gráfica 14. Curvas "Fuller" para diferentes tamaños máximos de agregados

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Tabla 4.12 Gradaciones ideales Fuller-Thompson de agregados para concreto en porcentaje que pasa								
TAMIZ		TAMAÑO MAXIMO mm (pulg.)						
mm	pulg.	76.1 (3")	50.8 (2")	38.1 (1 1/2")	25.4 (1")	19.0 (3/4")	12.7 (1/2")	9.51 (3/8")
76.1	- 3"	100.0						
50.8	- 2"	81.6	100.0					
38.1	- 1 1/2"	70.7	86.6	100.0				
25.4	- 1"	57.8	70.7	81.6	100.0			
19.0	- 3/4"	50.0	61.2	70.7	86.6	100.0		
12.7	- 1/2"	40.9	50.0	57.8	70.7	81.6	100.0	
9.51	- 3/8"	35.4	43.3	50.0	61.2	70.7	87.2	100.0
4.76	- No. 4	25.0	30.6	35.0	43.3	50.0	61.2	70.8
2.38	- No. 8	17.7	21.6	25.4	30.6	35.4	43.3	50.0
1.19	- No. 16	12.5	15.3	17.7	21.6	25.0	30.6	35.4
0.595	- No. 30	8.8	10.8	12.5	15.3	17.7	21.6	25.0
0.297	- No. 50	6.2	7.7	8.8	10.8	12.5	15.3	17.8
0.149	- No. 100	4.4	5.4	6.2	7.7	8.8	10.8	12.6

Figura 52. (Tabla 4.12). Gradaciones ideales "Fuller-Thompson"

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Es necesario recalcar que la gradación parabólica de “Fuller-Thompson”, es solamente una, de muchas familias de parábolas de varios grados, que no son otra expresión que la ley potencial de “Talbot”, expresada en la Ecuación 6. Para el diseño de mezclas, la relación de finos de los agregados será ajustada por la curva de “Fuller” tomando el tamiz No. 4 como la divisoria entre el agregado grueso y fino respectivamente.

Hay que destacar que estas curvas no producen la máxima compacidad buscada en los agregados, y algunos investigadores han calificado a las mezclas hechas con este método como ásperas y poco manejables, pero que dentro del alcance técnico para la construcción de pavimentos de concreto hidráulico no tienen ningún tipo de incidencia de tipo estructural. Precisamente la normativa INVÍAS-2013 recomienda para estos usos, asentamientos de diseño bajos a los que convencionalmente requieren los concretos de uso general – Véase Figuras 6 y 53 respectivamente.

Tabla 500 - 9. Tolerancias en el asentamiento y en el contenido de aire respecto de los definidos en la fórmula de trabajo		
CARACTERÍSTICA	CONSTRUCCIÓN	TOLERANCIA
Asentamiento	Formaletas fijas	25 a 50
	Formaletas deslizantes	13 a 38
Contenido de aire, cuando esté especificado	Formaletas fijas	+ 1.8 %
	Formaletas deslizantes	+ 1.8 %

Figura 53. (Tabla 500-9). Asentamiento y contenido de aire para mezclas tipo MR
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
Colombia

6.3.1.1.2. Teoría de Weymouth

En 1933, C.A.G. Weymouth tituló un trabajo de investigación denominado “Effect of particle interference in mortars and concrete”, en donde expone el efecto de interferencia para los requerimientos de agua y trabajabilidad, incluyendo la tendencia de los diferentes tamaños de partículas en la segregación de una mezcla de hormigón.

El autor ilustra su concepto en términos de mezcla seca de agregados, usando el modelo mostrado en la Figura 54. Esta figura representa en dos dimensiones una mezcla de dos únicos tamaños de partículas.

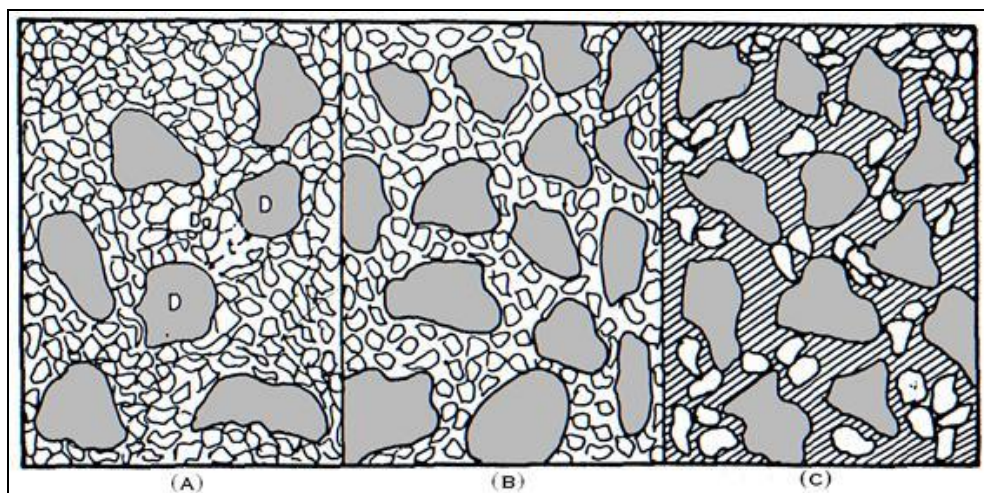


Figura 54. Modelo “Weymouth” para partículas de interferencia
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

En la parte (A), las partículas grandes no son dominantes y se encuentran separadas por más de una partícula pequeña, por lo cual la distancia entre ellas será más del diámetro de una partícula pequeña. En (B) la cantidad de partículas grandes es mayor y la distancia entre ellas será igual al diámetro de una partícula pequeña. Finalmente en (C), la cantidad de partículas grandes es mucho mayor por lo cual las partículas pequeñas no llegan a rellenar todos los poros, y entonces la distancia entre partículas grandes será menor que el diámetro de una partícula pequeña.

El autor concluyo que existe una “Ley de gradación” de tal manera que los diferentes tamaños de agregados deben tener espacio para moverse entre las partículas más grandes, evitando de esta manera la interferencia de las mismas.

Sin embargo, también menciona que esta interferencia aparece cuando hay mucha cantidad de agregados de un solo tamaño; esto solo es cierto cuando las diferentes partículas de agregados son muy cercanas en diámetro, siendo el efecto diferente cuando los tamaños de partículas son muy diferenciados en tamaños de partículas.

La ley de gradación de “Weymouth” es otra forma de la ley potencial de “Talbot” mostrada en la Ecuación 6, diferenciando ahora, el coeficiente (n) según el tamaño máximo (TM) del agregado – Véase Ecuación 7.

$$P = 100 \sqrt[n]{\frac{d}{D}}$$

Ecuación 7. Determinación ley de “Weymouth”

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

En donde (n), es el exponente que gobierna la distribución de las partículas, y es función del agregado grueso. Los valores de (n) están dados por la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de (n) para la ecuación de “Weymouth” en función del tamaño

Tamaño (d)	(n)
3"	0.230
2"	0.255
1 ½ "	0.268
1"	0.283
¾"	0.292
½"	0.298
3/8"	0.304
Nº4 – Nº 100	0.305

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Igualmente, en la Gráfica 15 y Figura 55 se muestran las diferentes curvas de “Weymouth” según el tamaño máximo del agregado grueso.

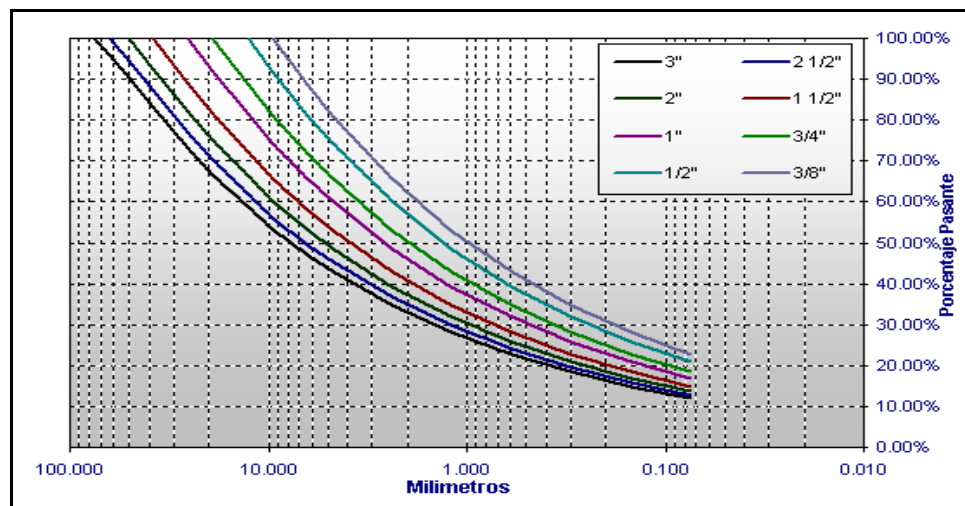
6.3.1.1.3. Teoría de Sánchez De Guzmán

Esta teoría desarrollada por este autor colombiano, tiene como base las hipótesis acabadas de mencionar, pero él considero la necesidad de tomar un valor más alto al exponente que gobierna la distribución de las partículas en el agregado grueso definido por su tamaño máximo (TM) en (n=0.45) – Véase curvas granulométricas ideales en Figura 57.

El fundamento recae en la sustentación de requerir una mayor energía de compactación (Resistencia) para lograr una alta masa unitaria o densidad – Véase Figura 56. Allí se aprecia que la más alta resistencia de un concreto en función de su granulometría se obtiene para el valor citado, empleando métodos tradicionales de compactación.

Tamiz		Tamaño máximo mm (pulg.)				
mm	pulg.	76.1 (3)	50.8 (2)	38.1 (1½)	25.4 (1)	19.1 (¾)
76.1	- 3	100.0	-	-	-	-
50.8	- 2	-	100.0	-	-	-
38.1	- 1½	83.0	92.6	100.0	-	-
25.4	- 1	-	-	-	100.0	-
19.1	- ¾	66.7	75.2	81.6	91.7	100.0
9.51	- ¾	53.0	60.1	65.6	74.1	81.0
4.76	- No. 4	42.9	48.5	53.0	60.0	65.5
2.38	- No. 8	34.8	39.4	42.9	48.5	53.0
1.19	- No. 16	28.1	38.1	34.8	39.3	42.9
0.595	- No. 30	22.8	25.8	28.1	31.8	34.8
0.297	- No. 50	18.4	20.8	22.8	25.8	28.1
0.149	- No. 100	14.9	16.9	18.4	20.8	22.8

Figura 55. (Tabla 4.14). Gradaciones ideales “Weymouth”
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá:
Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia



Gráfica 15. Curvas “Weymouth” para diferentes tamaños máximos de agregados
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá:
Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Por tales motivos, el autor sugiere la siguiente expresión como “curva ideal de gradación” para los agregados, en función primordial de mitigar la aspereza, mejorar la manejabilidad-trabajabilidad (Asentamiento) y optar para el mejoramiento de las resistencias en una mezcla de concreto. El valor ($n=0.45$) es una cifra intermedia entre la máxima compacidad de los agregados por sí solos ($n=0.40$) y la de los agregados impregnados con cemento ($n=0.50$) con métodos tradicionales de compactación. Ante ello, el autor postula las siguientes granulometrías y/o usos especiales mostrados en las Figuras 56 a 57.

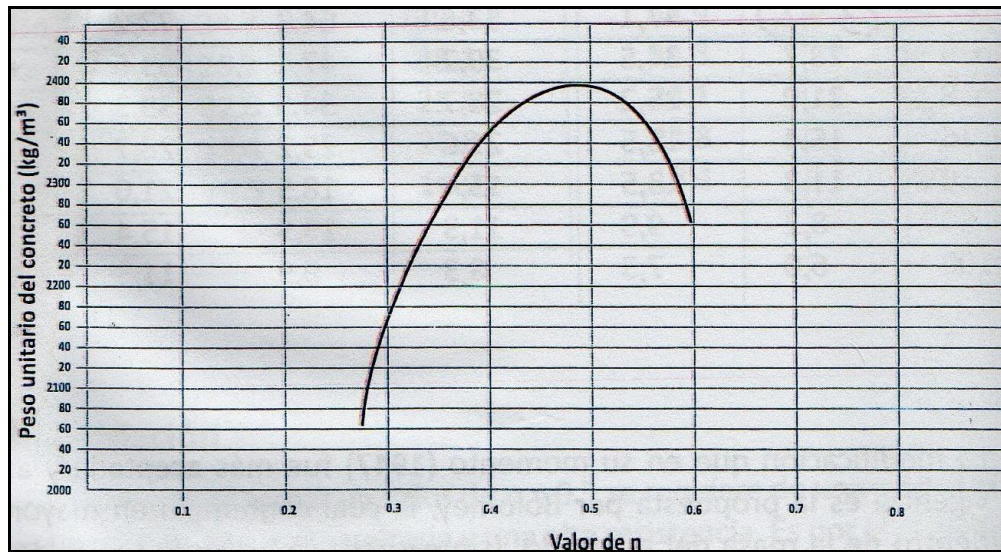


Figura 56. Resistencia compresión concreto Vs. (n) “Sánchez De Guzmán”
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá:
Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Tamiz		Tamaño máximo mm (pulg.)						
mm	pulg	76,1 (3")	50,8 (2")	38,1 (1 ½")	25,4 (1")	19,0 (¾")	12,7 (½")	9,51 (⅜")
76,1	3	100,0						
50,8	2"	81,3	100,0					
38,1	1½"	73,2	87,9	100,0				
25,1	1"	61,8	73,2	83,3	100,0			
19,0	¾"	53,6	64,3	73,2	87,9	100,0		
12,7	½"	44,7	53,6	61,0	73,2	83,3	100,0	
9,51	⅜"	39,2	47,1	53,6	64,3	73,2	87,2	100,0
4,76	No. 4	28,7	34,5	39,2	47,1	53,6	64,3	73,2
2,38	No. 8	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3	47,1	53,6
1,19	No. 16	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3
0,595	No. 30	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7
0,297	No. 50	8,2	9,9	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0
0,149	No. 100	6,0	7,3	8,3	9,9	11,3	13,5	15,4

Figura 57. Gradaciones ideales “Sánchez De Guzmán”
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá:
Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

6.3.1.1.4. Teoría de Bolomey

Para finalizar y dando cumplimiento al literal 500.2.1.4 INVÍAS-2013– Véase Figura 58, y después de estudiadas las teorías de los autores “Fuller, Thompson, Weymouth y Sánchez De Guzmán”, se han realizado múltiples curva ideales, y aun hoy hay muchos investigadores, que así las utilizan.

La curva granulométrica obtenida al mezclar los agregados grueso y fino en el diseño y construcción del concreto, deberá ser continua y asemejarse a las teóricas obtenidas al aplicar las fórmulas de Fuller o Bolomey.

Figura 58. (Num. 500.2.1.4). Condiciones obtención curva granulométrica diseño
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
Colombia

Sin embargo, la modificación que ha sido más aceptada es la realizada por “Bolomey” en (1947), la cual contempla un mayor contenido de finos dentro de la masa de agregado con objeto de eliminar la aspereza y mejorar la manejabilidad (Asentamiento) de la mezcla de concreto en estado fresco.

Esta modificación es mostrada en la Ecuación 8.

$$P = f + (100 - f) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Ecuación 8. Determinación ley de “Weymouth”

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá:
Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Donde, (f) es una constante empírica que representa el grado de trabajabilidad de una mezcla de concreto para una trabajabilidad y forma determinada. Los valores de (f) se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de (f) para la ecuación de “Bolomey” en función del tamaño

Forma de las partículas de agregado	Consistencia del concreto		
	Seca	Normal	Húmeda
Agregados redondeados	6 - 8	10	12
Agregados chancados	8 - 10	12 - 14	14 - 16

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá:
Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

En la Figura 59 se muestran las gradaciones ideales desarrolladas por el autor para su utilización en el diseño y manufactura de concretos.

Finalizada esta presentación es conveniente anotar, que las granulometrías ideales solo existen a nivel teórico, y difícilmente se pueden reproducir en la práctica de un proceso real para una planta de producción, de tal manera que una buena granulometría se debe referir al aprovechamiento eficiente de condiciones técnicas y económicas para obtener el o los resultados esperados.

Por ello es que de aquí es que nacen los usos granulométricos en donde se definen los límites de control inferior y superior como lo establecen las normatividades ya citadas.

Tabla 4.16 Gradaciones ideales para agregados, en porcentaje que pasa, según el autor

Tamiz		Tamaño Máximo mm (pulg.)						
mm	pulg.	76.1 (3)	50.8 (2)	38.1 (1½)	25.4 (1)	19.0 (¾)	12.7 (½)	9.51 (¼)
76.1	- 3"	100.0						
50.8	- 2"	83.3	100.0					
38.1	- 1½"	73.2	87.9	100.0				
25.4	- 1"	61.0	73.2	83.3	100.0			
19.0	- ¾"	53.6	64.3	73.2	87.9	100.0		
12.7	- ½"	44.7	53.6	61.0	73.2	83.3	100.0	
9.51	- ¾"	39.2	47.1	53.6	64.3	73.2	87.9	100.0
4.76	- No. 4	28.7	34.5	39.2	47.1	53.6	64.3	73.2
2.38	- No. 8	21.0	25.2	28.7	34.5	39.3	47.1	53.6
1.19	- No. 16	15.4	18.5	21.0	25.2	28.7	34.5	39.3
0.595	- No. 30	11.3	13.5	15.4	18.5	21.0	25.2	28.7
0.297	- No. 50	8.2	9.9	11.3	13.5	15.4	18.5	21.0
0.149	- No. 100	6.0	7.3	8.3	9.9	11.3	13.5	15.4

Figura 59. (Tabla 4.16). Gradaciones ideales "Bolomey"

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

6.3.2. Obtención final de agregados pétreos (*Combinado + arena*) por teorías granulométricas y dosificación en frío para diseño de mezclas

Como ya fue mencionado en el numeral 4.5 (Tabla 1), la combinación de mayor ajuste para el diseño y manufactura de las mezclas hidráulicas tipo MR, en función de las verificaciones que por teoría granulométrica se acabaron de mencionar, fueron las dosificaciones allí tasadas (MR-3.8 MPa = 60% *combinado* + 40% *arena* – MR-4.0 y 4.2 MPa = 57% *combinado* + 43% *arena*).

En las Gráficas 16 a 30 y Figuras 60 a 74, se muestran un resumen de los resultados obtenidos que puede apreciarse de mejor condición interpretativa e ilustrativa en el Anexo C de la presente investigación.

6.3.3. Metodologías de diseño de mezclas

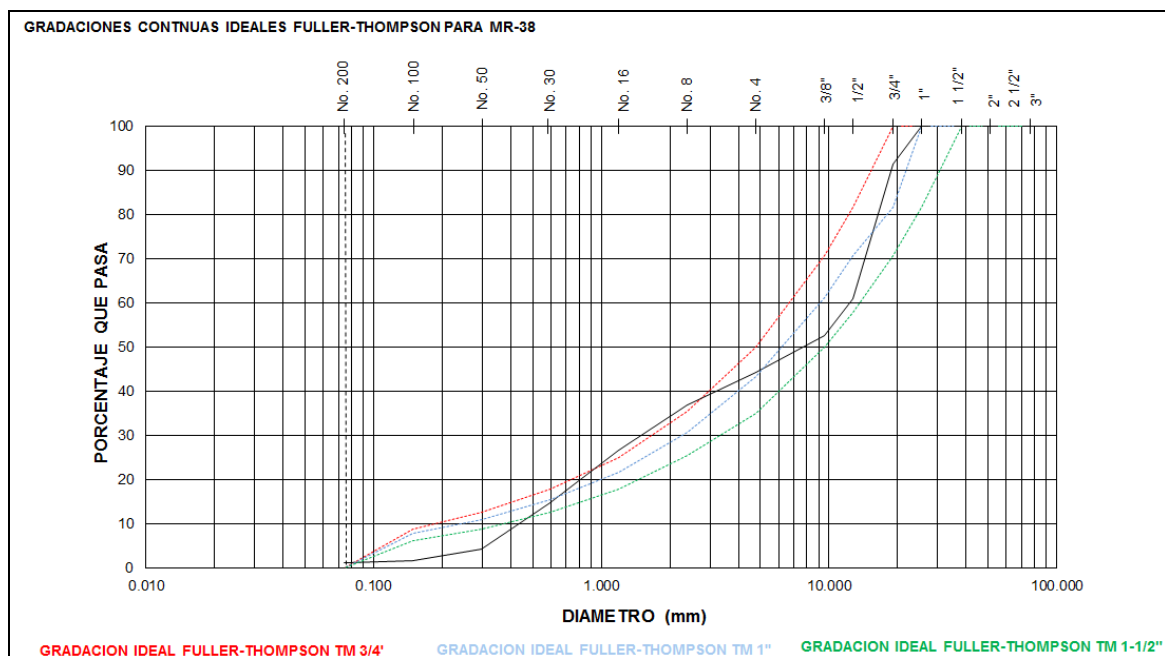
6.3.3.1. Comité ACI-211 / Guía Ing. Alejandro Sandino

Los pasos aplicados y que son de usual conocimiento, fueron los siguientes – Véase Anexo C:

- Selección del asentamiento de diseño: Se tuvo como referencia las recomendaciones establecidos en la Figura 53. Para este caso, todas las mezclas para pavimento de concreto hidráulico se diseñaron con 3”.
- Selección del tamaño máximo (TM) del agregado: Se fijó en (25 mm = 1”) de acuerdo a los soportes técnicos recientemente enunciados.
- Estimación del contenido de aire: El valor fijado del (1%) corresponde a las recomendaciones mostradas en la Figura 75.

VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "FULLER-THOMPSON" - MR-38											
			Grueso V.		RAP				Fino V.		
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	60.0%	0.0%	100.0%	40.0%		
SUMA											100.0%
TAMAÑO	GRUPOS DE TAMAÑOS										MEZCLA
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal		3/8"	Subtotal	GRUPOS
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6		100.0	100.0	91.4
1/2"	12.7			0.0	21.4	89.0	34.9		100.0	100.0	61.0
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0		100.0	100.0	52.6
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4		93.3	93.3	44.1
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4		81.2	81.2	36.9
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0		62.2	62.2	26.7
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7		35.5	35.5	14.6
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1		10.5	10.5	4.3
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0		3.8	3.8	1.5
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0		2.7	2.7	1.1
MALLA	FULLER	FULLER	FULLER	FULLER	FULLER						
	3/4"	1"	1-1/2"	2"	3"						
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	81.6						
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	81.6	70.7						
1"	100.0	100.0	81.6	70.7	57.8						
3/4"	100.0	81.6	70.7	61.2	50.0						
1/2"	81.6	70.7	57.8	50.0	40.9						
3/8"	70.7	61.2	50.0	43.3	35.4						
No. 4	50.0	43.3	35.0	30.6	25.0						
No. 8	35.4	30.6	25.4	12.6	17.7						
No. 16	25.0	21.6	17.7	15.3	12.5						
No. 30	17.7	15.3	12.5	10.8	8.8						
No. 50	12.5	10.8	8.8	7.7	6.2						
No. 100	8.8	7.7	6.2	5.4	4.4						
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						

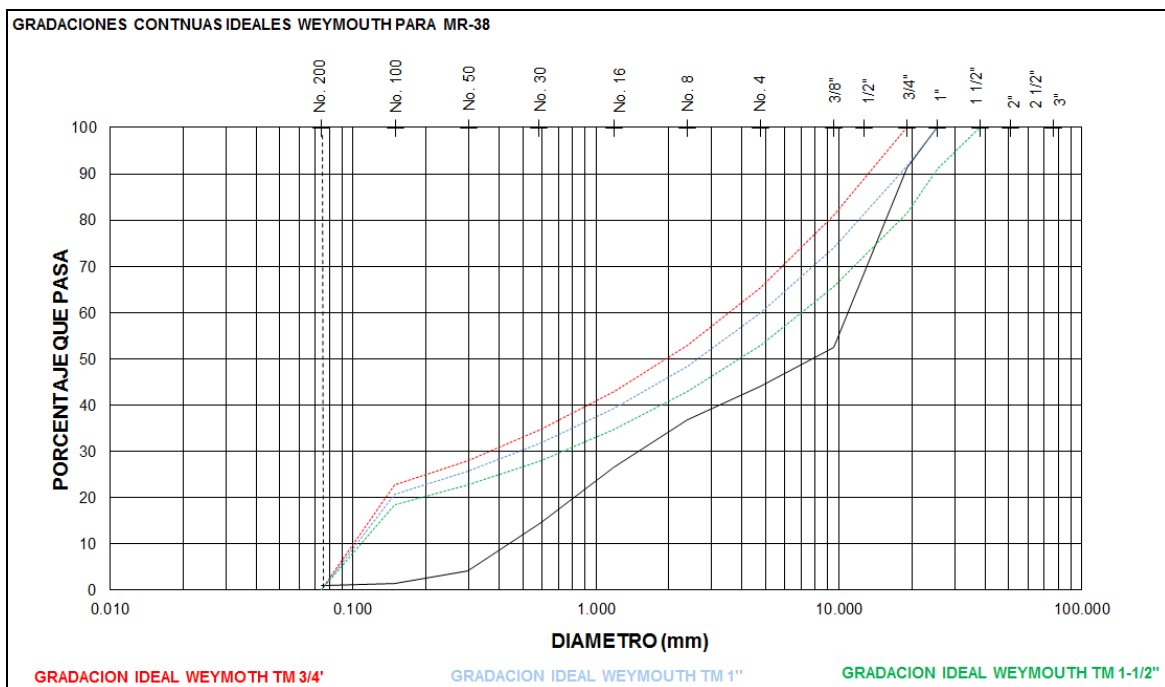
Figura 60. Verificación en teoría granulométrica “Fuller-Thompson” MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 16. Gráficas continuas ideales “Fuller-Thompson” MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "WEYMOUTH" - MR-38											
					Grueso V.	RAP			Fino V.		
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	60.0%	0.0%	100.0%	40.0%		
SUMA									100.0%		
TAMAÑO		GRUPOS DE TAMAÑOS									MEZCLA GRUPOS
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal		3/8"	Subtotal	
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6		100.0	100.0	91.4
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0		100.0	100.0	52.6
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4		93.3	93.3	44.1
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4		81.2	81.2	36.9
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0		62.2	62.2	26.7
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7		35.5	35.5	14.6
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1		10.5	10.5	4.3
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0		3.8	3.8	1.5
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0		2.7	2.7	1.1
MALLA	WEYMOUTH	WEYMOUTH	WEYMOUTH	WEYMOUTH	WEYMOUTH						
	3/4"	1"	1-1/2"	2"	3"						
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	91.5						
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	92.6	83.0						
1"	100.0	100.0	91.0	83.9	74.9						
3/4"	100.0	91.7	81.6	75.2	66.7						
3/8"	81.0	74.1	65.6	60.1	53.0						
No. 4	65.5	60.0	53.0	48.5	42.9						
No. 8	53.0	48.5	42.9	39.4	34.8						
No. 16	42.9	39.3	34.8	31.1	28.1						
No. 30	34.8	31.8	28.1	25.8	22.8						
No. 50	28.1	25.8	22.8	20.8	18.4						
No. 100	22.8	20.8	18.4	16.9	14.9						
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						

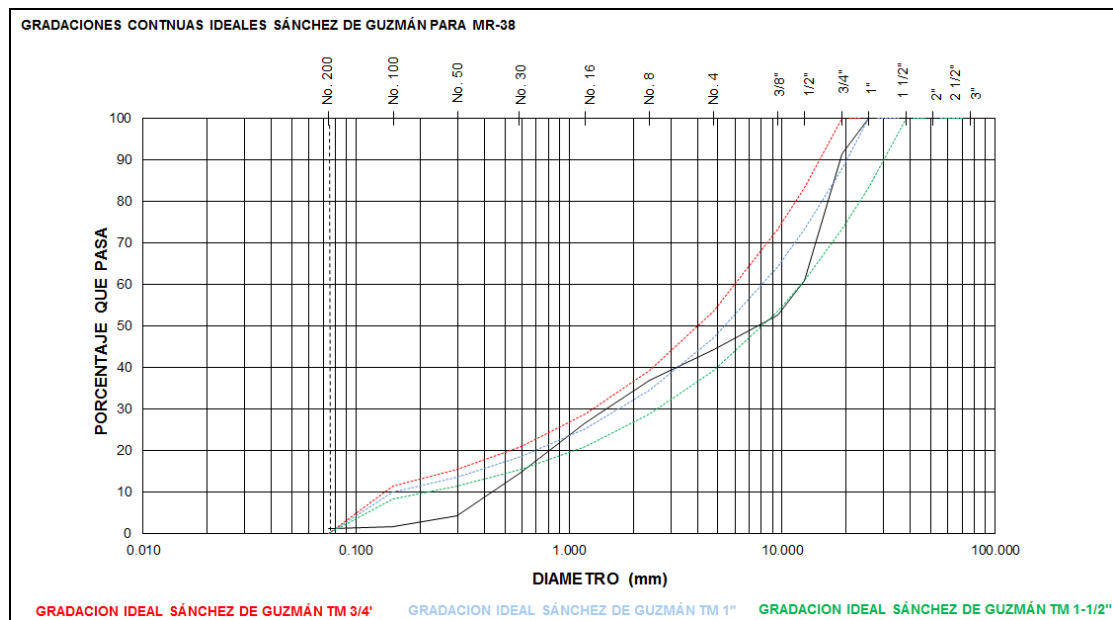
Figura 61. Verificación en teoría granulométrica “Weymouth” MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 17. Gráficas continuas ideales “Weymouth” MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "SÁNCHEZ DE GUZMÁN" - MR-38											
					Grueso V.	RAP			Fino V.		
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	60.0%	0.0%	100.0%	40.0%		
SUMA										100.0%	
TAMAÑO			GRUPOS DE TAMAÑOS								MEZCLA GRUPO
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal		3/8"	Subtotal	
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6		100.0	100.0	
1/2"	12.7			0.0	21.4	89.0	34.9		100.0	100.0	
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0		100.0	100.0	
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4		93.3	93.3	
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4		81.2	81.2	
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0		62.2	62.2	
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7		35.5	35.5	
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1		10.5	10.5	
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0		3.8	3.8	
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0		2.7	2.7	
MALLA	SDG 3/4"	SDG 1"	SDG 1-1/2"	SDG 2"	SDG 3"						
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0						
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	81.3						
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	87.9	73.2						
1"	100.0	100.0	83.3	73.2	61.8						
3/4"	100.0	87.9	73.2	64.3	53.6						
1/2"	83.3	73.2	61.0	53.6	44.7						
3/8"	73.2	64.3	53.6	47.1	39.2						
No. 4	53.6	47.1	39.2	34.5	28.7						
No. 8	39.3	34.5	28.7	25.2	21.0						
No. 16	28.7	25.2	21.0	18.5	15.4						
No. 30	21.0	18.5	15.4	13.5	11.3						
No. 50	15.4	13.5	11.3	9.9	8.2						
No. 100	11.3	9.9	8.3	7.3	6.0						
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						

Figura 62. Verificación en teoría granulométrica "Sánchez D. G." MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia



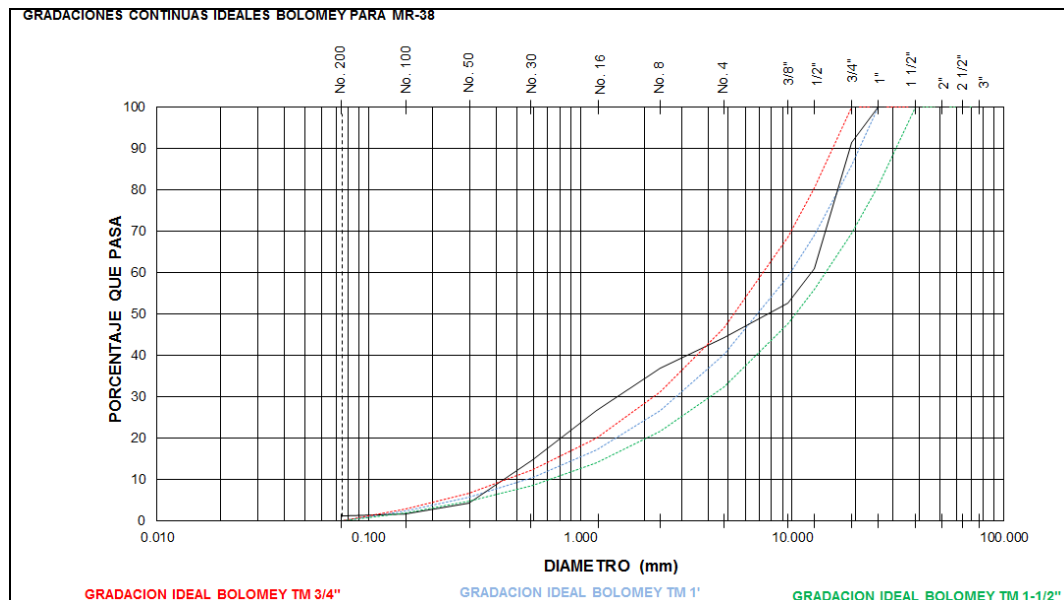
Gráfica 18. Gráficas continuas ideales "Sánchez D. G." MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "BOLOMEY" - MR-38												
VALORES DE "f" PARA EL CÁLCULO DE LA GRADACIÓN IDEAL												
FORMA	MEZCLA	Seca			Normal			Húmeda			f =	
		8 - 8			10			12				
		8 - 10			12 - 14			14 - 16				
C			B						13			
% COMBINACIÓN		0.0%	0.0%	0.0%	Grueso V.		RAP		Fino V.			
					80.0%		20.0%		0.0%			
		SUMA								100.0%		
TAMAÑO				GRUPOS DE TAMAÑOS								MEZCLA GRUPO
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal	3/8"	Subtotal			
3"	76.2			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
2-1/2"	63.5			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6	100.0	100.0	91.4		
1/2"	12.7			0.0	21.4	89.0	34.9	100.0	100.0	61.0		
3/8"	9.510			0.0	6.5	78.9	21.0	100.0	100.0	52.6		
No. 4	4.760			0.0	0.6	54.4	11.4	93.3	93.3	44.1		
No. 8	2.380			0.0	0.6	34.4	7.4	81.2	81.2	36.9		
No. 16	1.190			0.0	0.0	14.8	3.0	62.2	62.2	26.7		
No. 30	0.595			0.0	0.0	3.3	0.7	35.5	35.5	14.6		
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1	10.5	10.5	4.3		
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0	3.8	3.8	1.5		
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	2.7	1.1		

P = f * (100 - f) * (d / D) ^ 0.5					
BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY
3"	2"	1-1/2"	1"	3/4"	
76.2	50.8	38.1	25.4	19.1	
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2-1/2"	92.4	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	84.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1-1/2"	74.5	88.3	100.0	100.0	100.0
1"	63.2	74.5	84.0	100.0	100.0
3/4"	56.6	66.3	74.6	88.4	100.0
1/2"	48.5	56.5	63.2	74.5	83.9
3/8"	43.7	50.6	56.5	66.2	74.4
No. 4	34.7	39.6	43.8	50.7	56.4
No. 8	28.4	31.8	34.7	39.6	43.7
No. 16	23.9	26.3	28.4	31.8	34.7
No. 30	20.7	22.4	23.9	26.3	28.4
No. 50	18.4	19.7	20.7	22.4	23.8
No. 100	16.8	17.7	18.4	19.7	20.7

GRADACIONES CORREGIDAS PARA QUE LA FRACCIÓN DE ARENA TENGA UN 8% QUE PASE POR MALLA No. 100					
BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY
3"	2"	1-1/2"	1"	3/4"	
76.2	50.8	38.1	25.4	19.1	
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
91.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
81.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
69.8	86.1	100.0	100.0	100.0	100.0
56.4	69.6	80.8	100.0	100.0	100.0
48.5	59.8	69.5	86.0	100.0	100.0
38.9	48.0	55.8	69.0	80.3	100.0
33.3	41.0	47.7	59.0	68.6	100.0
22.6	27.9	32.4	40.1	46.6	100.0
15.0	18.5	21.5	26.7	31.0	100.0
9.7	12.0	13.9	17.2	20.0	100.0
5.9	7.3	8.5	10.5	12.2	100.0
3.2	4.0	4.6	5.7	6.7	100.0
1.4	1.7	1.9	2.4	2.8	100.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0

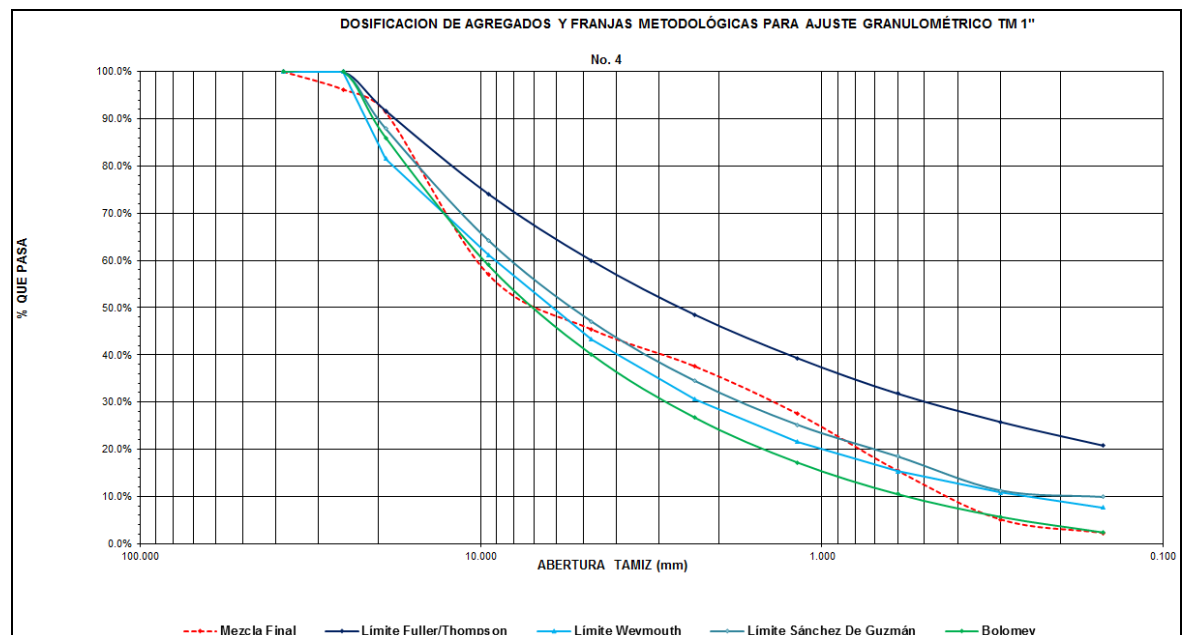
Figura 63. Verificación en teoría granulométrica "Bolomey" MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 19. Gráficas continuas ideales "Bolomey" MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

DISEÑO MEZCLA HIDRAULICA TIPO MR-38 CON ADICION DE RAP										
REPORTE METODOLÓGICO DE DOSIFICACION FINAL EN AGREGADOS										
PROYECTO:	Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.									
MATERIAL:	Agregado Virgen Grueso TMN 1" (80%) + RAP (20%)					GRAVA COMBINADA				
	Agregado Virgen Fino (100%)					ARENA				
FUENTE:	Río Chicamocha - Pescadero									
FECHA:	DD	MM	AA	Gradación Metodológica						
RECEPCIÓN:	10	11	2015	WEYMOUTH (1933)						
ENSAYO:	22	11	2015	FULLER (1907)						
REPORTE:	30	11	2015	SÁNCHEZ De G. (1996)						
	BOLOMEY (1947)									
RESULTADOS DE LABORATORIO										
Tamiz		Ag. Grueso	Ag. Fino	GRAVA	ARENA	Mezcla Final	TEORÍA GRANULOMETRÍAS CONTINUAS IDEALES PARA DISEÑO (TMN 1")			
Alterno	mm	RAP		60	40	% PASA	WEYMOUTH (1933)	FULLER (1907)	SÁNCHEZ De G. (1996)	BOLOMEY (1947)
1 1/2"	38.100	100%	100%	60%	40%	100%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1"	25.40	93.7%	100.0%	56%	40%	96%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/4"	19.05	85.6%	100.0%	51%	40%	91%	91.7%	81.6%	87.9%	86.0%
3/8"	9.53	28.3%	100.0%	17%	40%	57%	74.1%	61.2%	64.3%	59.0%
No. 4	4.75	13.5%	93.3%	8.1%	37%	45%	60.0%	43.3%	47.1%	40.1%
No. 8	2.36	8.5%	81.2%	5.1%	32%	38%	48.5%	30.6%	34.5%	26.7%
No. 16	1.18	4.4%	62.2%	2.7%	25%	28%	39.3%	21.6%	25.2%	17.2%
No. 30	0.600	2.1%	35.5%	1.3%	14%	15%	31.8%	15.3%	18.5%	10.5%
No. 50	0.300	1.6%	10.5%	0.9%	4%	5%	25.8%	10.8%	11.3%	5.7%
No. 100	0.150	1.3%	3.8%	0.8%	2%	2%	20.8%	7.7%	9.9%	2.4%

Figura 64. Reporte metodológico de dosificación final en agregados MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

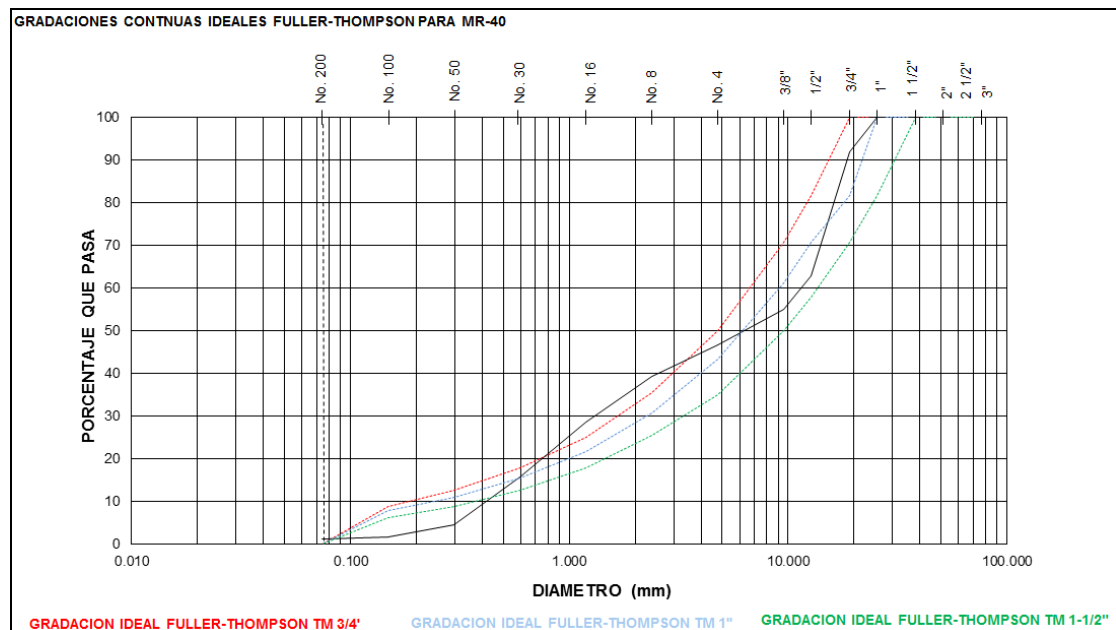


Gráfica 20. Dosificación agregados y franjas metodológicas MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "FULLER-THOMPSON" - MR-40											
					Grueso V.	RAP			Fino V.		
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	57.0%	0.0%	100.0%	43.0%		
SUMA											
TAMAÑO		GRUPOS DE TAMAÑOS								MEZCLA GRUPOS	
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal		3/8"	Subtotal	
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6		100.0	100.0	91.8
1/2"	12.7			0.0	21.4	89.0	34.9		100.0	100.0	62.9
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0		100.0	100.0	55.0
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4		93.3	93.3	46.6
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4		81.2	81.2	39.1
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0		62.2	62.2	28.4
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7		35.5	35.5	15.6
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1		10.5	10.5	4.6
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0		3.8	3.8	1.6
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0		2.7	2.7	1.2

MALLA	FULLER	FULLER	FULLER	FULLER	FULLER
	3/4"	1"	1-1/2"	2"	3"
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	81.6
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	81.6	70.7
1"	100.0	100.0	81.6	70.7	57.8
3/4"	100.0	81.6	70.7	61.2	50.0
1/2"	81.6	70.7	57.8	50.0	40.9
3/8"	70.7	61.2	50.0	43.3	35.4
No. 4	50.0	43.3	35.0	30.6	25.0
No. 8	35.4	30.6	25.4	12.6	17.7
No. 16	25.0	21.6	17.7	15.3	12.5
No. 30	17.7	15.3	12.5	10.8	8.8
No. 50	12.5	10.8	8.8	7.7	6.2
No. 100	8.8	7.7	6.2	5.4	4.4
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

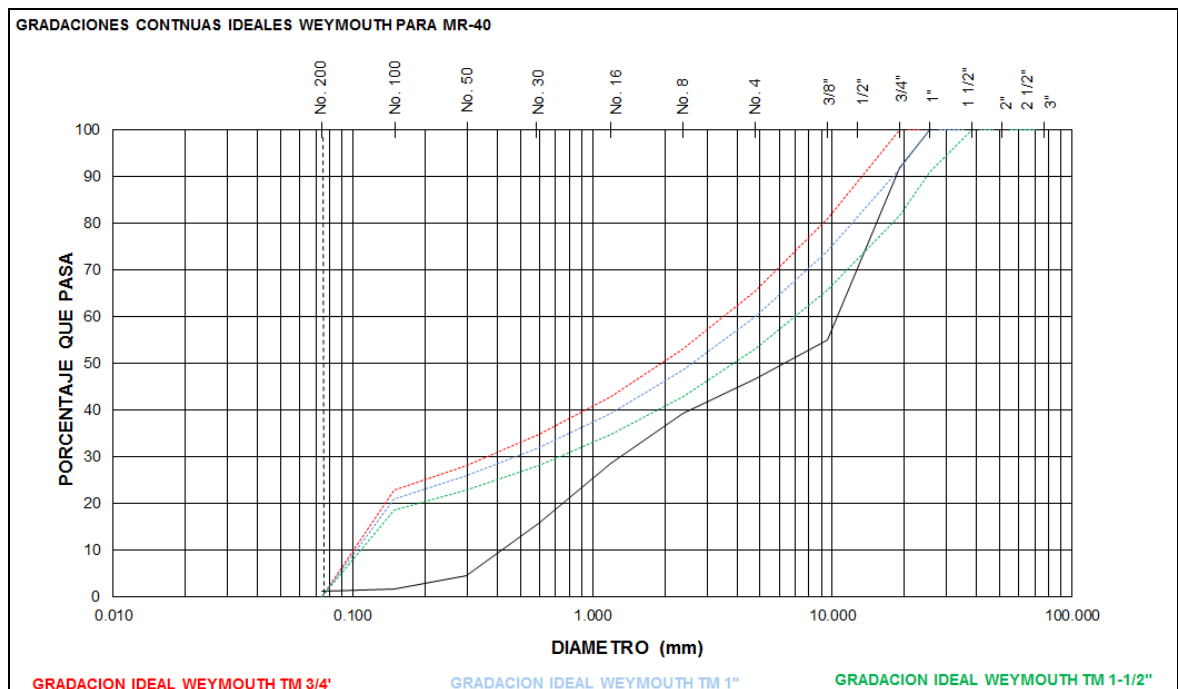
Figura 65. Verificación en teoría granulométrica "Fuller-Thompson" MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 21. Gráficas continuas ideales "Fuller-Thompson" MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "WEYMOUTH" - MR-40										
			Grueso V.		RAP		Fino V.			
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	57.0%	0.0%	100.0%	43.0%	
SUMA										
TAMAÑO			GRUPOS DE TAMAÑOS							
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal		3/8"	Subtotal
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6		100.0	100.0
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0		100.0	100.0
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4		93.3	93.3
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4		81.2	81.2
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0		62.2	62.2
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7		35.5	35.5
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1		10.5	10.5
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0		3.8	3.8
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0		2.7	2.7
MEZCLA GRUPOS										
MALLA	WEYMOUTH 3/4"	WEYMOUTH 1"	WEYMOUTH 1-1/2"	WEYMOUTH 2"	WEYMOUTH 3"					
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0					
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	91.5					
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	92.6	83.0					
1"	100.0	100.0	91.0	83.9	74.9					
3/4"	100.0	91.7	81.6	75.2	66.7					
3/8"	81.0	74.1	65.6	60.1	53.0					
No. 4	65.5	60.0	53.0	48.5	42.9					
No. 8	53.0	48.5	42.9	39.4	34.8					
No. 16	42.9	39.3	34.8	31.1	28.1					
No. 30	34.8	31.8	28.1	25.8	22.8					
No. 50	28.1	25.8	22.8	20.8	18.4					
No. 100	22.8	20.8	18.4	16.9	14.9					
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					

Figura 66. Verificación en teoría granulométrica "Weymouth" MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

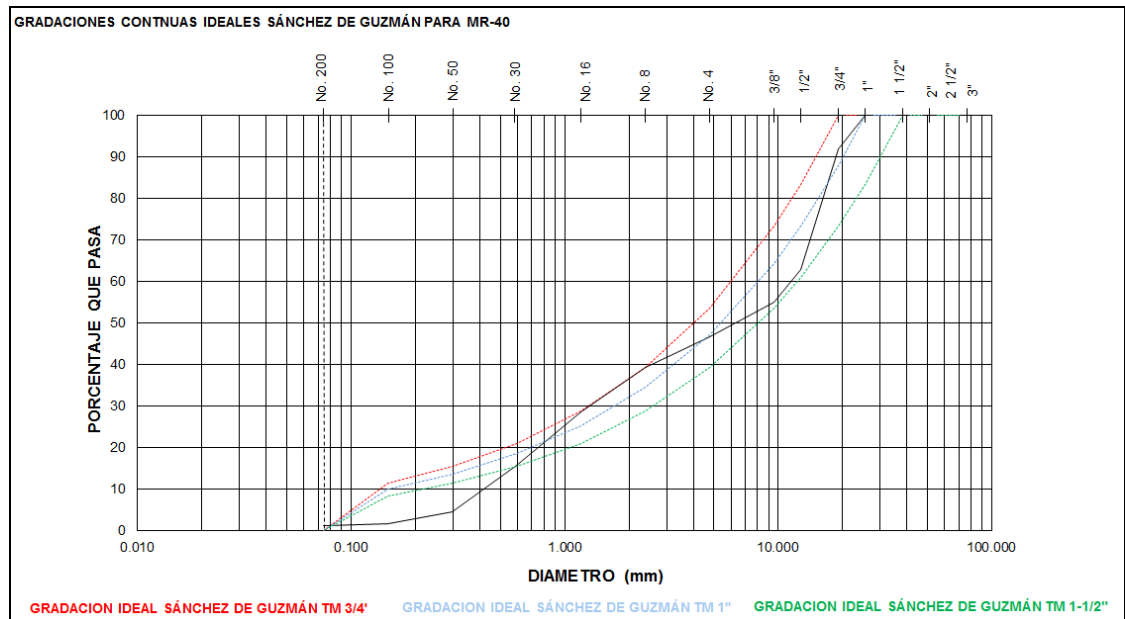


Gráfica 22. Gráficas continuas ideales "Weymouth" MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "SÁNCHEZ DE GUZMÁN" - MR-40										
					Grueso V.	RAP			Fino V.	
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	57.0%	0.0%	100.0%	43.0%	
SUMA										
TAMAÑO	GRUPOS DE TAMAÑOS								MEZCLA	
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal	3/8"	Subtotal	GRUPOS
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6	100.0	100.0	91.8
1/2"	12.7			0.0	21.4	89.0	34.9	100.0	100.0	62.9
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0	100.0	100.0	55.0
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4	93.3	93.3	46.6
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4	81.2	81.2	39.1
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0	62.2	62.2	28.4
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7	35.5	35.5	15.6
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1	10.5	10.5	4.6
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0	3.8	3.8	1.6
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	2.7	1.2

MALLA	SDG	SDG	SDG	SDG	SDG
	3/4"	1"	1-1/2"	2"	3"
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	81.3
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	87.9	73.2
1"	100.0	100.0	83.3	73.2	61.8
3/4"	100.0	87.9	73.2	64.3	53.6
1/2"	83.3	73.2	61.0	53.6	44.7
3/8"	73.2	64.3	53.6	47.1	39.2
No. 4	53.6	47.1	39.2	34.5	28.7
No. 8	39.3	34.5	28.7	25.2	21.0
No. 16	28.7	25.2	21.0	18.5	15.4
No. 30	21.0	18.5	15.4	13.5	11.3
No. 50	15.4	13.5	11.3	9.9	8.2
No. 100	11.3	9.9	8.3	7.3	6.0
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

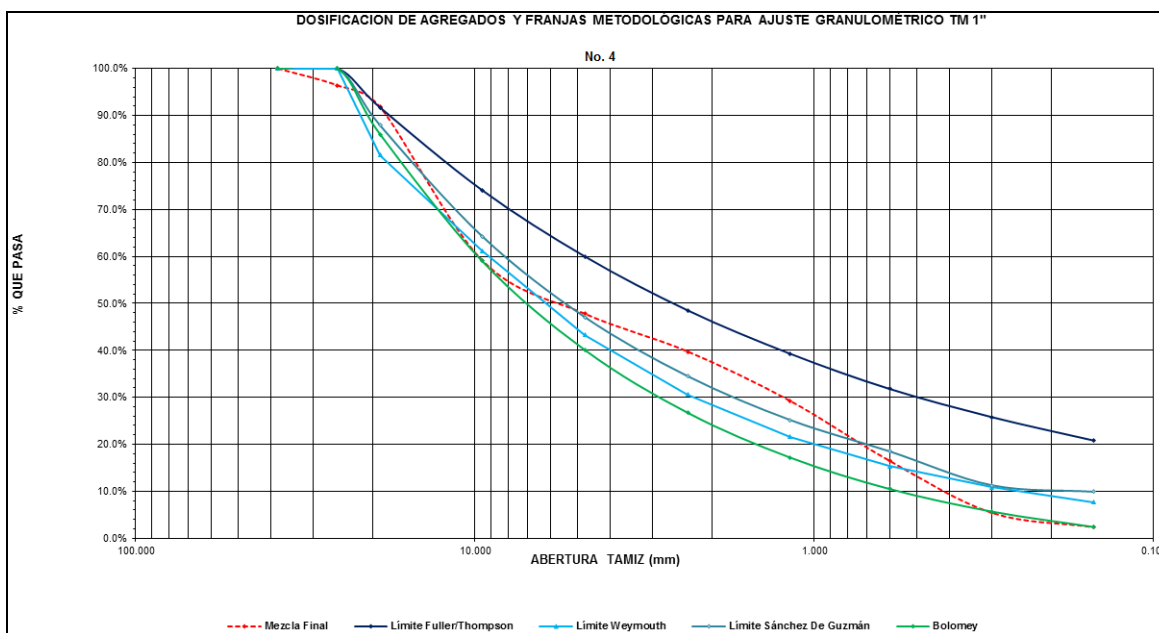
Figura 67. Verificación en teoría granulométrica "Sánchez D. G." MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 23. Gráficas continuas ideales "Sánchez D. G." MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

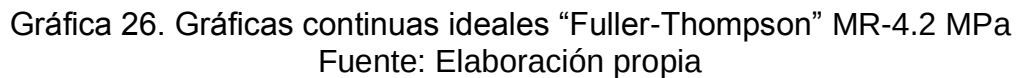
DISEÑO MEZCLA HIDRAULICA TIPO MR-40 CON ADICION DE RAP										
REPORTE METODOLÓGICO DE DOSIFICACION FINAL EN AGREGADOS										
PROYECTO:	Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.									
MATERIAL:	Agregado Virgen Grueso TMN 1" (80%) + RAP (20%)					GRAVA COMBINADA				
	Agregado Virgen Fino (100%)					ARENA				
FUENTE:	Río Chicamocha - Pescadero									
FECHA:	DD	MM	AA	Gradación Metodológica						
RECEPCIÓN:	10	11	2015	WEYMOUTH (1933)						
ENSAYO:	22	11	2015	FULLER (1907)						
REPORTE:	30	11	2015	SÁNCHEZ De G. (1996)						
				BOLOMEY (1947)						
RESULTADOS DE LABORATORIO										
Tamiz	Ag. Grueso	Ag. Fino	GRAVA	ARENA	Mezcla Final	TEORÍA GRANULOMETRÍAS CONTINUAS IDEALES PARA DISEÑO (TMN 1")				
Alterno	mm	RAP		67	43	% PASA	WEYMOUTH (1933)	FULLER (1907)	SÁNCHEZ De G. (1996)	BOLOMEY (1947)
1 1/2"	38.100	100%	100%	57%	43%	100%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1"	25.40	93.7%	100.0%	53%	43%	96%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/4"	19.05	85.6%	100.0%	49%	43%	92%	91.7%	81.6%	87.9%	86.0%
3/8"	9.53	28.3%	100.0%	16%	43%	59%	74.1%	61.2%	64.3%	59.0%
No. 4	4.75	13.5%	93.3%	7.7%	40%	48%	60.0%	43.3%	47.1%	40.1%
No. 8	2.36	8.5%	81.2%	4.8%	35%	40%	48.5%	30.6%	34.5%	26.7%
No. 16	1.18	4.4%	62.2%	2.5%	27%	29%	39.3%	21.6%	25.2%	17.2%
No. 30	0.600	2.1%	35.5%	1.2%	15%	16%	31.8%	15.3%	18.5%	10.5%
No. 50	0.300	1.6%	10.5%	0.9%	5%	5%	25.8%	10.8%	11.3%	5.7%
No. 100	0.150	1.3%	3.8%	0.7%	2%	2%	20.8%	7.7%	9.9%	2.4%

Figura 69. Reporte metodológico de dosificación final en agregados MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 25. Dosificación agregados y franjas metodológicas MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

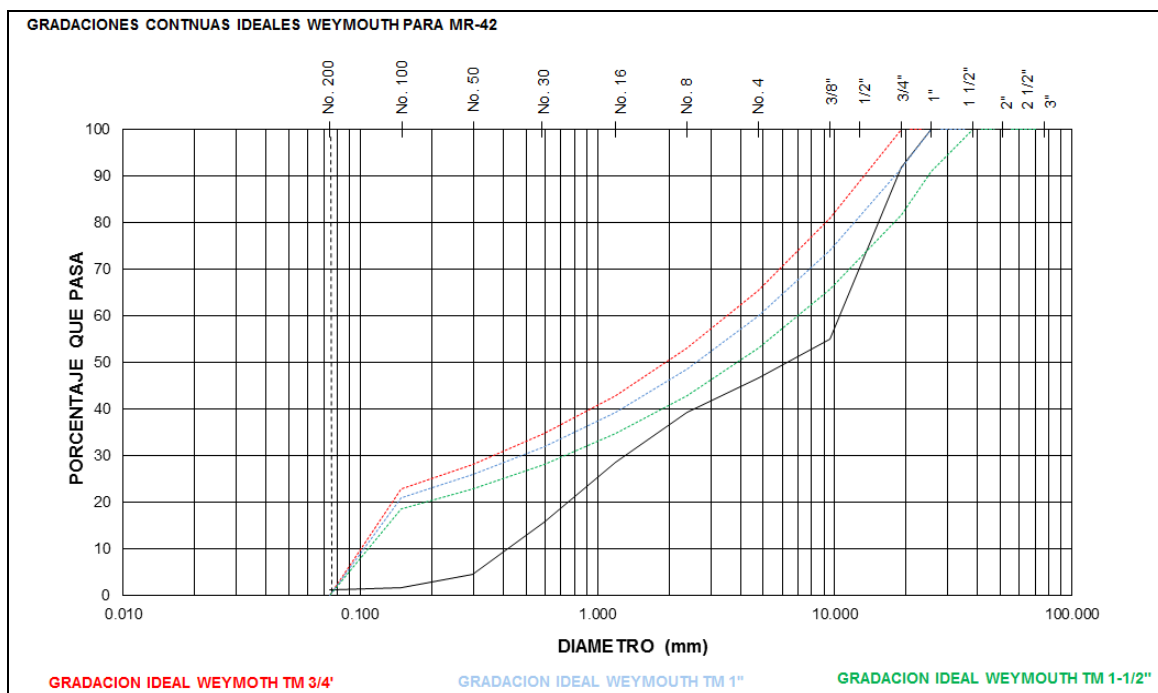
Figura 70. Verificación en teoría granulométrica “Fuller-Thompson” MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia



VERIFICACIÓN EN TEORÍA GRANULOMÉTRICA IDEAL "WEYMOUTH" - MR-42										
			Grueso V.		RAP		Fino V.			
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	57.0%	0.0%	100.0%	43.0%	
SUMA										
TAMAÑO		GRUPOS DE TAMAÑOS								MEZCLA GRUPOS
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal	3/8"	Subtotal	
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6	100.0	100.0	91.8
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0	100.0	100.0	55.0
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4	93.3	93.3	46.6
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4	81.2	81.2	39.1
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0	62.2	62.2	28.4
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7	35.5	35.5	15.6
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1	10.5	10.5	4.6
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0	3.8	3.8	1.6
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	2.7	1.2

MALLA	WEYMOUTH 3/4"	WEYMOUTH 1"	WEYMOUTH 1-1/2"	WEYMOUTH 2"	WEYMOUTH 3"
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	91.5
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	92.6	83.0
1"	100.0	100.0	91.0	83.9	74.9
3/4"	100.0	91.7	81.6	75.2	66.7
3/8"	81.0	74.1	65.6	60.1	53.0
No. 4	65.5	60.0	53.0	48.5	42.9
No. 8	53.0	48.5	42.9	39.4	34.8
No. 16	42.9	39.3	34.8	31.1	28.1
No. 30	34.8	31.8	28.1	25.8	22.8
No. 50	28.1	25.8	22.8	20.8	18.4
No. 100	22.8	20.8	18.4	16.9	14.9
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 71. Verificación en teoría granulométrica "Weymouth" MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

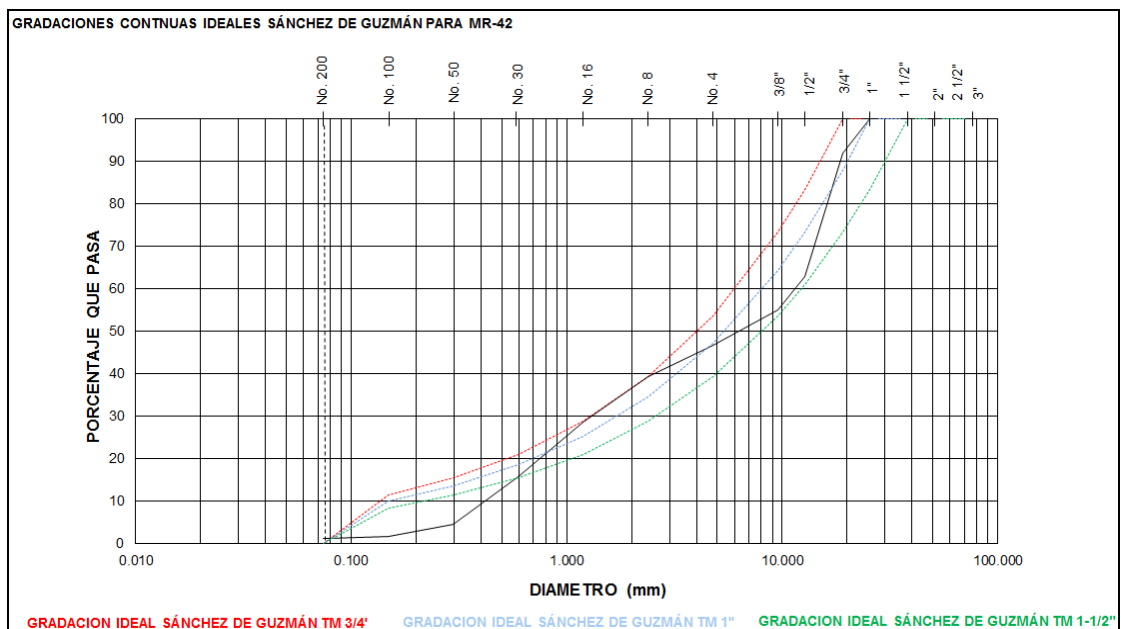


Gráfica 27. Gráficas continuas ideales "Weymouth" MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACION EN TEORIA GRANULOMETRICA IDEAL "SANCHEZ DE GUZMAN" - MR-42											
				Grueso V.	RAP			Fino V.			
% COMBINACIÓN	0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	57.0%	0.0%	100.0%	43.0%		
SUMA										100.0%	
TAMAÑO		GRUPOS DE TAMAÑOS								MEZCLA GRUPOS	
MALLA	DIAM.	2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal		3/8"		Subtotal
3"	76.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6		100.0	100.0	91.8
1/2"	12.7			0.0	21.4	89.0	34.9		100.0	100.0	62.9
3/8"	9.51			0.0	6.5	78.9	21.0		100.0	100.0	55.0
No. 4	4.76			0.0	0.6	54.4	11.4		93.3	93.3	46.6
No. 8	2.38			0.0	0.6	34.4	7.4		81.2	81.2	39.1
No. 16	1.19			0.0	0.0	14.8	3.0		62.2	62.2	28.4
No. 30	0.60			0.0	0.0	3.3	0.7		35.5	35.5	15.6
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1		10.5	10.5	4.6
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0		3.8	3.8	1.6
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0		2.7	2.7	1.2

MALLA	SDG	SDG	SDG	SDG	SDG
	3/4"	1"	1-1/2"	2"	3"
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	81.3
1-1/2"	100.0	100.0	100.0	87.9	73.2
1"	100.0	100.0	83.3	73.2	61.8
3/4"	100.0	87.9	73.2	64.3	53.6
1/2"	83.3	73.2	61.0	53.6	44.7
3/8"	73.2	64.3	53.6	47.1	39.2
No. 4	53.6	47.1	39.2	34.5	28.7
No. 8	39.3	34.5	28.7	25.2	21.0
No. 16	28.7	25.2	21.0	18.5	15.4
No. 30	21.0	18.5	15.4	13.5	11.3
No. 50	15.4	13.5	11.3	9.9	8.2
No. 100	11.3	9.9	8.3	7.3	6.0
No. 200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 72. Verificación en teoría granulométrica "Sánchez D. G." MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia



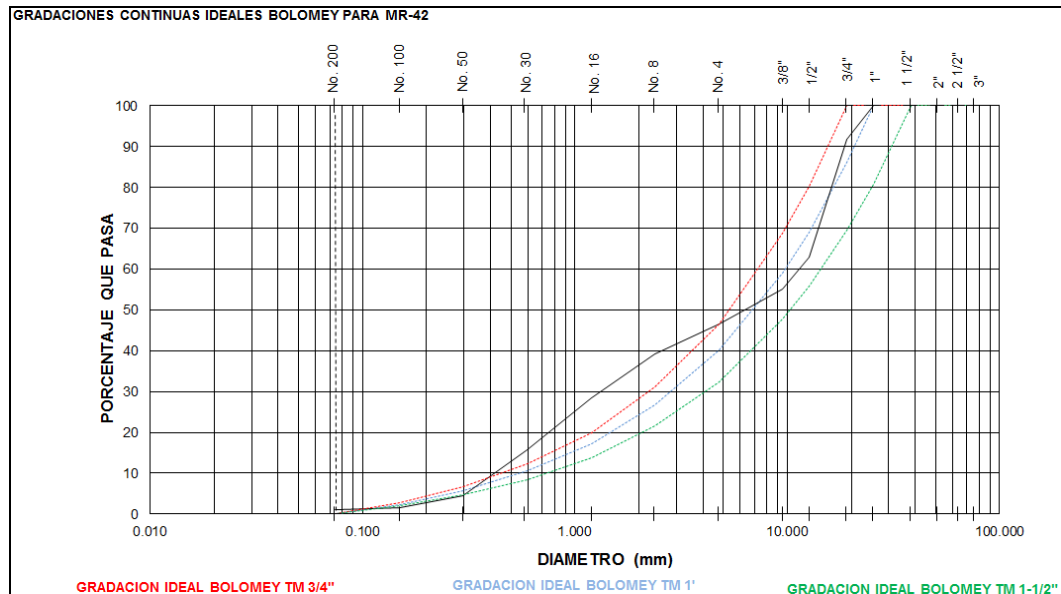
Gráfica 28. Gráficas continuas ideales "Sánchez D. G." MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

VERIFICACION EN TEORIA GRANULOMETRICA IDEAL "BOLOMEY" - MR-42												
VALORES DE "f" PARA EL CÁLCULO DE LA GRADACIÓN IDEAL												
FORMA	MEZCLA	Seca			Normal			Húmeda			f =	13
		8 - 8			10			12				
		8 - 10			12 - 14			14 - 16				
			C			N						
% COMBINACIÓN		0.0%	0.0%	0.0%	Grueso V.		RAP				Fino V.	
					80.0%		20.0%		57.0%		0.0%	43.0%
SUMA												
GRUPOS DE TAMAÑOS												
TAMAÑO		2"	1-1/2"	Subtotal	1"	1"	Subtotal	3/8"	Subtotal	MEZCLA GRUPO		
MALLA	DIAM.											
3"	76.2			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
2-1/2"	63.5			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
2"	50.8			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
1-1/2"	38.1			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
1"	25.4			0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
3/4"	19.1			0.0	82.2	99.3	85.6	100.0	100.0	100.0	91.8	
1/2"	12.7			0.0	21.4	89.0	34.9	100.0	100.0	100.0	62.9	
3/8"	9.510			0.0	6.5	78.9	21.0	100.0	100.0	100.0	55.0	
No. 4	4.760			0.0	0.6	54.4	11.4	93.3	93.3	46.6		
No. 8	2.380			0.0	0.6	34.4	7.4	81.2	81.2	39.1		
No. 16	1.190			0.0	0.0	14.8	3.0	62.2	62.2	28.4		
No. 30	0.595			0.0	0.0	3.3	0.7	35.5	35.5	15.6		
No. 50	0.297			0.0	0.0	0.5	0.1	10.5	10.5	4.6		
No. 100	0.149			0.0	0.0	0.1	0.0	3.8	3.8	1.6		
No. 200	0.074			0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	2.7	1.2		

P = f + (100 - f) * (d / D) ^ 0.5					
BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY
3"	2"	1-1/2"	1"	3/4"	
76.2	50.8	38.1	25.4	19.1	
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2-1/2"	92.4	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	84.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1-1/2"	74.5	88.3	100.0	100.0	100.0
1"	63.2	74.5	84.0	100.0	100.0
3/4"	56.6	66.3	74.6	88.4	100.0
1/2"	48.5	56.5	63.2	74.5	83.9
3/8"	43.7	50.6	56.5	66.2	74.4
No. 4	34.7	39.6	43.8	50.7	56.4
No. 8	28.4	31.8	34.7	39.6	43.7
No. 16	23.9	26.3	28.4	31.8	34.7
No. 30	20.7	22.4	23.9	26.3	28.4
No. 50	18.4	19.7	20.7	22.4	23.8
No. 100	16.8	17.7	18.4	19.7	20.7
No. 200					

GRADACIONES CORREGIDAS PARA QUE LA FRACCIÓN DE ARENA TENGA UN 6% QUE PASE POR MALLA No. 100					
BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY	BOLOMEY
3"	2"	1-1/2"	1"	3/4"	
76.2	50.8	38.1	25.4	19.1	
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
91.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
81.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
69.8	86.1	100.0	100.0	100.0	100.0
56.4	69.6	80.8	100.0	100.0	100.0
48.5	59.8	69.5	86.0	100.0	100.0
38.9	48.0	55.8	69.0	80.3	100.0
33.3	41.0	47.7	59.0	68.6	100.0
22.6	27.9	32.4	40.1	46.6	100.0
15.0	18.5	21.5	26.7	31.0	100.0
9.7	12.0	13.9	17.2	20.0	100.0
5.9	7.3	8.5	10.5	12.2	100.0
3.2	4.0	4.6	5.7	6.7	100.0
1.4	1.7	1.9	2.4	2.8	100.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0

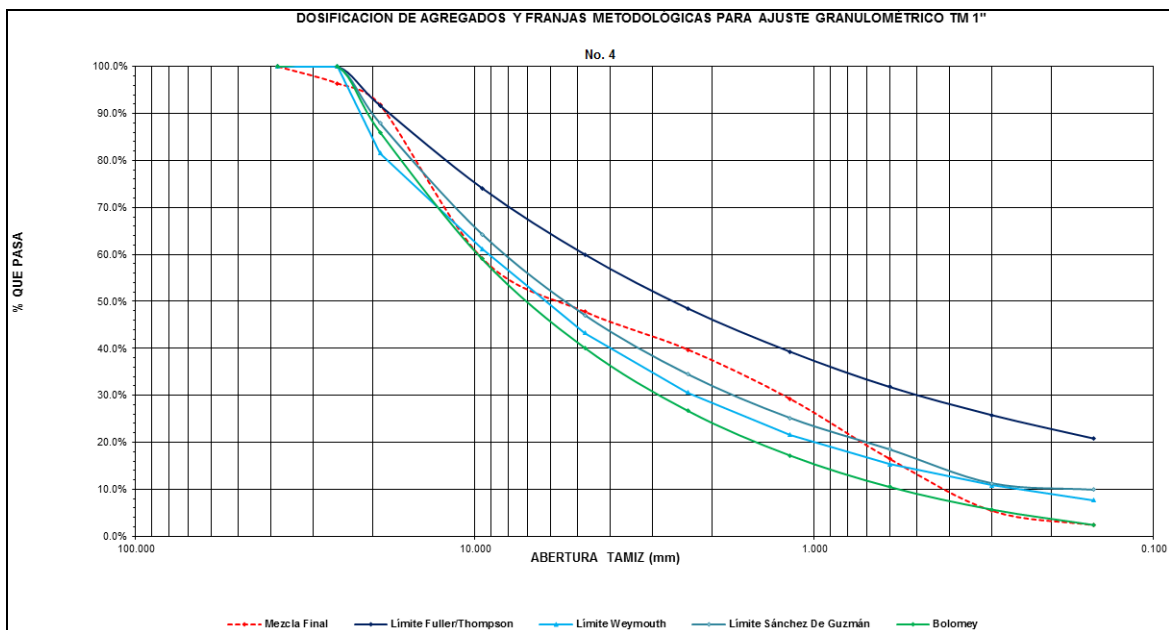
Figura 73. Verificación en teoría granulométrica "Bolomey" MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 29. Gráficas continuas ideales "Bolomey" MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

DISEÑO MEZCLA HIDRAULICA TIPO MR-42 CON ADICION DE RAP										
REPORTE METODOLÓGICO DE DOSIFICACION FINAL EN AGREGADOS										
PROYECTO:	Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.									
MATERIAL:	Agregado Virgen Grueso TMN 1" (80%) + RAP (20%)					GRAVA				
	Agregado Virgen Fino (100%)					ARENA				
FUENTE:	Río Chicamocha - Pescadero									
FECHA:	DD	MM	AA	Gradación Metodológica						
RECEPCIÓN:	10	11	2015	WEYMOUTH (1933)						
ENSAYO:	22	11	2015	FULLER (1907)						
REPORTE:	30	11	2015	SÁNCHEZ De G. (1996)						
	BOLOMEY (1947)									
RESULTADOS DE LABORATORIO										
Tamiz	Ag. Grueso	Ag. Fino	GRAVA	ARENA	Mezcla Final	TEORÍA GRANULOMETRÍAS CONTINUAS IDEALES PARA DISEÑO (TMN 1")				
Alterno	mm	RAP		57	43	% PASA	WEYMOUTH (1933)	FULLER (1907)	SÁNCHEZ De G. (1996)	BOLOMEY (1947)
1 1/2"	38.100	100%	100%	57%	43%	100%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1"	25.40	93.7%	100.0%	53%	43%	96%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/4"	19.05	85.6%	100.0%	49%	43%	92%	91.7%	81.6%	87.9%	86.0%
3/8"	9.53	28.3%	100.0%	16%	43%	59%	74.1%	61.2%	64.3%	59.0%
No. 4	4.75	13.5%	93.3%	7.7%	40%	48%	60.0%	43.3%	47.1%	40.1%
No. 8	2.36	8.5%	81.2%	4.8%	35%	40%	48.5%	30.6%	34.5%	26.7%
No. 16	1.18	4.4%	62.2%	2.5%	27%	29%	39.3%	21.6%	25.2%	17.2%
No. 30	0.600	2.1%	35.5%	1.2%	15%	16%	31.8%	15.3%	18.5%	10.5%
No. 50	0.300	1.6%	10.5%	0.9%	5%	5%	25.8%	10.8%	11.3%	5.7%
No. 100	0.150	1.3%	3.8%	0.7%	2%	2%	20.8%	7.7%	9.9%	2.4%

Figura 74. Reporte metodológico de dosificación final en agregados MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 30. Dosificación agregados y franjas metodológicas MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

- Contenido de agua de mezclado: Se tomó en 165 Kg/m^3 para el MR-3.8 MPa y 193 Kg/m^3 para el MR-4.0 y 4.2 MPa respectivamente) teniendo como recomendación las directrices mostradas en la Figura 76.

Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregados, con partículas de *forma angular y textura rugosa* en concreto, sin aire incluido.

Tabla 11.5 Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado (a)

Tamaño máximo nominal del agregado mm pulg.		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
		Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9.51	3/8	3.0	4.5	6.0	7.5
12.7	1/2	2.5	4.0	5.5	7.0
19.0	3/4	2.0	3.5	5.0	6.0
25.4	1	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	1 1/2	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3	0.3	1.5	3.5	4.5
152.0	6	0.2	1.0	3.0	4.0

Figura 75. (Tabla 11.5). Contenido de aire en el concreto
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero.
Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0
Colombia

Tabla 11.9 Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto con aire incluido (11.8)

Asentamiento mm pulg.		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51 3/4"	12.7 1/2"	19.0 3/4"	25.4 1"	38.1 1 1/2"	50.8 2"	64.0 2 1/2"	76.1 3"
		Agua de mezclado, en Kg/m ³ de concreto							
0	0	198	176	166	152	143	132	130	122
25	1	206	183	174	158	149	138	136	128
50	2	211	189	179	164	155	144	142	134
75	3	216	193	183	169	159	149	146	138
100	4	219	196	186	172	163	152	150	141
125	5	222	200	190	176	167	156	153	144
150	6	226	205	194	180	171	161	157	148
175	7	230	210	199	185	177	166	162	153
200	8	235	215	204	190	182	171	168	158

Figura 76. (Tabla 11.9). Agua de mezclado para agregado angular/rugoso
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero.
Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0
Colombia

- Resistencia de diseño: Los valores están establecidos según requisitos normativos mostrados en la Figura 6 para resistencia a la flexotracción.
- Relación A/C: Parámetro de inicio establecido por la normatividad INVÍAS-2013 en la Tabla 500-6 del Artículo 500 – Véase igualmente Figura 6.

- Contenido de cemento: Teniendo en cuenta la relación (A/C) y el volumen de agua, se obtuvo dicho parámetro aplicando la Ecuación 9. Para las mezclas consideradas y utilizando cemento tipo III “ART”, los valores establecidos estuvieron en 350 Kg/m³ para el MR-3.8 MPa, 370 Kg/m³ para el MR-4.0 MPa y 390 Kg/m³ para el MR-4.2 MPa respectivamente. También se tuvo en cuenta requisito de la Figura 6.

$$C = \frac{A}{(A/C)}; \quad (1)$$

C : Contenido de cemento, en $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

A : Requerimiento de agua de mezclado en $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (valor constante para todas las mezclas)

Ecuación 9. Determinación del contenido de cemento

Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

- Volumen de los agregados: Los diseños se realizan para (1 m³) de concreto, por lo tanto se deben conocer los volúmenes de agua, cemento y aire contenidos en las mezclas para obtener el volumen de los agregados, como el faltante para completar la unidad o metro cúbico.

Para este caso, los valores fueron calculados en (MR-3.8 MPa; Grava combinada: 970 m³/m³ y arena vírgen 878 m³/m³ – MR-4.0 MPa; Grava combinada: 1025 m³/m³ y arena vírgen 798 m³/m³ – MR-4.2 MPa; Grava combinada: 1011 m³/m³ y arena vírgen 794 m³/m³ respectivamente).

- Estimación del contenido de agregado grueso: El volumen absoluto del agregado grueso por volumen unitario de concreto se obtiene multiplicando el volumen seco y compactado por la relación entre la masa unitaria compacta y la densidad aparente seca del agregado – Véase Ecuación 10 y Figura 77.
- Ajuste por humedad de los agregados: Los agregados presentaron cierto nivel de porosidad reflejado en su porcentaje de absorción en donde el agua de mezclado puede ser absorbida dentro del cuerpo de las partículas. Del mismo modo, la superficie de las partículas también puede retener agua formando una película de humedad.

$$b = \left(\frac{b'}{b_0} \right) * b_0 ; \quad (3)$$

b : Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen de concreto
 b_0 : Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen compactado de agregado grueso

$\frac{b'}{b_0}$: Volumen compactado de agregado grueso, por unidad de volumen de concreto (Guzman, 1987); y,

$$b_0 = \frac{MAC}{DAS} ; \quad (4)$$

MAC : Masa unitaria compacta
 DAS : Densidad aparente seca

Ecuación 10. Determinación del contenido de agregado grueso
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero.
Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0
Colombia

Tabla 11.15 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto (11.2)					
Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena (b)					
Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
mm	pulg	2.40	2.60	2.80	3.00
9.51	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7	1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4	1	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1 1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3	0.82	0.80	0.78	0.76
152.0	6	0.87	0.85	0.83	0.81

(a) Los volúmenes están basados en agregados secos y compactos con varilla, como se describe en la norma A.S.T.M. C-29. Estos volúmenes se han seleccionado de relaciones empíricas para producir un concreto con un grado de manejabilidad apropiado para la construcción reforzada usual. Para obtener un concreto con menos trabajabilidad como el que se utiliza en la construcción de pavimentos de concreto, éstos valores se pueden aumentar en un 10%. Para concreto con más trabajabilidad como el que algunas veces se requiere cuando la colocación se efectúa por bombeo, estos valores se pueden reducir hasta en un 10%.

(b) El módulo de finura de la arena es igual a la suma de las relaciones (acumulativas) retenidas en tamices de malla con aberturas de 0,149, 0,297, 0,595, 1,19, 2,38 y 4,76 mm.

Figura 77. (Tabla 11.15). Vol. agregado grueso por Vol. unitario concreto
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero.
Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0
Colombia

En este caso, el RAP proporciona algunas ventajas respecto a esta variable, pero el agregado pétreo virgen fino – arena, no. Las correcciones practicadas quedaron en MR-3.8 MPa; 150 Kg/m³ de agua, 980 Kg/m³ de grava combinada y 898 Kg/m³ arena - MR-4.0 MPa; 158 Kg/m³ de agua, 1023 Kg/m³ de grava combinada y 765 Kg/m³ arena - MR-4.2 MPa; 159 Kg/m³ de agua, 1009 Kg/m³ de grava combinada, 762 Kg/m³ arena -, respectivamente.

En las Figuras 78 a 80, así como en el Anexo C, se muestran los reportes de diseño correspondientes a la validación de las mezclas de hormigón para pavimento de concreto hidráulico con adición de RAP a la flexotracción.

6.3.3.2. Complemento ACI-211 / Guía Ing. Fernando Sánchez Sabogal²⁷

Según el autor, una mezcla típica de concreto para pavimento está compuesta por un (60-75%) de volumen de agregados y un (25-40%) de volumen de pasta (Cemento, agua y aire).

DISEÑO MEZCLA HIDRAULICA TIPO MR-38 CON ADICION DE RAP						
REPORTE DEL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO						
PROYECTO:	Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.					
AGREGADOS:	Agregado Virgen Grueso TMN 1" (80%) + RAP (20%)			GRAVA COMBINADA		
	Agregado Virgen Fino (100%)			ARENA		
FUENTE:	Río Chicamocha - Pescadero					
TIPO CEMENTO:	Concretero (ART) Cemex Cementos de Colombia S.A.					
FECHA:		DD	MM	AA		
RECEPCIÓN:		10	11	2015		
ENSAYO:		02	12	2015		
REPORTE:		05	12	2015		
Resistencia Diseño F'c	28 días	4,500	PSI			
Resistencia Diseño MR	28 días	38	Kg/cm ²			
CONDICIONES DE COLOCACIÓN DEL HORMIGÓN						
Descripción		Unidades	Resultado			
ASENTAMIENTO		Cm	7.5			
TMN. DEL AGREGADO (TM)		Pulg	1"			
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		PSI	4,500			
COEFICIENTE DE VARIACION			10			
RELACION A/C			0.47			
TEMPERATURA MAXIMA DE CONTROL		° C	32			
CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS						
Descripción		Unidades	GRAVA	ARENA	CEMENTO	AGUA
DOSIFICACIÓN EN PESO		%	60	40		
PESO ESPECÍFICO		Kg/m ³	2,662	2,618	3,100	1,000
% ABSORCIÓN		%	0.8%	0.7%		
% HUMEDAD		%	1.0%	2.5%		
PESO UNITARIO SUELTO		Kg/m ³	1,499	1,517	1,000	
DOSIFICACIÓN POR (M ³)						
Descripción		Peso (Kg/m ³)	D.A. (Gr/cm ³)	Volumen	Corrección*ω	
CEMENTO PORTLAND		350	3,100	0.11	340	
AIRE		0	0	0.01	0	
AGUA		165	1000	0.17	150	
GRAVA		970	2737	0.35	980	
ARENA		878	2618	0.34	898	
SUMA TEÓRICA		2,363		1	2,368	
PROPORCIONES INICIALES						
Materiales		Peso	Proporciones	Volumen Suelto	Pesos	Proporciones
		Kg/m ³	en Peso	Kg/m ³	Corrección*ω	Volumen Suelto
CEMENTO		350	1.00	0.113	340.0	1.0
AGREGADO FINO		878	2.51	0.592	898.0	2.6
AGREGADO GRUESO		970	2.77	0.654	980.0	2.9

MPa = 10.2 kg/cm²

Resistencia a los 28 días
Cilindros curados húmedos

Resistencia a compresión, kg/cm²

Resistencia a compresión, lb/in²

Relación agua-cemento

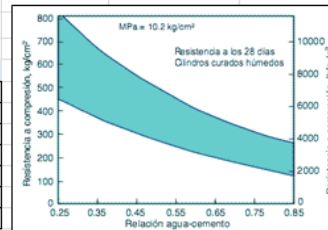


Figura 78. Reporte del diseño de mezclas de concreto – MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

²⁷ Sánchez S., F. (2002). Curso básico de diseño de mezclas de concreto hidráulico para pavimentos. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Colombia

La metodología es casi idéntica a la referenciada por el Comité ACI-211, diferenciándose especialmente en la “selección del asentamiento para el diseño de hormigones en pavimento de concreto hidráulicos” – Véase Figuras 81 a 84. Los resultados finales, igualmente obedecen a las modelaciones referidas en las Figuras 78 a 80 respectivamente.

6.4. Resultados en producto final (Resistencia a la flexotracción, compresión, módulos elásticos y tiempos de fraguado)

En el Anexo D, se muestran todos los resultados obtenidos en laboratorio, así como los parámetros estadísticos de control, correlaciones y resumen general objeto de las validaciones a compresión, flexotracción y módulos elásticos.

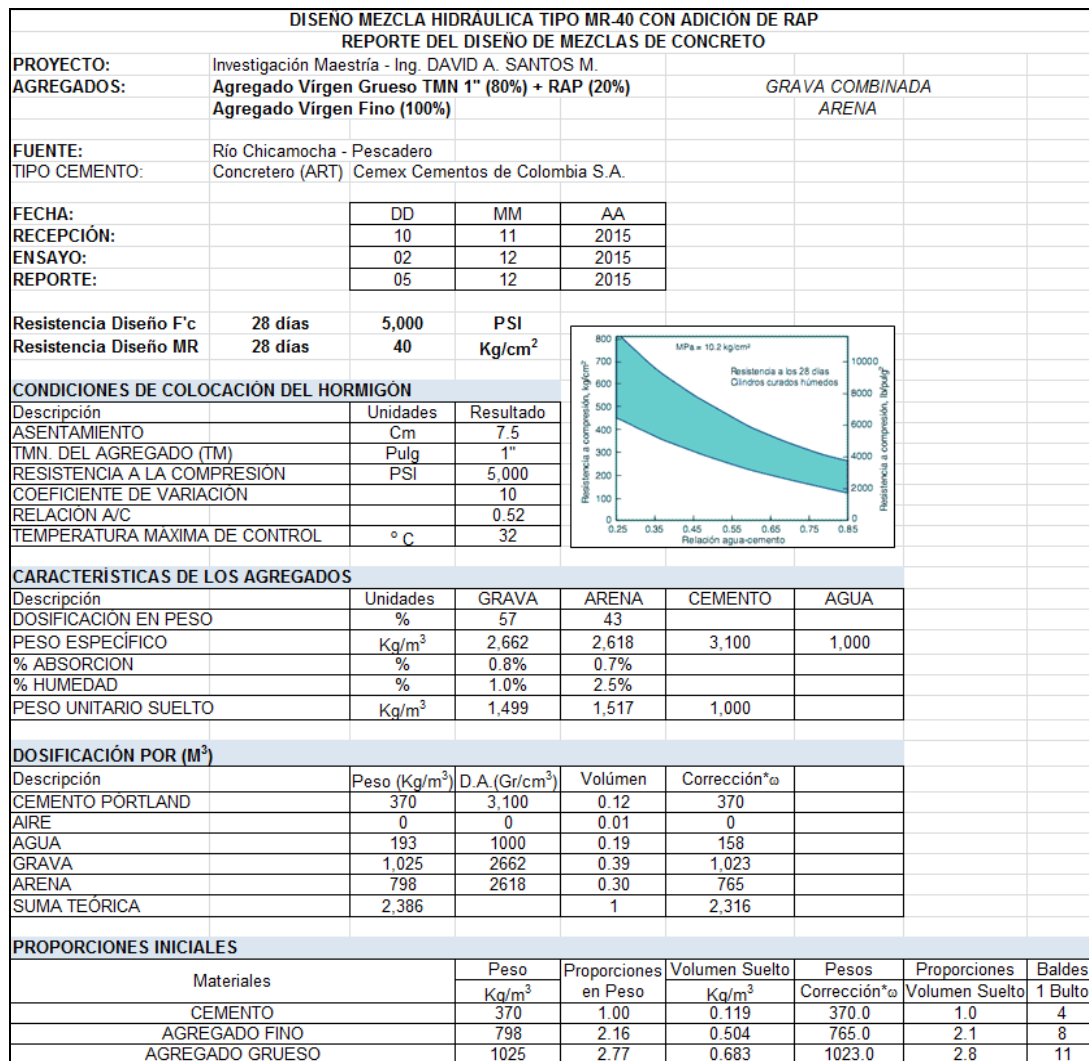
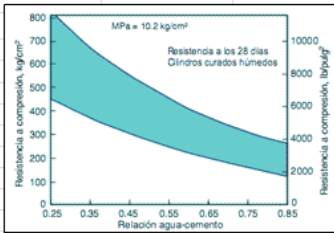


Figura 79. Reporte del diseño de mezclas de concreto – MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

DISEÑO MEZCLA HIDRAULICA TIPO MR-42 CON ADICION DE RAP						
REPORTE DEL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO						
PROYECTO:	Investigación Maestría - Ing. DAVID A. SANTOS M.					
AGREGADOS:	Agregado Virgen Grueso TMN 1" (80%) + RAP (20%)				GRAVA COMBINADA	
	Agregado Virgen Fino (100%)				ARENA	
FUENTE:	Río Chicamocha - Pescadero					
TIPO CEMENTO:	Concretero (ART) Cemex Cementos de Colombia S.A.					
FECHA:		DD	MM	AA		
RECEPCIÓN:		10	11	2015		
ENSAYO:		02	12	2015		
REPORTE:		05	12	2015		
Resistencia Diseño F'c	28 días	5,500	PSI			
Resistencia Diseño MR	28 días	42	Kg/cm ²			
CONDICIONES DE COLOCACIÓN DEL HORMIGÓN						
Descripción		Unidades	Resultado			
ASENTAMIENTO		Cm	7.5			
TMN. DEL AGREGADO (TM)		Pulg	1"			
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		PSI	5,500			
COEFICIENTE DE VARIACIÓN			10			
RELACION A/C			0.49			
TEMPERATURA MAXIMA DE CONTROL		° C	32			
						
CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS						
Descripción		Unidades	GRAVA	ARENA	CEMENTO	AGUA
DOSIFICACIÓN EN PESO		%	57	43		
PESO ESPECÍFICO		Kg/m ³	2,662	2,618	3,100	1,000
% ABSORCION		%	0.8%	0.7%		
% HUMEDAD		%	1.0%	2.5%		
PESO UNITARIO SUELTO		Kg/m ³	1,499	1,517	1,000	
DOSIFICACIÓN POR (M³)						
Descripción		Peso (Kg/m³)	D.A. (Gr/cm³)	Volúmen	Corrección*ω	
CEMENTO PÓRTLAND		390	3,100	0.13	390	
AIRE		0	0	0.01	0	
AGUA		193	1000	0.19	159	
GRAVA		1,011	2662	0.38	1,009	
ARENA		794	2618	0.30	762	
SUMA TEÓRICA		2,388		1	2,320	
PROPORCIONES INICIALES						
Materiales		Peso	Proporciones	Volumen Suelto	Pesos	Proporciones
		Kg/m ³	en Peso	Kg/m ³	Corrección*ω	Volumen Suelto
CEMENTO		390	1.00	0.126	390.0	1.0
AGREGADO FINO		794	2.04	0.502	762.0	2.0
AGREGADO GRUESO		1011	2.59	0.673	1009.0	2.6
						1 Bulto
						8
						10

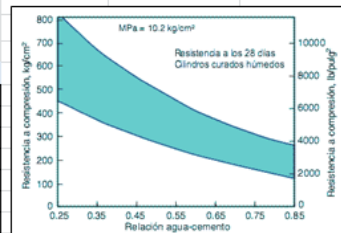


Figura 80. Reporte del diseño de mezclas de concreto – MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

1. Selección del asentamiento (slump)

—Se escoge de acuerdo con las características de la obra por construir

Tipo de construcción	Máximo Slump (mm)	Mínimo Slump (mm)
Fundaciones reforzadas	75	25
Fundaciones de concreto simple, caissons	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Construcciones voluminosas	75	25

2. Selección del tamaño máximo nominal del agregado

—Se recomienda que no sea mayor de 1/3 del espesor del pavimento por construir

3. Estimación del contenido de agua de la mezcla

—La cantidad de agua requerida depende del asentamiento deseado y del tamaño máximo nominal del agregado y teniendo en cuenta si el concreto se elaborará con aire incluido o no

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO*								
Agua aproximada en la mezcla (kg/m³) según el tamaño máximo nominal del agregado								
Slump (mm)	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Más de 175	-	-	-	-	-	-	-	-

* Existe una tabla similar para el caso de una mezcla de concreto con aire incluido

4. Determinación del volumen de aire atrapado en la mezcla

CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO								
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)								
Slump (mm)	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Todos	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

* Existe una tabla similar para el caso de una mezcla de concreto con aire incluido

5. Determinación de la resistencia de dosificación

—El diseño estructural del pavimento debe especificar, en la memoria de cálculo, una resistencia de diseño a la flexión o módulo de rotura (MRd)

—Debido a las variaciones que se producen en la elaboración, transporte, colocación, compactación y curado de la mezcla en obra, ésta debe ser dosificada para alcanzar una resistencia promedio ($\overline{MR}$) superior a la resistencia del diseño estructural del pavimento

Figura 81. Pasos 1 a 5 – Metodología de diseño Ing. Fernando Sánchez Sabogal
Fuente: Sánchez S., F. (2002). Curso básico de diseño de mezclas de concreto hidráulico para pavimentos. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Colombia

5. Determinación de la resistencia de dosificación (cont.)

—Si se dispone de suficientes datos estadísticos sobre las características de la mezcla y sobre los procedimientos de colocación y curado, el $\overline{MR}$ se estima con la expresión:

$$\overline{MR} = MRd + 0.842 * S_{MR} * C$$

Siendo:

S_{MR} = desviación estándar del módulo de rotura de la mezcla

C = coeficiente de modificación, que depende del número de resultados (n) con base en el cual se estableció S_{MR}

n	≥ 30	25	20	15
C	1.00	1.03	1.08	1.16

—Cuando no hay datos estadísticos sobre la calidad de la mezcla o se reconoce que su uniformidad es deficiente:

$$\overline{MR} = 1.25 * MRd$$

—Es recomendable hacer los cálculos con las dos expresiones y utilizar el menor valor obtenido de $\overline{MR}$

6. Determinación de la relación agua/cemento (A/C)

—Tanto la resistencia como la durabilidad del concreto dependen de esta relación

—Existen relaciones empíricas entre A/C y la resistencia a compresión del concreto a 28 días

—Debido a que las mezclas de concreto para pavimentos rígidos se diseñan a la flexión, es necesario emplear alguna correlación confiable entre estas dos resistencias

Relación entre A/C y la resistencia a compresión del concreto	
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	Relación A/C por peso (Concreto sin aire incluido)
40	0.42
35	0.47
30	0.54
25	0.61
20	0.69
15	0.79

* Existe una tabla similar para el caso de una mezcla de concreto con aire incluido

—La relación A/C determinada por resistencia debe ser verificada por durabilidad si la obra va a estar sometida a condiciones ambientales severas, debiendo escogerse la menor de las dos relaciones A/C obtenidas

Máxima relación A/C permisible para concretos bajo condiciones severas de exposición		
Tipo de estructura	Estructura expuesta continuamente al agua dulce y/o a ciclos de congelamiento y deshielo	Estructura expuesta al agua del mar o a sulfatos
Secciones delgadas y otras secciones que presenten una cobertura de concreto de menos de 25 mm sobre el acero de refuerzo	0.45	0.40
Todas las demás estructuras	0.50	0.45

Figura 82. Pasos 5 a 6 – Metodología de diseño Ing. Fernando Sánchez Sabogal
Fuente: Sánchez S., F. (2002). Curso básico de diseño de mezclas de concreto hidráulico para pavimentos. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Colombia

7. Cálculo de la cantidad requerida de cemento

—Se determina a partir de la cantidad de agua (paso 3) y de la relación A/C (paso 6)

$$\text{Cemento (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Agua (kg/m}^3\text{)}}{A/C}$$

$$\text{Cemento (m}^3\text{/m}^3\text{)} = \frac{\text{Cemento (kg/m}^3\text{)}}{3,150 \text{ (kg/m}^3\text{)}}$$

—Si se van a emplear adiciones puzolánicas o aditivos, se indica su cantidad, como porcentaje del peso del cemento, según las recomendaciones del proveedor

8. Cálculo de la cantidad de cada agregado

—Una tabla permite determinar el volumen de agregado grueso seco y apisonado (V_{agp}) por unidad de volumen de concreto, en función del tamaño máximo nominal y el módulo de finura del agregado fino

—Se entiende que los agregados grueso y fino cumplen las granulometrías indicadas en la norma ASTM C 33

Volumen de agregado grueso seco y apisonado por unidad de volumen de concreto (V_{agp})				
Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

—A partir del valor obtenido en la tabla se determina el volumen necesario de agregado grueso en la mezcla (V_{ag}):

$$V_{ag} = V_{agp} * \frac{\text{Peso unitario apisonado (kg/m}^3\text{)}}{\text{Peso específico aparente agregado grueso} * 1,000}$$

—Se calcula el peso del agregado grueso por unidad de volumen de mezcla (W_{ag}):

$$W_{ag} = V_{ag} * \text{peso específico aparente agregado grueso} * 1,000$$

—Se calcula el volumen de agregado fino por unidad de volumen de mezcla (V_{af}):

$$V_{af} = 1 - V_{ag} - V_{\text{cemento}} - V_{\text{agua}} - V_{\text{aire}}$$

—Se calcula el peso del agregado fino por unidad de volumen de mezcla (W_{af}):

$$W_{af} = V_{af} * \text{peso específico aparente agregado fino} * 1,000$$

Figura 83. Pasos 7 a 8 – Metodología de diseño Ing. Fernando Sánchez Sabogal
Fuente: Sánchez S., F. (2002). Curso básico de diseño de mezclas de concreto hidráulico para pavimentos. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Colombia

9. Ajuste de cantidades por humedad de los agregados

—Debido a que los cálculos se realizan suponiendo agregados secos y no absorbentes, la cantidad neta de agua y de agregados por incluir en la mezcla se debe ajustar en función de la humedad de éstos en el momento de la mezcla y de sus características de absorción

$$W_{ag} \text{ ajustado} = W_{ag} \times \left[1 + \frac{(\text{absorción}_{ag} - \text{humedad natural}_{ag})}{100} \right]$$

$$W_{af} \text{ ajustado} = W_{af} \times \left[1 + \frac{(\text{absorción}_{af} - \text{humedad natural}_{af})}{100} \right]$$

$$W_{agua} \text{ ajustado} = W_{agua} + (W_{ag} \text{ ajustado} - W_{ag}) + (W_{af} \text{ ajustado} - W_{af})$$

10. Determinación de las proporciones iniciales

—Se expresan las cantidades iniciales de cemento, agregado fino y agregado grueso de manera proporcional, tomando como referencia el peso del cemento:

$$(A/C) : 1 \text{ (cemento)} : AF : AG$$

Siendo:

$$AF = \frac{W_{af} (kg / m^3)}{W_{cemento} (kg / m^3)}$$

$$AG = \frac{W_{ag} (kg / m^3)}{W_{cemento} (kg / m^3)}$$

Figura 84. Pasos 9 a 10 – Metodología de diseño Ing. Fernando Sánchez Sabogal
Fuente: Sánchez S., F. (2002). Curso básico de diseño de mezclas de concreto hidráulico para pavimentos. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Colombia

En el Anexo D, se muestran todos los resultados obtenidos en laboratorio, así como los parámetros estadísticos de control, correlaciones y resumen general objeto de las validaciones a compresión, flexotracción y módulos elásticos.

Igualmente en el Anexo K - cuya referencia literaria se encuentra identificada en él -, se comparte la siguiente afirmación recuperada de la metodología de investigación así practicada:

“...Las investigaciones de correlación entre las resistencias de compresión y flexión, han llevado a concluir que el ensayo de compresión sería uno de los métodos más indicados para calificar la calidad del concreto por ser éste, un método más confiable, de menos incertidumbre...”.

El Dr. Shiraz Tayabji, es partidario de diseñar y utilizar el resultado de resistencia a la flexión, pero al mismo tiempo, controlan la resistencia a la compresión y tracción indirecta donde la dispersión de resultados es menor.

Es totalmente imprescindible la determinación del ensayo de módulo de rotura (MR), no solo porque así lo exigen las metodologías de diseño en pavimentos rígidos, sino que también, la mayoría de los autores en los que se basan dichas sistemáticas elevan a la máxima condición este requisito a la fatiga del hormigón teniendo en cuenta de manera adicional, su efecto por alabeo térmico – Véase Figura 85.

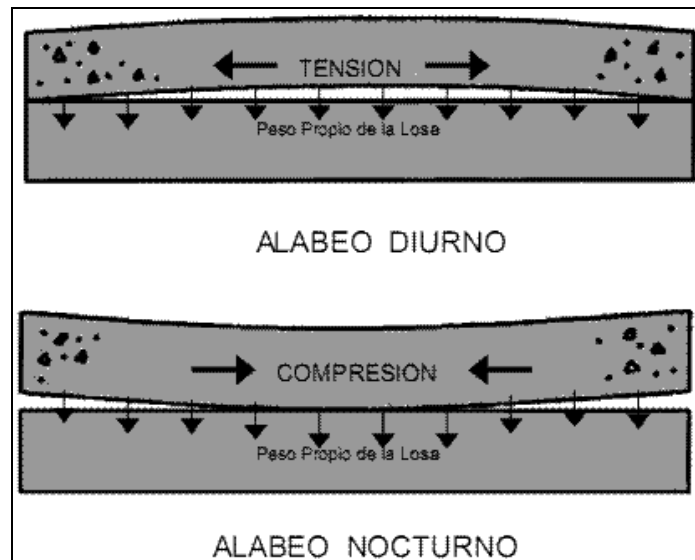


Figura 85. Alabeo térmico en paños de hormigón para pavimentos
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996). Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Bhandar Editores Ltda. (3^{era} Ed). ISBN No. 9587-9247-04-0 Colombia

Es igualmente claro que la relación (A/C), es aisladamente, el parámetro que en mayor grado determina o no la resistencia del hormigón en cualquiera de sus validaciones. También, el cociente (K) entre estas dos resistencias aumenta con el contenido y la categoría real del cemento; la granulometría y fracturación de los agregados, la naturaleza de las características superficiales, el tamaño máximo (TM) y la concentración volumétrica del árido; la humedad de curado en los especímenes, y de la oclusión voluntaria del aire y/o una compactación incompleta.

Para ello y como así se consideró en este proyecto de investigación, se muestra en la Figura 86, una de las correlaciones literarias de mayor uso para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico. Allí se determinó los cocientes (K) para cada categoría de mezcla hidráulica, cuyos resultados se muestra en el Anexo D.

Sobre las Figuras 87 a 101 y las Gráficas 31 a 33, se muestran en detalle todos los resultados ejecutados sobre una base estadística confiable en más de 210 cilindros y 120 viguetas falladas durante el período - Véase Figura 4.

También son mostradas las curvas de desarrollo obtenidas por resistencias, así como también el resumen comparativo de los módulos de elasticidad – Ver Gráficas 38 a 39 respectivamente. Sobre este último y como se justificó en el numeral 4.5.3, se tuvo en cuenta la ejecución normativa contemplada originalmente por la especificación NTC-4025/ASTM C 4697 e INVE-424 para el (40% de F'_c), y las directrices del *manual operativo* correspondiente al instrumento utilizado en laboratorio objeto de las mediciones practicadas (33% de F'_c).

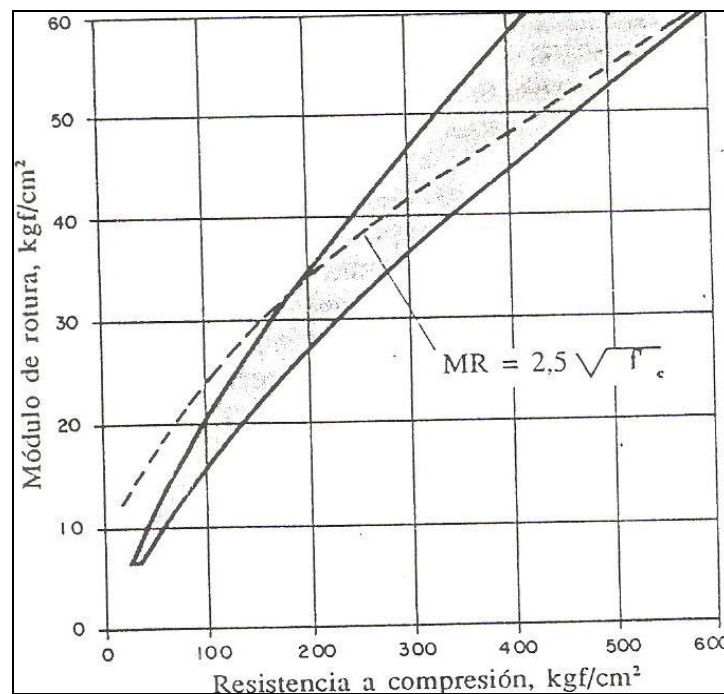


Figura 86. Correlación resistencia a la compresión (F'_c) y módulo de rotura (MR)
Fuente: ICPC (1999). Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Notas técnicas. Publicación 903. Número 10. Serie 4. Bogotá D.C. Colombia

De otro lado, en el Anexo H y las Gráficas 40 a 42, se muestran los informes de laboratorio correspondientes a la medición de tiempos de fraguado por medio de su resistencia a la penetración bajo enfoque normativo NTC-890. Dentro del análisis de resultados a los valores encontrados, podemos concluir varios aspectos fundamentales:

- La resistencia a la flexotracción, así como la medida del porcentaje de desarrollo en las tres mezclas de diseño se obtuvieron 100% a los 14 días de edad en promedio.

Lo anterior se encuentra fundamentado en la buena seleccion de la relacion (A/C), utilizacion particular del cemento (ART – Tipo III), excelente fracturacion y seleccion adecuada en el tamaño máximo (TM) y máximo nominal (TMN) del *agregado grueso combinado*, como también en la calidad final de los agregados pétreos vírgenes de la fuente “Pescadero”.

De igual manera, estos resultados son obtenidos a nivel de estudio en laboratorio, que podrán ser ajustados tanto técnica, como economicamente para el caso de una produccion real.

- Todos los tipos de falla evidenciados en la rotura de cilindros y como se puede apreciar ejemplarmente en el Anexo N, fueron de tipo 3 y 4, característica impartida de manera muy particular para la nomenclatura 3 (Fractura acolumnada) por el hecho de haber utilizado agregado de tipo reciclado. La otra – 4 - (Fractura diagonal), se encontro dentro del comportamiento esperado en la falla de un concreto estructural.
- Los coeficientes de variacion – *que es con lo que realmente se valida la capacidad y calidad final de un proceso* -, dejaron evidenciar a nivel de operacion en muestreo de laboratorio sobre test de producto final para las mezclas diseñadas, cifras que jamás superaron una tasa del (4%), razon por la cual se califica la dispersion entre testigos como de “Bueno, muy bueno y excelente” según interpretacion sobre los requisitos considerados por el “Reglamento ACI-318”.
- Es predecible que a medida que aumenta la resistencia a la compresion del concreto aumenta también su resistencia a la flexion. Esta correlacion entre estos dos ensayos se presenta no de una forma lineal sino más bien de tipo parabolica – Véase Figura 86, es decir, al aumentar la resistencia a la compresion, la resistencia a la flexion también aumenta pero en menor proporcion. Además, cabe mencionar que el modulo de rotura (MR) tuvo valores que van entre un 10% y un 20% de la resistencia a la compresion (f'_c) – Véase Anexo C.

De otro lado, puede darse una correlacion aproximada entre ambos valores de resistencia, la cual es sugerida por el “Comité Europeo del Concreto” mediante la siguiente formulacion – Véase Ecuacion 11.

$$MR = K \sqrt{f'c}$$

Ecuación 11. Correlación (MR) Vs. ($F'c$)
Fuente: Comité Europeo del Concreto

En donde:

MR= Modulo de rotura del concreto en (Kg/cm²)

F_c'= Resistencia a la compresion en (Kg/cm²)

K= Valor que varía entre 2.1 y 2.7 – (El Comité Europeo recomienda 2.5 y el Instituto Americano del Concreto – ACI lo lleva a considerar en 3.0). Ante ello, es que la cifra mostrada en la Figura 86 (2.5), ha sido recomendada por el “Instituto Colombiano de Productores de Cemento – ICPC” a lo largo de sus investigaciones y estudios de validacion en obra a nivel nacional en proyectos de infraestructura vial, y en la calidad a los cementos ofrecidos. Esto no quiere decir que sea de obligatorio cumplimiento, precisamente generando espacio para que investigaciones y trabajos operativos en obras sean directamente evaluados.

También se ha encontrado que existe una buena correlacion entre el modulo de rotura (MR) y la resistencia a la traccion indirecta (F_{ti}'), la cual es independiente de la edad y del tipo de agregado válido para cualquier mezcla. La investigacion no genero alcance a esta validacion debido a que ni en el laboratorio de la organización auspiciadora, como en el de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA – UPB Seccional Bucaramanga, se tenía el adaptador para las prensas hidráulicas.

En el trabajo de investigacion desarrollado y como lo muestran las Figuras 89, 94 y 99, los valores obtenidos estuvieron entre (2.2<=K<=2.3). Estas cifras obedecen muy particularmente a la intervencion del agregado reciclado RAP como *grava* en insumo *combinado*.

- En la Gráfica 34, se deja entrever la homogeneidad y logica aritmética-estadística en la obtencion de las curvas de desarrollo para la medida a la flexotraccion por categoría de mezcla hidráulica. Sin embargo, existio un pequeño desfase en la medida de la resistencia a la compresion del concreto de menor valor (MR-3.8 MPa); lo anterior debido y de manera logica a esperar, en que dicha mezcla fue diseñada con una combinacion granulométrica teorica en frío (60% *grava combinada* + 40% *arena vírgen*), y para los (MR-4.0 y 4.2 MPa) fueron en (57% *grava combinada* + 43% *arena vírgen*), y allí es en donde la rotura de cilindros fue reconocida por la mayor participacion del agregado grueso combinado en participacion recíproca con la utilizacion del RAP.
- Para los modulos de elasticidad, se tomaron con base parte de las formulaciones utilizadas por la literatura especializada y en algunos reglamentos nacionales e internacionales – Véase Figuras 105 a 106 respectivamente.

Dentro de ellos podemos mencionar la “Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO-1993”, el “Manual para el diseño de pavimentos rígidos en vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito ICPC-INVÍAS-2008”, el “Reglamento sismo-resistente NSR-2010”, el “Codigo colombiano de diseño sísmico de puentes – CCDSP-2014” y las “Guías internacionales AASHTO LRFD – ACI-318 – Collins” – Véase Figuras 102 a 104 respectivamente.

La iteración del pavimento se realizó con los valores de modulo de elasticidad al $(40\% \cdot F'c)$ – Véase Tabla 5, Figuras 102 a 104 y Gráficas 35 a 39. El intervalo en el que se mantuvo la elasticidad fue entre $(200.000 \text{ y } 260.000 \text{ Kg/cm}^2 = 2.86\text{E}+06 \text{ y } 3.71\text{E}+06 \text{ PSI})$.

Finalmente en la Tablas 6 y 7, se muestran los valores porcentuales por correlación entre la resistencia a la compresión ($F'c$) – modulo elástico (ME) y el modulo de rotura (MR) – resistencia a la compresión ($F'c$).

Resistencia a Flexión MR- 38					
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
11/03/2016	18/03/2016	7	23.181	30.29	80%
11/03/2016	18/03/2016	7	24.871	32.50	86%
11/03/2016	08/04/2016	28	31.456	41.10	108%
11/03/2016	08/04/2016	28	31.771	41.51	109%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
16/03/2016	23/03/2016	7	24.781	32.38	85%
16/03/2016	23/03/2016	7	23.764	31.05	82%
16/03/2016	13/04/2016	28	31.894	41.67	110%
16/03/2016	13/04/2016	28	31.936	41.73	110%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
19/03/2016	26/03/2016	7	26.711	34.90	92%
19/03/2016	26/03/2016	7	27.233	35.58	94%
19/03/2016	16/04/2016	28	31.562	41.24	109%
19/03/2016	16/04/2016	28	31.567	41.25	109%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
23/03/2016	30/03/2016	7	28.123	36.75	97%
23/03/2016	30/03/2016	7	27.987	36.57	96%
23/03/2016	20/04/2016	28	30.496	39.85	105%
23/03/2016	20/04/2016	28	30.386	39.70	104%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
26/03/2016	02/04/2016	7	26.157	34.18	90%
26/03/2016	02/04/2016	7	26.345	34.42	91%
26/03/2016	23/04/2016	28	30.169	39.42	104%
26/03/2016	23/04/2016	28	30.971	40.47	106%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
31/03/2016	07/04/2016	7	26.563	34.71	91%
31/03/2016	07/04/2016	7	26.103	34.11	90%
31/03/2016	28/04/2016	28	31.765	41.51	109%
31/03/2016	28/04/2016	28	31.956	41.75	110%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
07/04/2016	14/04/2016	7	24.678	32.25	85%
07/04/2016	14/04/2016	7	23.987	31.34	82%
07/04/2016	05/05/2016	28	30.563	39.93	105%
07/04/2016	05/05/2016	28	30.876	40.34	106%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
14/04/2016	21/04/2016	7	26.365	34.45	91%
14/04/2016	21/04/2016	7	27.156	35.48	93%
14/04/2016	12/05/2016	28	31.756	41.49	109%
14/04/2016	12/05/2016	28	31.298	40.90	108%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
22/04/2016	29/04/2016	7	23.478	30.68	81%
22/04/2016	29/04/2016	7	24.125	31.52	83%
22/04/2016	20/05/2016	28	32.134	41.99	110%
22/04/2016	20/05/2016	28	32.838	42.91	113%

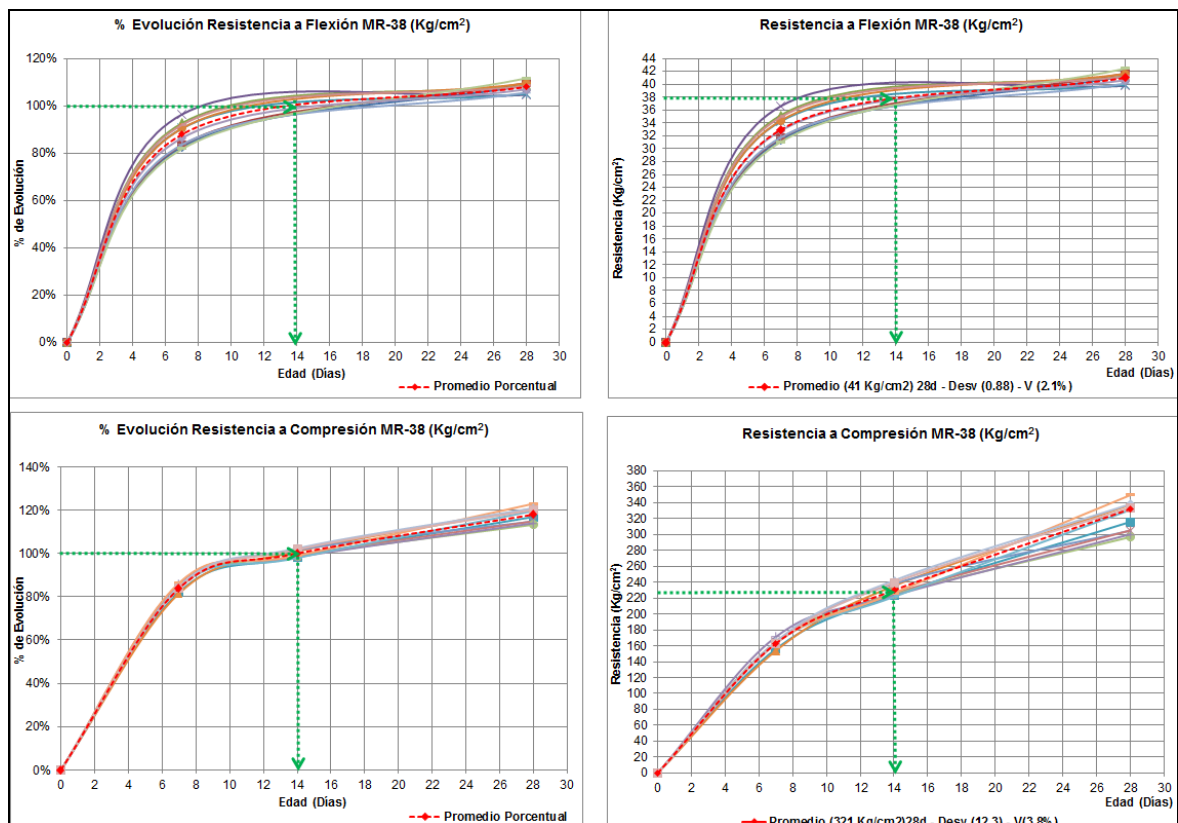
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
06/05/2016	13/05/2016	7	25.314	33.08	87%
06/05/2016	13/05/2016	7	24.987	32.65	86%
06/05/2016	03/06/2016	28	31.070	40.60	107%
06/05/2016	03/06/2016	28	31.180	40.74	107%

Figura 87. Resultados de resistencia a la flexión MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

Resistencia a Compresión MR- 38							
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Peso Gr	Tipo Falla	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
11/03/2016	18/03/2016	7	123.56	3756	4	154.20	82%
11/03/2016	18/03/2016	7	126.54	3767	4	157.92	83%
11/03/2016	25/03/2016	14	176.76	3874	3	220.59	98%
11/03/2016	25/03/2016	14	181.34	3856	3	226.30	99%
11/03/2016	08/04/2016	28	254.56	3945	3	317.68	117%
11/03/2016	08/04/2016	28	250.44	3888	3	312.54	116%
11/03/2016	08/04/2016	28	254.45	3879	3	317.54	117%
16/03/2016	23/03/2016	7	121.67	3751	4	151.84	81%
16/03/2016	23/03/2016	7	125.09	3780	3	156.11	82%
16/03/2016	30/03/2016	14	191.35	3856	3	238.80	102%
16/03/2016	30/03/2016	14	186.02	3877	3	232.14	100%
16/03/2016	13/04/2016	28	271.67	3897	4	339.03	121%
16/03/2016	13/04/2016	28	270.09	3907	4	337.06	121%
16/03/2016	13/04/2016	28	269.64	3912	3	336.50	121%
19/03/2016	26/03/2016	7	129.98	3803	4	162.21	84%
19/03/2016	26/03/2016	7	132.46	3810	4	165.30	85%
19/03/2016	02/04/2016	14	188.77	3916	4	235.58	101%
19/03/2016	02/04/2016	14	192.78	3923	3	240.58	102%
19/03/2016	16/04/2016	28	245.50	3930	3	306.37	115%
19/03/2016	16/04/2016	28	245.98	3936	4	306.97	115%
19/03/2016	16/04/2016	28	241.56	3943	4	301.45	114%
23/03/2016	30/03/2016	7	130.18	3745	4	162.46	84%
23/03/2016	30/03/2016	7	134.02	3766	4	167.25	85%
23/03/2016	06/04/2016	14	178.98	3887	3	223.36	98%
23/03/2016	06/04/2016	14	183.12	3899	3	228.52	99%
23/03/2016	20/04/2016	28	245.87	3945	3	306.83	115%
23/03/2016	20/04/2016	28	241.34	3955	3	301.18	114%
23/03/2016	20/04/2016	28	246.71	3923	3	307.88	115%
26/03/2016	02/04/2016	7	129.98	3812	4	162.21	84%
26/03/2016	02/04/2016	7	133.56	3842	3	166.68	85%
26/03/2016	09/04/2016	14	181.32	3882	4	226.28	99%
26/03/2016	09/04/2016	14	178.52	3917	4	222.78	98%
26/03/2016	23/04/2016	28	238.09	3951	3	297.12	113%
26/03/2016	23/04/2016	28	236.56	3951	4	295.22	113%
26/03/2016	23/04/2016	28	238.91	3921	3	298.15	114%
31/03/2016	07/04/2016	7	133.01	3755	4	165.99	85%
31/03/2016	07/04/2016	7	141.54	3790	3	176.63	87%
31/03/2016	14/04/2016	14	181.34	3825	4	226.30	99%
31/03/2016	14/04/2016	14	176.67	3859	4	220.48	98%
31/03/2016	28/04/2016	28	241.67	3894	3	301.59	114%
31/03/2016	28/04/2016	28	239.98	3929	4	299.48	114%
31/03/2016	28/04/2016	28	240.43	3863	4	300.04	114%
07/04/2016	14/04/2016	7	128.98	3741	3	160.96	83%
07/04/2016	14/04/2016	7	133.02	3765	3	166.00	85%
07/04/2016	21/04/2016	14	176.43	3889	3	220.18	98%
07/04/2016	21/04/2016	14	179.07	3913	3	223.47	98%
07/04/2016	05/05/2016	28	267.81	3937	3	334.21	120%
07/04/2016	05/05/2016	28	265.03	3961	3	330.74	120%
07/04/2016	05/05/2016	28	262.93	3885	3	328.12	119%
14/04/2016	21/04/2016	7	135.78	3809	4	169.45	86%
14/04/2016	21/04/2016	7	141.10	3733	4	176.09	87%
14/04/2016	28/04/2016	14	180.34	3857	4	225.06	99%
14/04/2016	28/04/2016	14	182.63	3781	3	227.91	99%
14/04/2016	12/05/2016	28	280.71	3904	3	350.31	123%
14/04/2016	12/05/2016	28	279.77	3928	3	349.14	123%
14/04/2016	12/05/2016	28	279.96	3952	3	349.38	123%
22/04/2016	29/04/2016	7	129.67	3776	3	161.82	84%
22/04/2016	29/04/2016	7	135.38	3800	3	168.95	86%
22/04/2016	06/05/2016	14	191.43	3924	3	238.90	102%
22/04/2016	06/05/2016	14	196.76	3948	3	245.55	103%
22/04/2016	20/05/2016	28	271.52	3972	3	338.84	121%
22/04/2016	20/05/2016	28	270.67	3996	3	337.78	121%
22/04/2016	20/05/2016	28	270.92	3920	3	338.09	121%
06/05/2016	13/05/2016	7	128.56	3744	4	160.44	83%
06/05/2016	13/05/2016	7	132.34	3768	4	165.15	85%
06/05/2016	20/05/2016	14	189.56	3892	3	236.56	101%
06/05/2016	20/05/2016	14	194.38	3816	3	242.58	102%
06/05/2016	03/06/2016	28	268.78	3940	3	335.42	120%
06/05/2016	03/06/2016	28	265.13	3964	3	330.87	120%
06/05/2016	03/06/2016	28	268.66	3888	3	335.27	120%

Figura 88. Resultados de resistencia a la compresión MR-3.8 MPa

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 31. Evolución resistencias y valores estadísticos promedio MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

MR-38	Correlación MR - F'c			
	MR	F'c	Raiz	K
	41.0	321.4	17.9	2.3
0	0%	0	Promedio a Flexión	
7	88%	33		
28	108%	41		
0	0%	0	Promedio a Compresión	
7	84%	163		
14	100%	230		
28	118%	332		
Desv:		0.878		
Coef:		2.1%		
FLEXOTRACCIÓN				
Desv:		12.28		
Coef:		3.8%		
COMPRESIÓN				

Figura 89. Resultados de correlación para (K=2.3) en MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

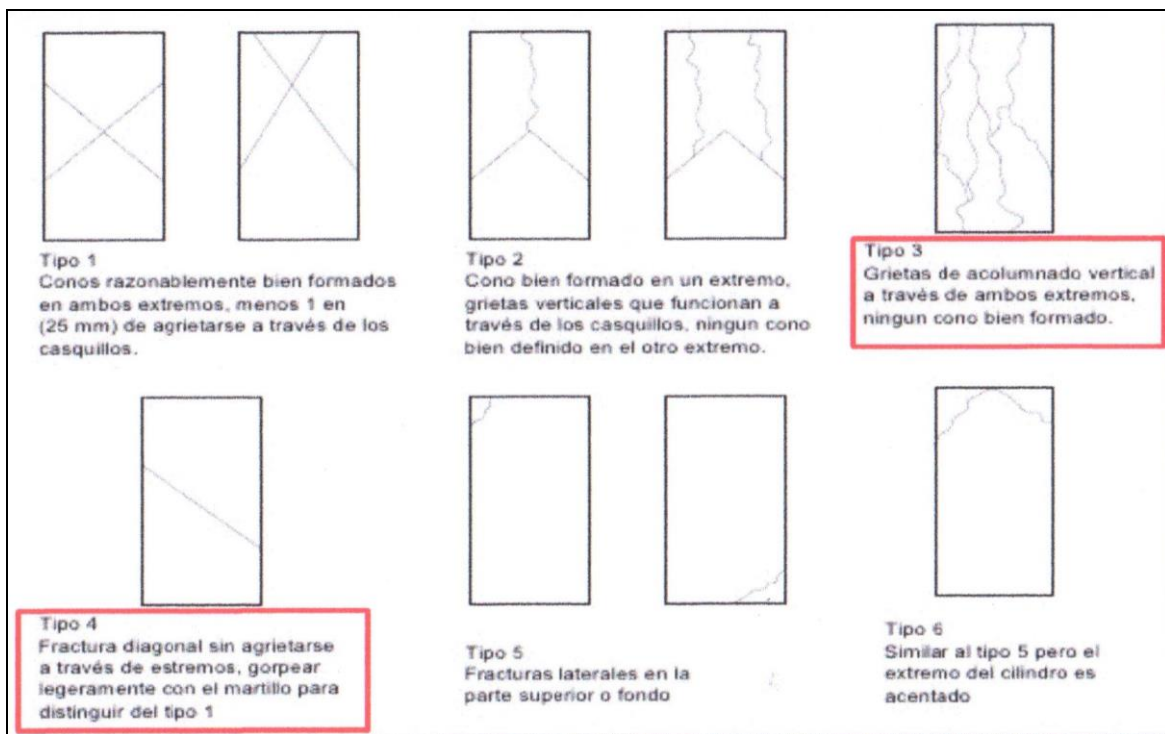


Figura 90. Tipos de falla en probetas cilíndricas de concreto MR-3.8 MPa
Fuente: Reglamento ACI-318

Reglamento ACI-318					
DISPERSION TOTAL					
Clase de Operación	Desviación Estándar para diferentes grados de control (Kg/cm ²)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	> 49.2
Concreto en Laboratorio	< a 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	> 24.6
DISPERSION ENTRE TESTIGOS					
Clase de Operación	Coeficiente de variación V para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6.0
Concreto en Laboratorio	< a 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5.0

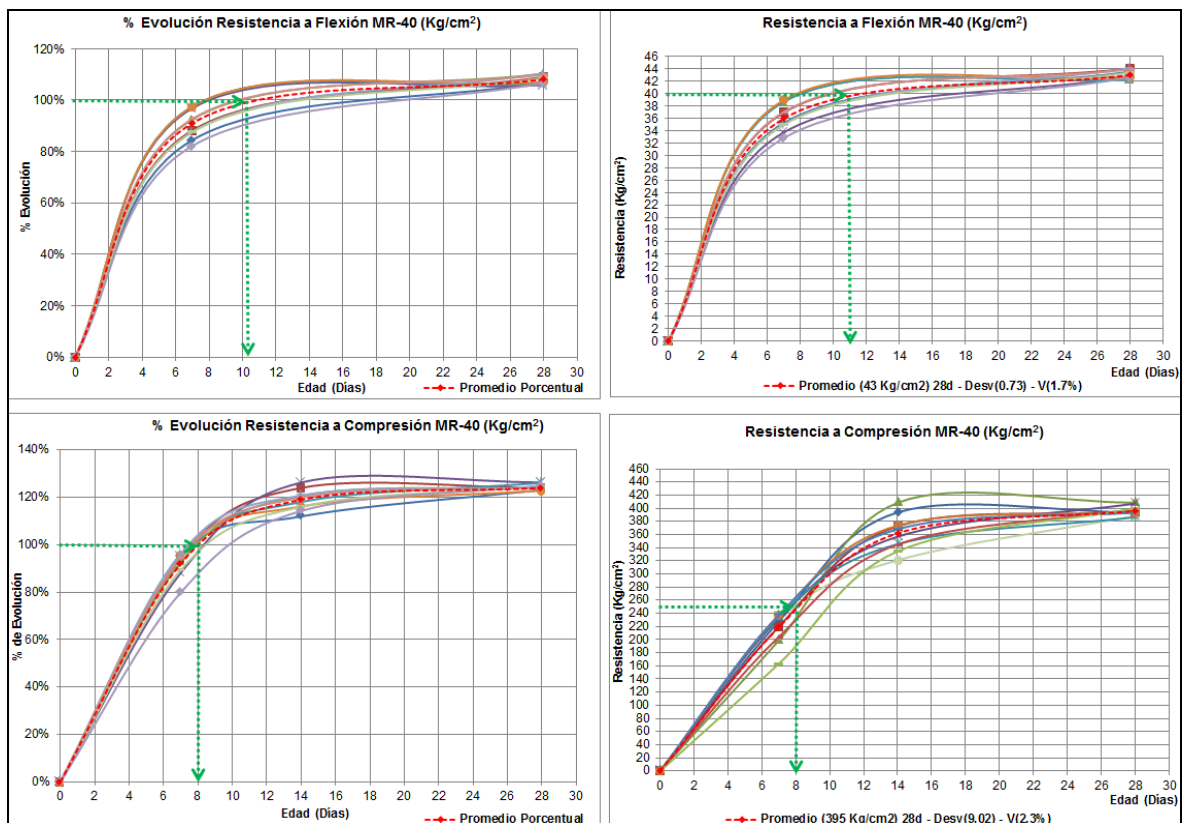
Figura 91. Evaluación estadística al proceso (Flexion-compresion) MR-3.8 MPa
Fuente: Reglamento ACI-318

Resistencia a Flexión MR- 40					
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
10/03/2016	17/03/2016	7	25.354	33.13	83%
10/03/2016	17/03/2016	7	26.333	34.41	86%
10/03/2016	07/04/2016	28	32.694	42.72	107%
10/03/2016	07/04/2016	28	32.721	42.75	107%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
15/03/2016	22/03/2016	7	26.842	35.07	88%
15/03/2016	22/03/2016	7	27.162	35.49	89%
15/03/2016	12/04/2016	28	33.265	43.47	109%
15/03/2016	12/04/2016	28	33.425	43.67	109%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
18/03/2016	25/03/2016	7	28.702	37.50	94%
18/03/2016	25/03/2016	7	27.899	36.45	91%
18/03/2016	15/04/2016	28	33.768	44.12	110%
18/03/2016	15/04/2016	28	33.758	44.11	110%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
22/03/2016	29/03/2016	7	29.654	38.75	97%
22/03/2016	29/03/2016	7	29.632	38.72	97%
22/03/2016	19/04/2016	28	32.415	42.35	106%
22/03/2016	19/04/2016	28	32.386	42.32	106%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
25/03/2016	01/04/2016	7	26.457	34.57	86%
25/03/2016	01/04/2016	7	26.467	34.58	86%
25/03/2016	22/04/2016	28	32.169	42.03	105%
25/03/2016	22/04/2016	28	32.971	43.08	108%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
30/03/2016	06/04/2016	7	30.124	39.36	98%
30/03/2016	06/04/2016	7	29.54	38.60	96%
30/03/2016	27/04/2016	28	32.984	43.10	108%
30/03/2016	27/04/2016	28	32.478	42.44	106%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
06/04/2016	13/04/2016	7	26.652	34.82	87%
06/04/2016	13/04/2016	7	27.002	35.28	88%
06/04/2016	04/05/2016	28	33.651	43.97	110%
06/04/2016	04/05/2016	28	33.932	44.34	111%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
13/04/2016	20/04/2016	7	28.365	37.06	93%
13/04/2016	20/04/2016	7	28.384	37.09	93%
13/04/2016	11/05/2016	28	33.542	43.83	110%
13/04/2016	11/05/2016	28	33.724	44.06	110%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
21/04/2016	28/04/2016	7	26.478	34.60	86%
21/04/2016	28/04/2016	7	27.125	35.44	89%
21/04/2016	19/05/2016	28	33.134	43.29	108%
21/04/2016	19/05/2016	28	33.338	43.56	109%
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
02/05/2016	09/05/2016	7	25.314	33.08	83%
02/05/2016	09/05/2016	7	24.987	32.65	82%
02/05/2016	30/05/2016	28	33.07	43.21	108%
02/05/2016	30/05/2016	28	32.18	42.05	105%

Figura 92. Resultados de resistencia a la flexión MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

Resistencia a Compresión MR- 40							
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Peso Gr	Tipo Falla	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
10/03/2016	17/03/2016	7	186.52	3800	4	232.77	95%
10/03/2016	17/03/2016	7	183.45	3824	3	228.94	95%
10/03/2016	24/03/2016	14	257.41	3855	3	321.23	112%
10/03/2016	24/03/2016	14	256.89	3877	3	320.59	112%
10/03/2016	07/04/2016	28	310.84	4000	3	387.91	123%
10/03/2016	07/04/2016	28	312.42	3999	3	389.88	123%
10/03/2016	07/04/2016	28	310.78	3986	3	387.84	123%
15/03/2016	22/03/2016	7	183.15	3802	4	228.56	94%
15/03/2016	22/03/2016	7	182.47	3786	3	227.71	94%
15/03/2016	29/03/2016	14	312.14	3886	3	389.54	123%
15/03/2016	29/03/2016	14	318.86	3875	3	397.92	125%
15/03/2016	12/04/2016	28	313.20	4002	4	390.86	124%
15/03/2016	12/04/2016	28	315.33	4021	4	393.52	124%
15/03/2016	12/04/2016	28	317.97	4027	3	396.81	125%
18/03/2016	25/03/2016	7	177.20	3775	4	221.14	93%
18/03/2016	25/03/2016	7	175.55	3854	4	219.08	93%
18/03/2016	01/04/2016	14	297.23	3862	4	370.93	120%
18/03/2016	01/04/2016	14	300.00	3896	3	374.39	121%
18/03/2016	15/04/2016	28	322.36	4000	3	402.29	125%
18/03/2016	15/04/2016	28	313.21	4021	4	390.87	124%
18/03/2016	15/04/2016	28	311.65	4024	4	388.92	123%
22/03/2016	29/03/2016	7	156.23	3745	4	194.97	87%
22/03/2016	29/03/2016	7	162.47	3756	4	202.75	89%
22/03/2016	05/04/2016	14	312.12	3895	3	389.51	123%
22/03/2016	05/04/2016	14	342.50	3894	3	427.42	129%
22/03/2016	19/04/2016	28	326.45	3962	3	407.39	126%
22/03/2016	19/04/2016	28	328.34	3987	3	409.75	127%
22/03/2016	19/04/2016	28	327.23	3980	3	408.37	126%
25/03/2016	01/04/2016	7	187.23	3784	4	233.65	96%
25/03/2016	01/04/2016	7	185.21	3774	3	231.13	95%
25/03/2016	08/04/2016	14	287.64	3826	4	358.96	118%
25/03/2016	08/04/2016	14	284.23	3844	4	354.70	118%
25/03/2016	22/04/2016	28	325.49	3962	3	406.20	126%
25/03/2016	22/04/2016	28	326.65	3967	4	407.64	126%
25/03/2016	22/04/2016	28	326.89	3986	3	407.94	126%
30/03/2016	06/04/2016	7	188.75	3795	4	235.55	96%
30/03/2016	06/04/2016	7	187.22	3806	3	233.64	96%
30/03/2016	13/04/2016	14	277.36	3844	4	346.13	116%
30/03/2016	13/04/2016	14	276.32	3848	4	344.83	116%
30/03/2016	27/04/2016	28	300.12	3899	3	374.53	121%
30/03/2016	27/04/2016	28	308.24	3904	4	384.67	123%
30/03/2016	27/04/2016	28	300.55	3926	4	375.07	121%
06/04/2016	13/04/2016	7	192.32	3806	3	240.01	97%
06/04/2016	13/04/2016	7	188.23	3804	3	234.90	96%
06/04/2016	20/04/2016	14	300.56	3904	3	375.08	121%
06/04/2016	20/04/2016	14	298.35	3907	3	372.33	121%
06/04/2016	04/05/2016	28	318.56	3899	3	397.55	125%
06/04/2016	04/05/2016	28	315.47	4051	3	393.69	124%
06/04/2016	04/05/2016	28	312.00	4032	3	389.36	123%
13/04/2016	20/04/2016	7	184.65	3876	4	230.43	95%
13/04/2016	20/04/2016	7	182.47	3888	4	227.71	94%
13/04/2016	27/04/2016	14	296.32	3997	4	369.79	120%
13/04/2016	27/04/2016	14	293.78	4057	3	366.62	120%
13/04/2016	11/05/2016	28	316.24	4036	3	394.65	124%
13/04/2016	11/05/2016	28	312.41	4015	3	389.87	123%
13/04/2016	11/05/2016	28	317.54	4040	3	396.27	124%
21/04/2016	28/04/2016	7	162.34	3796	3	202.59	89%
21/04/2016	28/04/2016	7	165.24	3884	3	206.21	90%
21/04/2016	05/05/2016	14	277.68	3917	3	346.53	116%
21/04/2016	05/05/2016	14	275.14	3968	3	343.36	116%
21/04/2016	19/05/2016	28	319.28	4019	3	398.45	125%
21/04/2016	19/05/2016	28	319.22	4037	3	398.37	125%
21/04/2016	19/05/2016	28	320.71	4034	3	400.23	125%
02/05/2016	09/05/2016	7	131.87	3768	4	164.57	80%
02/05/2016	09/05/2016	7	129.99	3783	4	162.22	80%
02/05/2016	16/05/2016	14	265.76	3862	3	331.66	114%
02/05/2016	16/05/2016	14	270.23	3878	3	337.23	115%
02/05/2016	30/05/2016	28	319.61	3892	3	398.86	125%
02/05/2016	30/05/2016	28	320.29	3899	3	399.71	125%
02/05/2016	30/05/2016	28	321.12	4003	3	400.74	125%

Figura 93. Resultados de resistencia a la compresión MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 32. Evolución resistencias y valores estadísticos promedio MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

MR-40	Correlación MR - F'c			
	MR	F'c	Raiz	K
	43.2	395.6	19.9	2.2
0	0%	0	Promedio a Flexión	
7	91%	36		
28	108%	43		
0	0%	0	Promedio a Compresión	
7	92%	219		
14	119%	362		
28	124%	396		
Desv:		0.738		
Coef:		1.7%		
FLEXOTRACCIÓN				
Desv:		9.022		
Coef:		2.3%		
COMPRESIÓN				

Figura 94. Resultados de correlación para (K=2.2) en MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

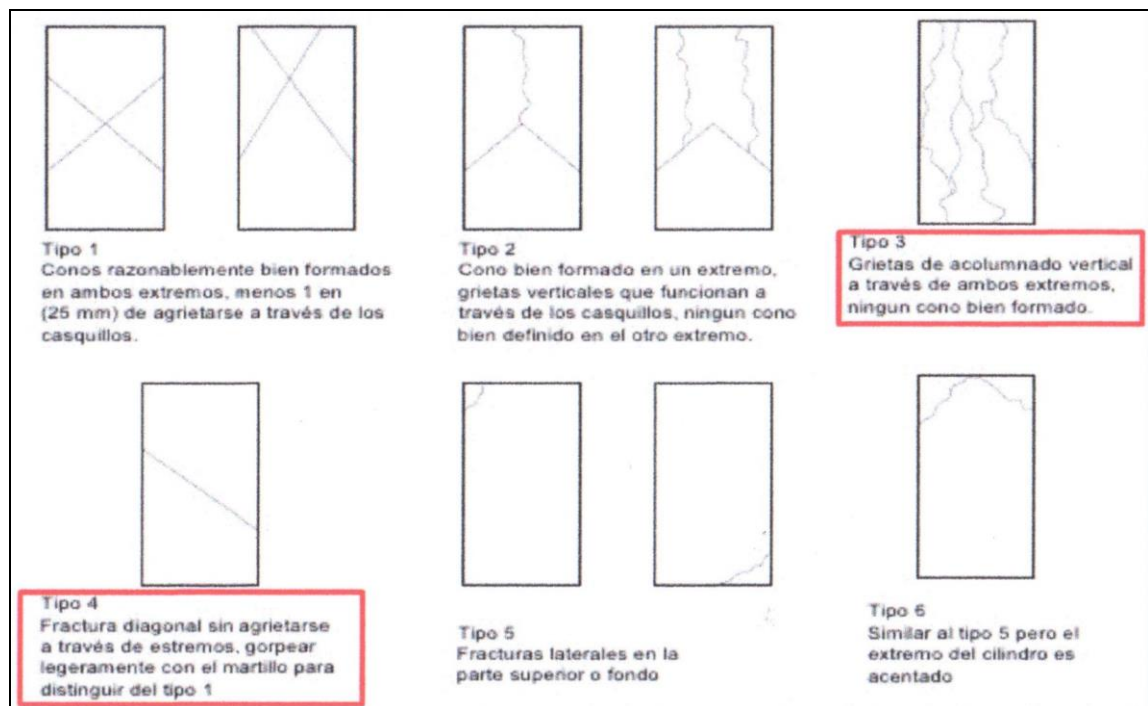


Figura 95. Tipos de falla en probetas cilíndricas de concreto MR-4.0 MPa
Fuente: Reglamento ACI-318

Reglamento ACI-318					
DISPERSION TOTAL					
Clase de Operación	Desviación Estándar para diferentes grados de control (Kg/cm ²)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	> 49.2
Concreto en Laboratorio	< a 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	> 24.6
DISPERSION ENTRE TESTIGOS					
Clase de Operación	Coeficiente de variación V para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6.0
Concreto en Laboratorio	< a 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5.0

Figura 96. Evaluación estadística al proceso (Flexion-compresion) MR-4.0 MPa
Fuente: Reglamento ACI-318

Resistencia a Flexión MR- 42					
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
09/03/2016	16/03/2016	7	29.452	38.48	92%
09/03/2016	16/03/2016	7	30.622	40.01	95%
09/03/2016	06/04/2016	28	35.778	46.75	111%
09/03/2016	06/04/2016	28	35.804	46.78	111%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
14/03/2016	21/03/2016	7	29.301	38.29	91%
14/03/2016	21/03/2016	7	29.872	39.03	93%
14/03/2016	11/04/2016	28	35.656	46.59	111%
14/03/2016	11/04/2016	28	35.871	46.87	112%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
17/03/2016	24/03/2016	7	28.978	37.86	90%
17/03/2016	24/03/2016	7	28.902	37.76	90%
17/03/2016	14/04/2016	28	35.934	46.95	112%
17/03/2016	14/04/2016	28	35.966	46.99	112%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
21/03/2016	28/03/2016	7	29.798	38.94	93%
21/03/2016	28/03/2016	7	30.284	39.57	94%
21/03/2016	18/04/2016	28	35.856	46.85	112%
21/03/2016	18/04/2016	28	35.662	46.60	111%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
24/03/2016	31/03/2016	7	29.678	38.78	92%
24/03/2016	31/03/2016	7	28.902	37.76	90%
24/03/2016	21/04/2016	28	35.434	46.30	110%
24/03/2016	21/04/2016	28	35.606	46.52	111%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
29/03/2016	05/04/2016	7	30.003	39.20	93%
29/03/2016	05/04/2016	7	31.124	40.67	97%
29/03/2016	26/04/2016	28	35.267	46.08	110%
29/03/2016	26/04/2016	28	35.412	46.27	110%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
05/04/2016	12/04/2016	7	28.076	36.69	87%
05/04/2016	12/04/2016	7	28.866	37.72	90%
05/04/2016	03/05/2016	28	34.967	45.69	109%
05/04/2016	03/05/2016	28	34.987	45.72	109%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
12/04/2016	19/04/2016	7	28.562	37.32	89%
12/04/2016	19/04/2016	7	29.016	37.91	90%
12/04/2016	10/05/2016	28	35.439	46.31	110%
12/04/2016	10/05/2016	28	34.977	45.70	109%

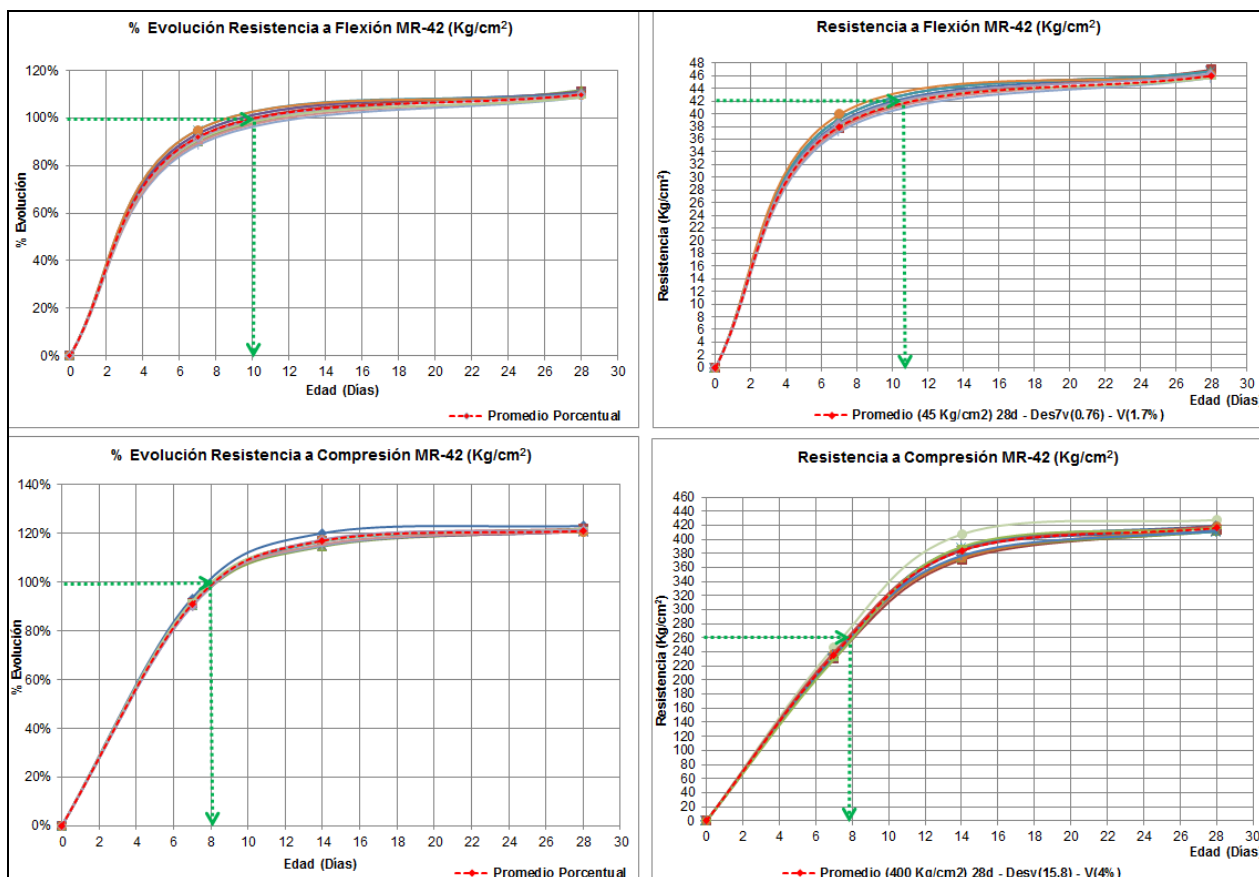
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
20/04/2016	27/04/2016	7	29.481	38.52	92%
20/04/2016	27/04/2016	7	28.967	37.85	90%
20/04/2016	18/05/2016	28	34.978	45.70	109%
20/04/2016	18/05/2016	28	34.956	45.67	109%

Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Esfuerzo Kg/Cm²	% Evolución
30/04/2016	07/05/2016	7	28.978	37.86	90%
30/04/2016	07/05/2016	7	29.831	38.98	93%
30/04/2016	28/05/2016	28	35.870	46.87	112%
30/04/2016	28/05/2016	28	35.100	45.86	109%

Figura 97. Resultados de resistencia a la flexión MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

Resistencia a Compresión MR- 42							
Fecha Toma	Fecha Rotura	Edad	Carga KN	Peso Gr	Tipo Falla	Esfuerzo Kg/Cm ²	% Evolución
09/03/2016	16/03/2016	7	198.39	3783	4	247.58	94%
09/03/2016	16/03/2016	7	196.79	3728	3	245.58	93%
09/03/2016	23/03/2016	14	322.29	3887	4	402.20	119%
09/03/2016	23/03/2016	14	330.19	3877	4	412.06	121%
09/03/2016	06/04/2016	28	342.96	3899	3	428.00	123%
09/03/2016	06/04/2016	28	342.61	3900	3	427.56	123%
09/03/2016	06/04/2016	28	342.29	3897	3	427.16	123%
14/03/2016	21/03/2016	7	190.45	3801	3	237.67	92%
14/03/2016	21/03/2016	7	188.34	3802	3	235.04	91%
14/03/2016	28/03/2016	14	310.56	3897	4	387.56	117%
14/03/2016	28/03/2016	14	310.19	3896	4	387.10	117%
14/03/2016	11/04/2016	28	331.92	4000	3	414.22	121%
14/03/2016	11/04/2016	28	334.34	3985	4	417.24	122%
14/03/2016	11/04/2016	28	342.90	3996	3	427.92	123%
17/03/2016	24/03/2016	7	186.54	3766	4	232.79	91%
17/03/2016	24/03/2016	7	182.78	3800	4	228.10	90%
17/03/2016	31/03/2016	14	297.54	3856	4	371.32	115%
17/03/2016	31/03/2016	14	296.89	3874	3	370.50	115%
17/03/2016	14/04/2016	28	330.54	3899	3	412.50	121%
17/03/2016	14/04/2016	28	333.17	3956	4	415.78	121%
17/03/2016	14/04/2016	28	330.65	3982	3	412.63	121%
21/03/2016	28/03/2016	7	189.54	3802	3	236.54	92%
21/03/2016	28/03/2016	7	189.91	3819	3	237.00	92%
21/03/2016	04/04/2016	14	301.31	3888	3	376.02	115%
21/03/2016	04/04/2016	14	298.76	3897	3	372.84	115%
21/03/2016	18/04/2016	28	328.20	3982	3	409.58	120%
21/03/2016	18/04/2016	28	331.45	3987	4	413.63	121%
21/03/2016	18/04/2016	28	329.89	3993	4	411.69	121%
24/03/2016	31/03/2016	7	181.21	3876	4	226.14	90%
24/03/2016	31/03/2016	7	188.45	3880	4	235.18	91%
24/03/2016	07/04/2016	14	315.34	3998	3	393.53	118%
24/03/2016	07/04/2016	14	299.89	3991	3	374.25	115%
24/03/2016	21/04/2016	28	330.67	4003	4	412.66	121%
24/03/2016	21/04/2016	28	329.78	4010	3	411.55	121%
24/03/2016	21/04/2016	28	329.56	4008	3	411.27	121%
29/03/2016	05/04/2016	7	186.45	3789	3	232.68	91%
29/03/2016	05/04/2016	7	187.23	3802	3	233.65	91%
29/03/2016	12/04/2016	14	310.42	3886	3	387.39	117%
29/03/2016	12/04/2016	14	311.78	3891	3	389.09	117%
29/03/2016	26/04/2016	28	329.87	3998	3	411.66	121%
29/03/2016	26/04/2016	28	329.67	4007	3	411.41	121%
29/03/2016	26/04/2016	28	328.12	4018	3	409.48	120%
05/04/2016	12/04/2016	7	189.36	3775	4	236.31	92%
05/04/2016	12/04/2016	7	189.36	3870	3	236.31	92%
05/04/2016	19/04/2016	14	299.71	3898	3	374.02	115%
05/04/2016	19/04/2016	14	298.77	3984	4	372.85	115%
05/04/2016	03/05/2016	28	333.56	4013	3	416.27	121%
05/04/2016	03/05/2016	28	336.23	4045	4	419.60	122%
05/04/2016	03/05/2016	28	335.85	4018	3	419.12	122%
12/04/2016	19/04/2016	7	188.20	3789	3	234.86	91%
12/04/2016	19/04/2016	7	185.36	3809	3	231.32	91%
12/04/2016	26/04/2016	14	301.56	3876	3	376.33	115%
12/04/2016	26/04/2016	14	302.10	3871	3	377.01	116%
12/04/2016	10/05/2016	28	333.98	4000	3	416.79	122%
12/04/2016	10/05/2016	28	326.78	4037	3	407.81	120%
12/04/2016	10/05/2016	28	331.56	4019	3	413.77	121%
20/04/2016	27/04/2016	7	190.34	3883	3	237.53	92%
20/04/2016	27/04/2016	7	193.89	3828	4	241.97	93%
20/04/2016	04/05/2016	14	308.76	3893	3	385.32	117%
20/04/2016	04/05/2016	14	308.46	3883	4	384.94	117%
20/04/2016	18/05/2016	28	338.67	3865	3	422.64	122%
20/04/2016	18/05/2016	28	336.96	3888	4	420.51	122%
20/04/2016	18/05/2016	28	331.56	3898	3	413.77	121%
30/04/2016	07/05/2016	7	182.29	3822	4	227.49	90%
30/04/2016	07/05/2016	7	185.34	3845	4	231.30	91%
30/04/2016	14/05/2016	14	312.29	3998	4	389.72	118%
30/04/2016	14/05/2016	14	311.90	3996	4	389.24	117%
30/04/2016	28/05/2016	28	331.29	4000	3	413.43	121%
30/04/2016	28/05/2016	28	333.79	3995	3	416.55	121%
30/04/2016	28/05/2016	28	335.33	3996	3	418.48	122%

Figura 98. Resultados de resistencia a la compresión MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 33. Evolución resistencias y valores estadísticos promedio MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

MR-42	Correlación MR - F'c			
	MR	F'c	Raiz	K
	45.6	400.7	20.0	2.3
0	0%	0	Promedio a Flexión	
7	92%	38		
28	110%	46		
0	0%	0	Promedio a Compresión	
7	91%	236		
14	117%	384		
28	121%	416		
Desv:		0.762		
Coef:		1.7%		
FLEXOTRACCIÓN				
Desv:		15.84		
Coef:		4.0%		
COMPRESIÓN				

Figura 99. Resultados de correlación para (K=2.3) en MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

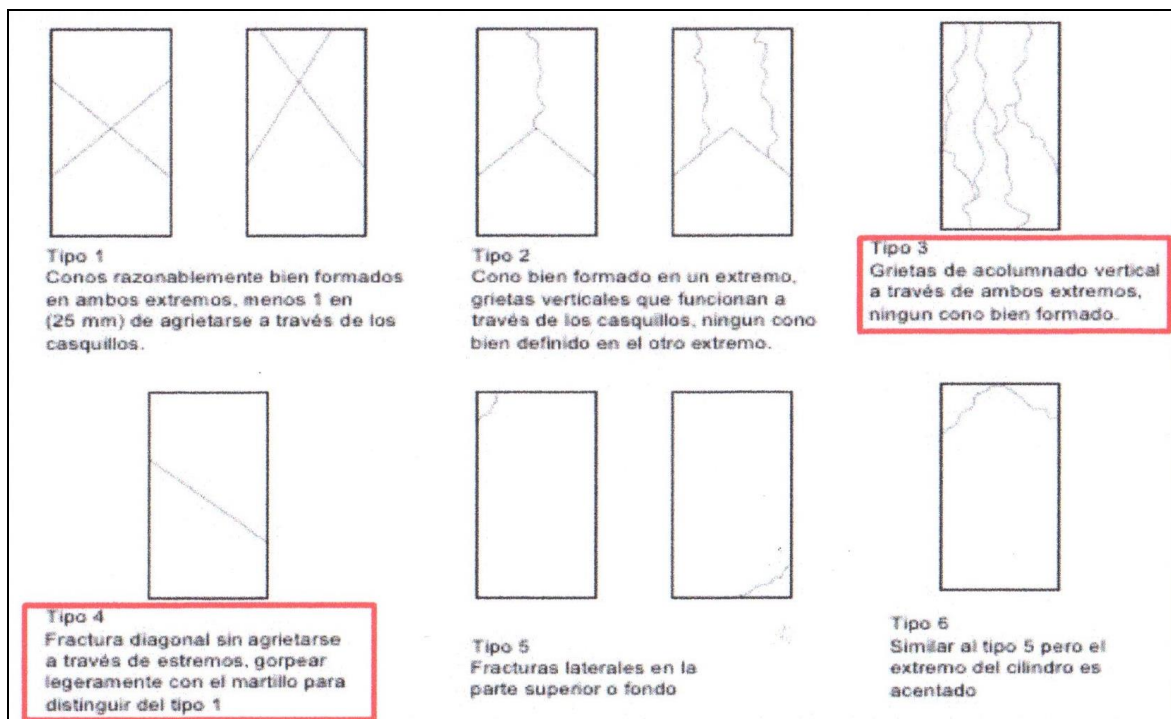
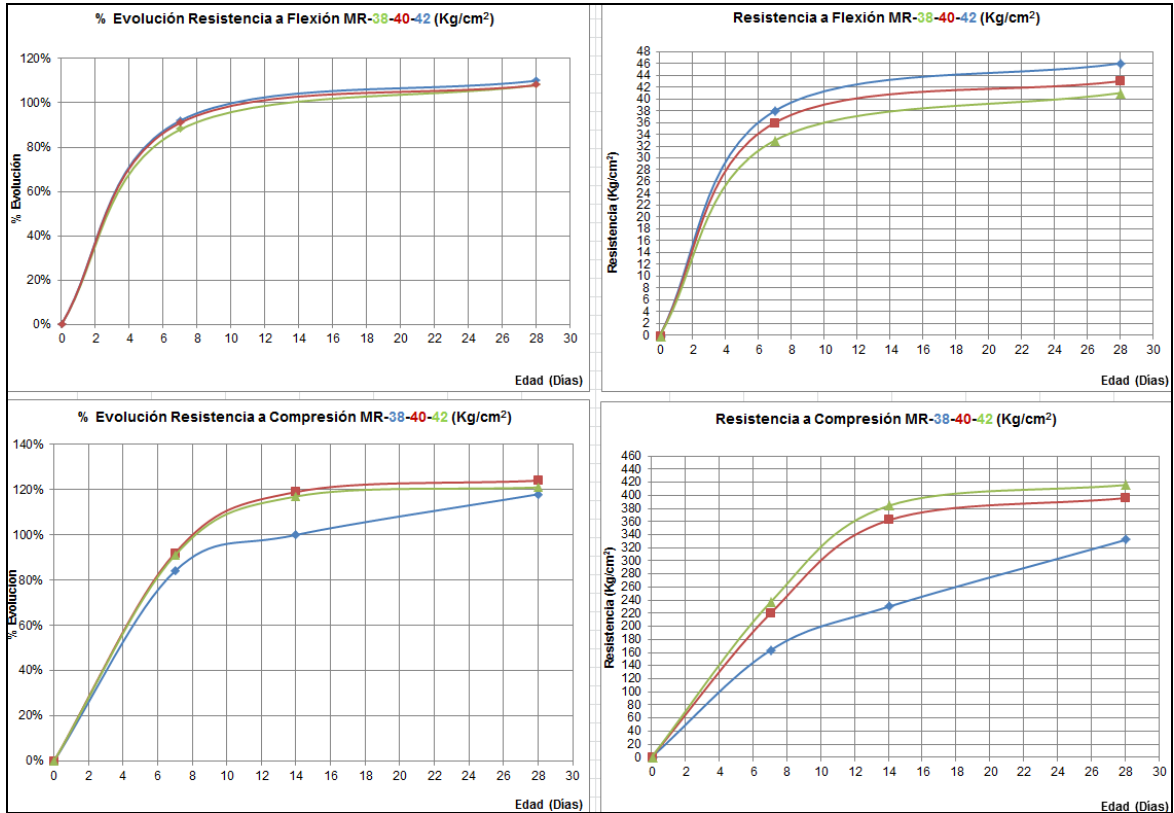


Figura 100. Tipos de falla en probetas cilíndricas de concreto MR-4.2 MPa
Fuente: Reglamento ACI-318

Reglamento ACI-318					
DISPERSION TOTAL					
Clase de Operación	Desviación Estándar para diferentes grados de control (Kg/cm ²)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	> 49.2
Concreto en Laboratorio	< a 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	> 24.6
DISPERSION ENTRE TESTIGOS					
Clase de Operación	Coeficiente de variación V para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6.0
Concreto en Laboratorio	< a 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5.0

Figura 101. Evaluación estadística al proceso (Flexion-compresion) MR-4.2 MPa
Fuente: Reglamento ACI-318

Ahora bien, se muestra en la Gráfica 34 y más ampliamente en el Anexo D, los promedios generales del porcentaje de evolución y valores aritméticos consolidados para cada una de las mezclas en estudio.

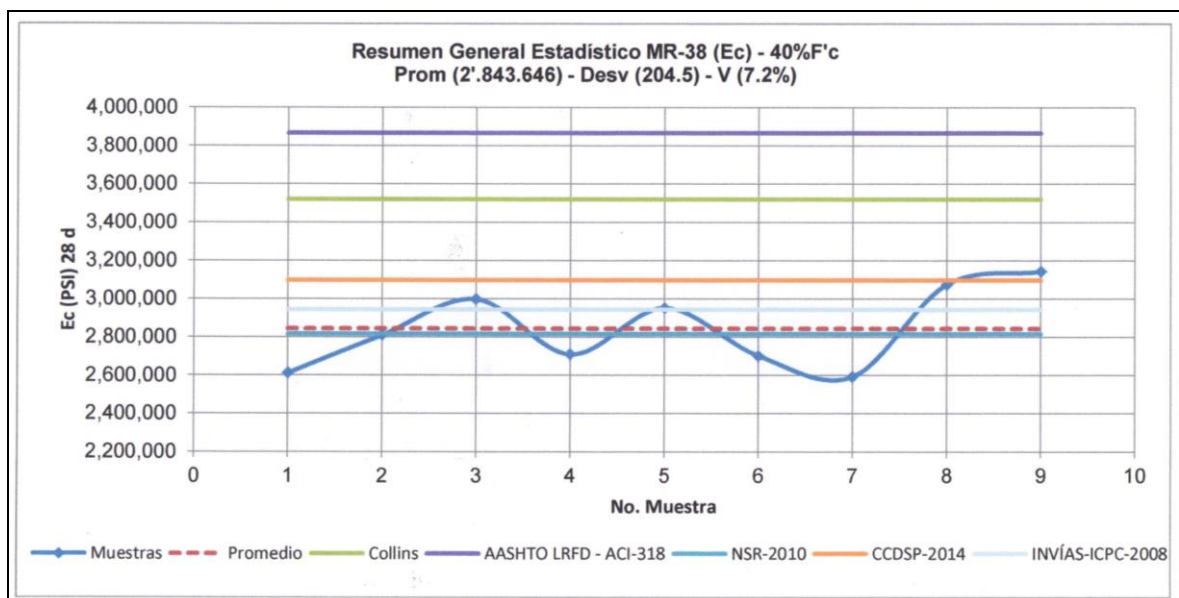


Gráfica 34. Evaluación estadística al proceso MR-3.8-4.0-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

Procedencia del Agregado (Fuente)		Pescadero	Módulo MR-38 (40% F'c)				
Formación Geológica		Sedimentaria					
Resumen Resultados		Ec (PSI)	Unidades	Masa Unitaria			
Muestra (1)		2,611,352					
Muestra (2)		2,809,230					
Muestra (3)		2,997,718					
Muestra (4)		2,709,122					
Muestra (5)		2,951,600					
Muestra (6)		2,702,169					
Muestra (7)		2,593,347					
Muestra (8)		3,075,185					
Muestra (9)		3,143,090					
Promedio		2,843,646	PSI	2296	(Kg/m ³)	Desviación	204,504
		199,055	Kg/cm ²			V(%)	7.2
		19,906	Mpa				

Normatividad	Formulación	F'c Obtenido por Correlaciones			F'c Promedio Obtenido		
		(Kg/cm ²)	(PSI)	(MPa)	(Kg/cm ²)	(PSI)	(MPa)
COLLINS	$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6900$ (Kg/cm ²)	207	2,951	21	321	4,586	32
AASHTO LRFD / ACI-318	$E_c = (W_c)^{1.5} \cdot 0.043\sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)	174	2,481	17			
NSR-2010	$E_c = (W_c)^{1.5} \cdot 0.10\sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)	306	4,368	31			
CCDSP-2014	$E_c = (W_c)^{1.5} \cdot 0.11\sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)	172	2,457	17			
MANUAL PAVICRETOS INVIAS-ICPC-2008	$E_c = 11500\sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)	300	4,280	30			

Figura 102. Resultados finales módulo elasticidad al (40%*F'c) MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

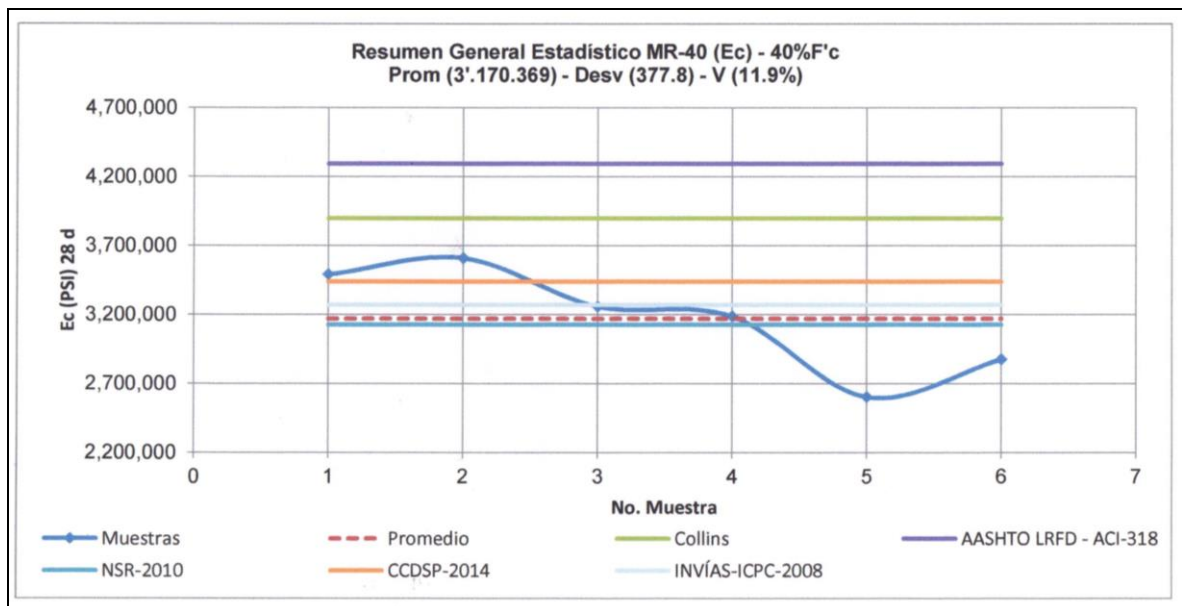


Gráfica 35. Gráficas finales módulo elasticidad al (40%*F'c) MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

Procedencia del Agregado (Fuente)	Pescadero	Módulo MR-40 (40% F'c)					
Formación Geológica	Sedimentaria						
Resumen Resultados	Ec (PSI)	Unidades	Masa Unitaria				
Muestra (1)	3,491,183						
Muestra (2)	3,608,722						
Muestra (3)	3,258,913						
Muestra (4)	3,186,365						
Muestra (5)	2,601,627						
Muestra (6)	2,875,403						
Promedio	3,170,369	PSI		2296	(Kg/m³)	Desviación	377,794
	221,926	Kg/cm²				V(%)	11.9
	22,193	Mpa					

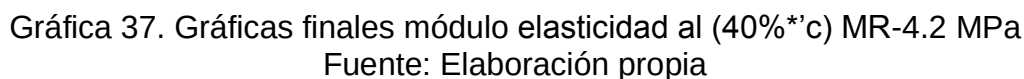
Normatividad	Formulación	F'c Obtenido por Correlaciones			F'c Promedio Obtenido		
		(Kg/cm²)	(PSI)	(MPa)	(Kg/cm²)	(PSI)	(MPa)
COLLINS	$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900$ (Kg/cm²)	259	3,695	26	396	5,657	40
AASHTO LRFD / ACI-318	$E_c = (W_c)^{1.5} \cdot 0.043\sqrt{f'_c}$ (Kg/cm²)	216	3,084	22			
NSR-2010	$E_c = (W_c)^{1.5} \cdot 0.10\sqrt{f'_c}$ (Kg/cm²)	380	5,429	38			
CCDSP-2014	$E_c = (W_c)^{1.5} \cdot 0.11\sqrt{f'_c}$ (Kg/cm²)	214	3,054	21			
MANUAL PAVICRETOS INVÍAS-ICPC-2008	$E_c = 11500\sqrt{f'_c}$ (Kg/cm²)	372	5,320	37			

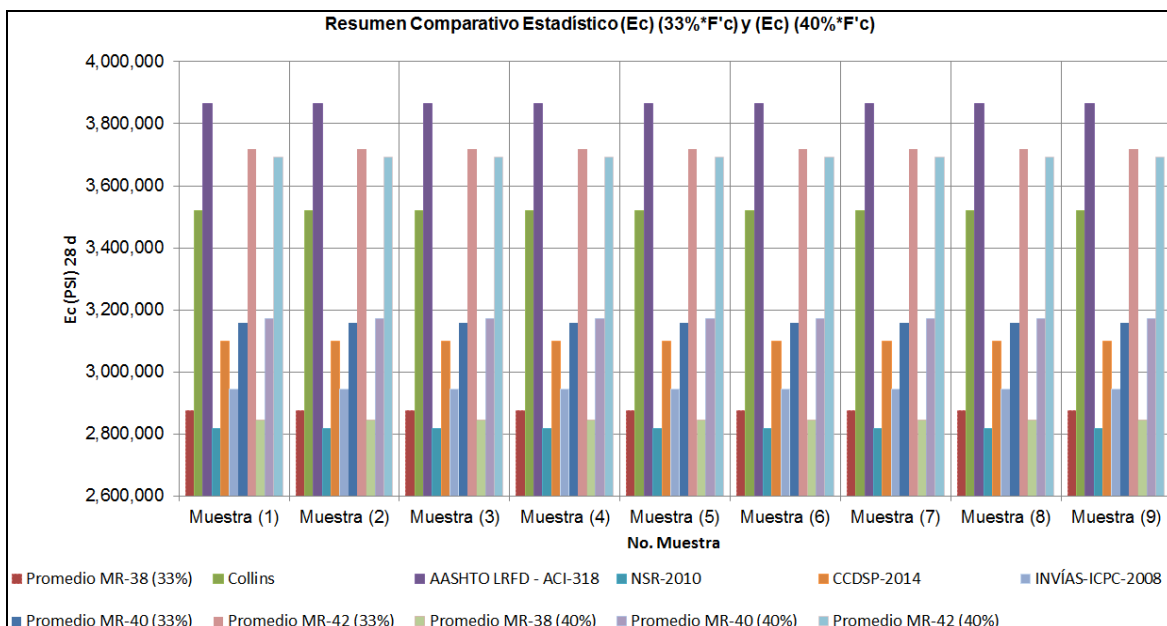
Figura 103. Resultados finales módulo elasticidad al (40%*F'c) MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia



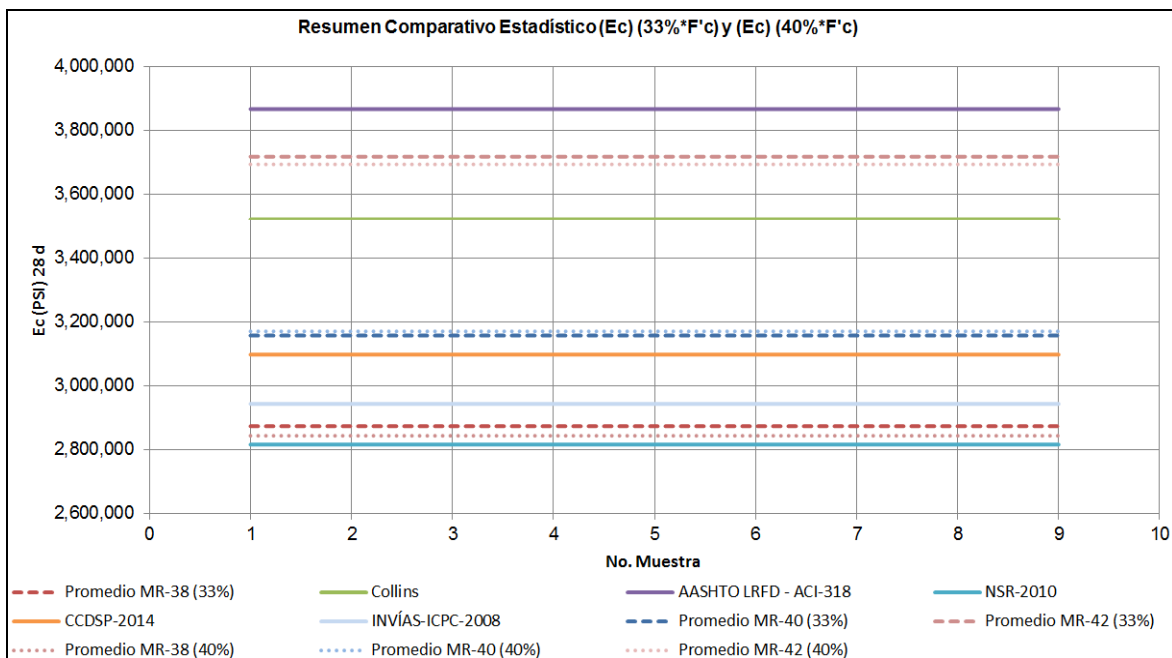
Gráfica 36. Gráficas finales módulo elasticidad al (40%*F'c) MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

Figura 104. Resultados finales módulo elasticidad al (40%*F'c) MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

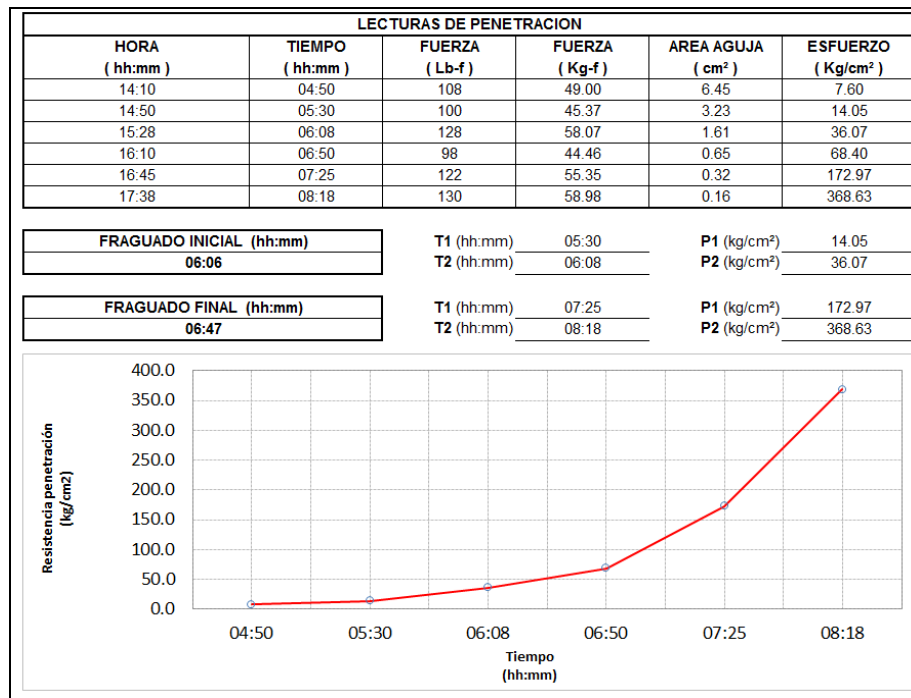




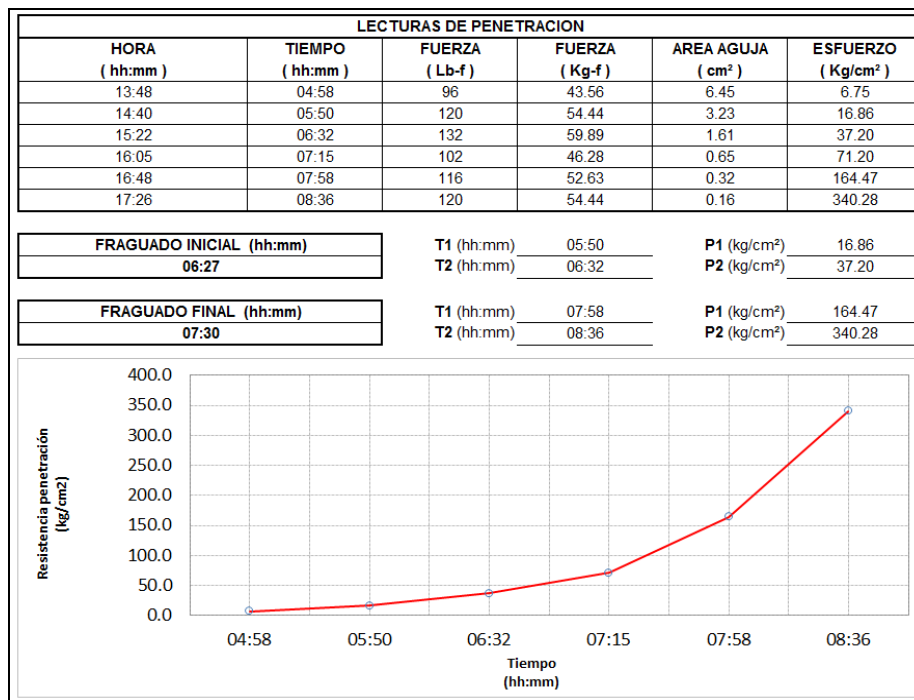
Gráfica 38. Resumen comparativo estadístico (Ec) para el (33% y 40% de F'c)–a.
Fuente: Elaboración propia



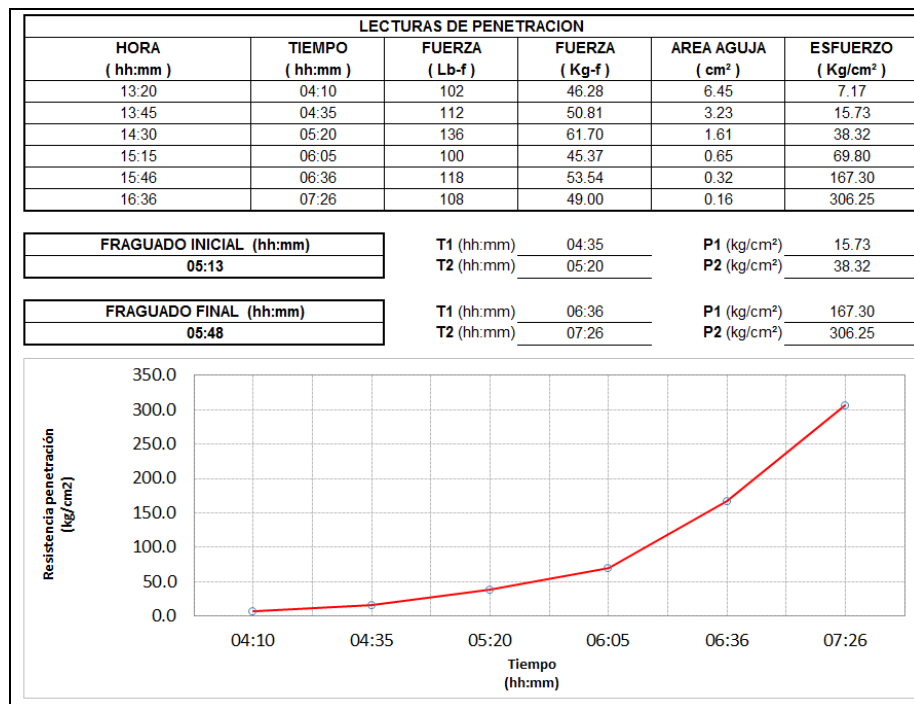
Gráfica 39. Resumen comparativo estadístico (Ec) para el (33% y 40% de F'c)-b.
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 40. Tiempos de fraguado MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 41. Tiempos de fraguado MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 42. Tiempos de fraguado MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

Tipo de agregado y origen	Módulo de elasticidad Ec (Mpa)	Módulo de elasticidad Ec (kg/cm ²)
Grueso-ígneo	$E_c = 5500 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 17000 \times (f_c)^{1/2}$
Grueso-metamórfico	$E_c = 4700 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 15000 \times (f_c)^{1/3}$
Grueso-sedimentario	$E_c = 3600 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 11500 \times (f_c)^{1/4}$
Sin información	$E_c = 3900 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 12500 \times (f_c)^{1/5}$

Figura 105. Módulos de elasticidad según procedencia geológica del agregado
Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO-1993

Normatividad	Formulación
COLLINS	$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
AASHTO LRFD / ACI-318	$E_c = (W_c)^{1,5} \times 0,043 \sqrt{f_c} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
NSR-2010	$E_c = (W_c)^{1,5} \times 0,10 \sqrt{f_c} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
CCDSP-2014	$E_c = (W_c)^{1,5} \times 0,11 \sqrt{f_c} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$
MANUAL PAVICRETOS INVÍAS-ICPC-2008	$E_c = 11500 \sqrt{f_c} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$

Figura 106. Módulos de elasticidad reglamentación nacional e internacional
Fuente: Manual pavimentos rígidos INVÍAS-2008, CCDSP-2014, NSR-2010, ACI

Tabla 5. Valores de módulo de elasticidad para modelación del pavimento de concreto hidráulico

Modelación Pavimento de Concreto Hidráulico	E (Kg/cm ²) para el (40%*F'c)		
	MR-3.8	MR-4.0	MR-4.2
Valores	199.055	221.926	258.512

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Valores porcentuales resistencia a la compresión – modulo elasticidad

Correlación F'c/ME (Kg/cm ²)	MR-3.8	MR-4.0	MR-4.2
	321,4	395,6	400,7
Valores a 28 días	199.055	221.926	258.512
Valor porcentual	0,16%	0,18%	0,16%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Valores porcentuales módulo de rotura – resistencia a la compresión

Correlación MR/F'c (Kg/cm ²)	MR-3.8	MR-4.0	MR-4.2
	41	43,2	45,6
Valores a 28 días	321,4	395,6	400,7
Valor porcentual	12,8%	10,92%	11,38%

Fuente: Elaboración propia

- Los tiempos de fraguado nos permiten tener una idea concreta del período correspondiente a la manejabilidad de las mezclas en el sitio de obra, como de la determinación de la “Ventana de corte” para la modulación constructiva de los paños de hormigón en un pavimento de concreto hidráulico – Véase Figura 107.

Este período de tiempo óptimo, es el lapso aproximado para realizar el primer corte sobre un pavimento de concreto hidráulico nuevo, que normalmente se hace a la tercera parte de su altura efectiva (H/3, siendo H la altura efectiva). También puede considerarse como un período corto después de la colocación, cuando puede ser cortado y se controla exitosamente la fisuración estructural temprana.

El tiempo más importante, es el correspondiente al fraguado final, que en este caso, corresponden a las cifras mostradas en la Tabla 8.



Figura 107. Ventana de corte en modulación de paños de hormigón para pavimento de concreto hidráulico

Fuente: PCA – Portland Cement Association

Tabla 8. Valores de tiempos de fraguado para mezclas estudiadas

Tiempos de Fraguado (Hr, min)	MR-3.8	MR-4.0	MR-4.2
Valores (Ti – Tf)	06,06- 06,47	06,27- 07,30	05,13- 05,48

Fuente: Elaboración propia

6.5. Modelación estructural para alternativas en pavimento rígido

El proposito es presentar una “modelacion ejemplo” para la construccion de pavimentos de concreto hasta por un nivel de tránsito definido en ejes equivalentes y repeticiones esperadas por ($500.000 \leq NEE \leq 5E+06$).

Igualmente, la modelacion se enfoca en subrasantes con niveles de capacidad portante baja a media, y sobrarían simulaciones en suelos mejores valores CBR ($\geq 7\%$). Lo anterior, bajo las directrices formuladas de manera exclusiva por el “Manual de Diseño de Pavimentos Rígidos para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVÍAS-ICPC-2008” y las ayudas sistemáticas de la “Guía para el diseño de estructuras de pavimento “AASHTO-1993” y la “Portland Cement Association PCA-1984”.

Para ello y como se muestra en el Anexo J de la presente investigación, están consignados los datos básicos referidos a la calidad final de las mezclas hidráulicas, así como la validación de los materiales granulares en soporte y la resistencia en capacidad portante de las plataformas de fundación.

Para un mejor entendimiento, las partes de un pavimento rígido y consideradas son las mostradas esquemáticamente en la Figura 108.

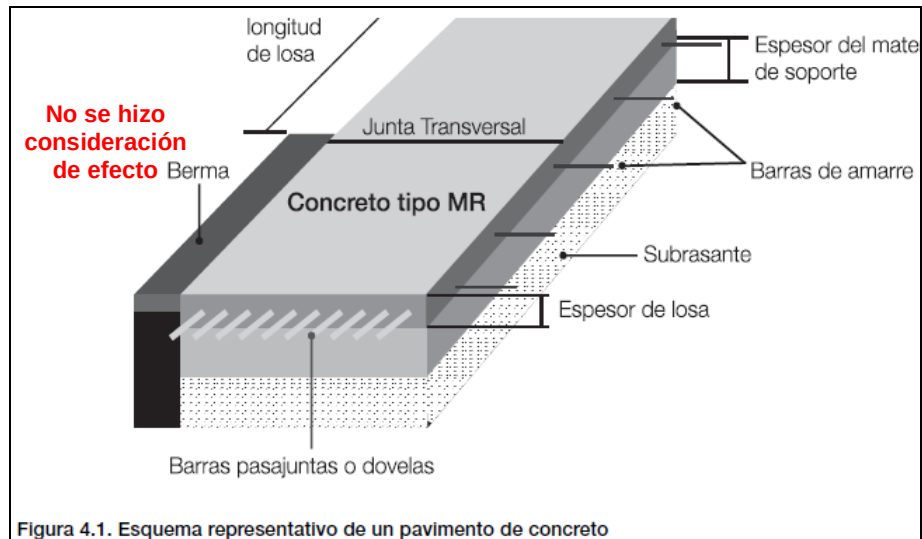


Figura 108. (Figura 4.1.). Esquema representativo de un pavimento en concreto
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
ISBN: 978-958-97411-8-4

6.5.1. Tipos de subrasante

Para este aparte, se consideran las directrices establecidas en dicho manual - Véase Figura 109 (Subrasantes promedio tipo S1-S2-S3).

Clase o Tipo	CBR (%)	Módulo resiliente (kg/cm ²)
S1	< 2	2% < 200
S2	2 - 5	Prom: 3% 200 - 500
S3	5 - 10	Prom: 7% 500 - 1.000
S4	20 - 10	1.000 - 2.000
S5	> 20	> 2.000

Tabla 3-2. Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia.

Figura 109. (Tabla 3-2). Clasificación de la subrasante de acuerdo a resistencia
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
ISBN: 978-958-97411-8-4

Para la obtención del módulo resiliente, se toma la formulación establecida en la Ecuación 12, no sin antes olvidar que debe establecerse el valor de módulo de reacción ($K_{Natural}$) como dato base para el cálculo de la estructura de pavimento por cualquiera de las metodologías enunciadas – Véase Figura 110 (Tabla 2-12).

$$MR=1500 \times (CBR)$$

Ecuación 12. Correlación módulo resiliente Vs. CBR

Fuente: Manual INVÍAS-ICPC-2008/Metodología AASHTO-1993

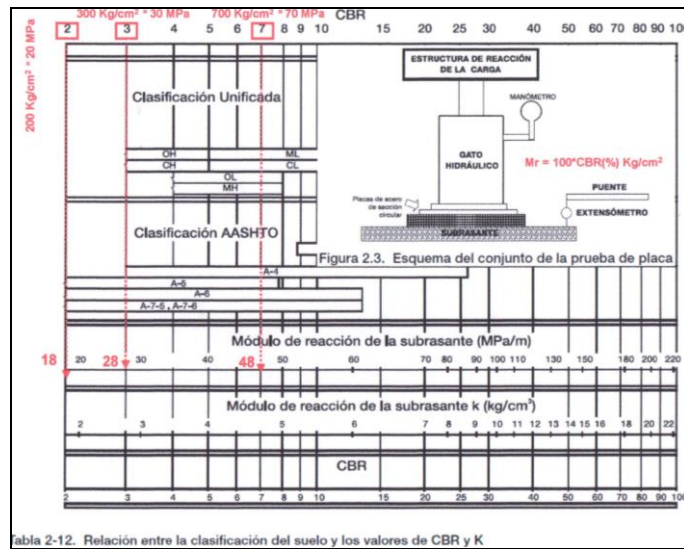


Tabla 2-12. Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K

Figura 110. (Tabla 2-12). Modulo Reaccion ($K_{Natural}$) Vs. CBR Subrasante
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, mediosy altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
ISBN: 978-958-97411-8-4

Como resumen en la Tabla 9 se muestran los siguientes valores:

Tabla 9. Valores de módulo resiliente y reacción en subrasante natural ($K_{Natural}$)

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Resiliente (Kg/cm ²) - PSI	(200) 2857	(300) 4286	(700) 10000
Módulo Reacción ($K_{Natural}$) MPa/m (PCI)	18 (66)	28 (102)	48 (172)

Fuente: Elaboración propia

Finalmente y soportando la selección de los valores promedio seleccionados para la modelación del pavimento, el “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito – INVÍAS-2007” considera de manera similar las clasificaciones mostradas en la pasada Figura 109 – Véase Figura 114.

Tabla 4.4. Categorías de subrasante		
CATEGORÍA	CBR (%)	COMPORTAMIENTO COMO SUBRASANTE
S1	2% CBR ≤ 3	Malo
S2	Prom: 3% 3 < CBR ≤ 5	Regular
S3	Prom: 7% 5 < CBR ≤ 10	Bueno
S4	CBR > 10	Muy Bueno

Figura 111. (Tabla 4.4.). Categorías de subrasante

Fuente: INVÍAS (2007). Manual de diseño de pavimentos de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. Bogotá. Colombia

6.5.2. Granular de soporte

Aquí se consideró exclusivamente la participación e instalación mínima de una base granular, con un espesor compacto igual a 15 cms, clase A de gradación fina (TM=1-1/2" BG-38 o 1" BG-25) y CBR $\geq 100\%$ al 100% PM - INVÍAS-2013.

Otras alternativas podrían haber sido, la instalación de materiales granulares estabilizados con cemento, emulsiones y hasta la adopción de mezclas asfálticas siendo esta última, la que comúnmente denomina al pavimento de concreto hidráulico como tipo “Whitetopping”. Para este caso, fue sencillamente la primera opción, y en cuanto al espesor compacto establecido, éste obedece a la mínima agrimensura considerada por la metodología “AASHTO-1993” y el “Manual de Diseño de Pavimentos Rígidos para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVÍAS-ICPC-2008” – Véase Figuras 112 y 118 respectivamente.

Variables y su representación				
Suelos	Tránsito	Transferencia y confinamiento	Soporte	Concreto
S1 (CBR<2)	T0 (EALS <1x10 ⁶)	D y B (Dovelas y Bermas)	SN (Subrasante)	MR1=38 MPa
S2 (2<CBR<5)	T1 (1x10 ⁶ EALS <1,5x10 ⁶)	D y No B (Dovelas y No Bermas)	BG (15 cm BG)	MR2=40 MPa
S3 (5<CBR<10)	T2 (1,5x10 ⁶ EALS <5x10 ⁶)	No D y B (No Dovelas y Bermas)	BEC (15 cm BEC)	MR3=42 MPa
S4 (10<CBR<20)	T3 (5x10 ⁶ EALS <9x10 ⁶)	No D y No B (No Dovelas y No Bermas)		MR4=45 Mpa
S5 (CBR>20)	T4 (9x10 ⁶ EALS <17x10 ⁶)			
	T5 (17x10 ⁶ EALS <25x10 ⁶)			
	T6 (25x10 ⁶ EALS <100x10 ⁶)			

Tabla 3-6. Variables consideradas en los análisis de diseño del pavimento

Figura 112. (Tabla 3-6). Variables para el diseño pavimento de concreto hidráulico
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, mediosy altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia

ISBN: 978-958-97411-8-4

En la metodología “PCA-1984” se considera un valor mínimo de espesor compacto en base granular igual a 10 cms, por lo que se adopta el valor inicialmente enunciado de 15 cms debido a que dos de las tres metodologías aseguran mejores condiciones estructurales y de durabilidad al pavimento, además de facilitar los procesos constructivos de cedeo en obra.

De la misma manera, es necesario transformar la calidad del insumo a condiciones mecánicas de modulo resiliente ($30.000 \text{ PSI} = 2100 \text{ Kg/cm}^2$), que para éste, se encuentra definido por la capacidad portante CBR ($\geq 100\%$) obtenida al (100%) de su densificación proctor modificado (PM) – Véase Figura 113.

6.5.3. Concreto hidráulico tipo MR

Sobre la base de todo lo mencionado, presentado y justificado anteriormente, en las Figuras 117 a 118 se finiquitan los valores necesarios y unidades correspondientes para la modelación del pavimento de concreto hidráulico con estos insumos hidráulicos.

6.5.4. Diseño del pavimento de concreto hidráulico

Para el diseño de las alternativas, el estudio tiene como propósito resumir en una fase definitiva, el modelamiento bajo los enfoques metodológicos “AASHTO-1993”, “PCA-1984” y el “Manual de Diseño de Pavimentos Rígidos para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVÍAS-ICPC-2008”.

Lo anterior bajo el uso de herramientas computacionales AASHTO V. 2.0 (Programa desarrollado por el Ing. LUIS RICARDO VÁSQUEZ VARELA, 2004) y en PCA (Programa desarrollado por los Ings. CARLOS BENAVIDES y EFRAÍN DE JESÚS SOLANO de la Universidad del Cauca, 1994).

El propósito final es tratar de dimensionar una losa de hormigón hidráulico objeto del estudio en la calidad final de las mezclas incorporadas con agregado pétreo reciclable tipo RAP en la fracción gruesa – Véase Anexo J.

6.5.4.1. Dimensionamiento AASHTO-1993

- La fórmula general así como su software de diseño, relacionan el número de ejes equivalentes de (8,2 Ton = 80 KN = 18 kips) con el espesor de la losa de hormigón, para diferentes valores de los parámetros de cálculo – Véase Ecuación 13 y Figura 116 respectivamente.

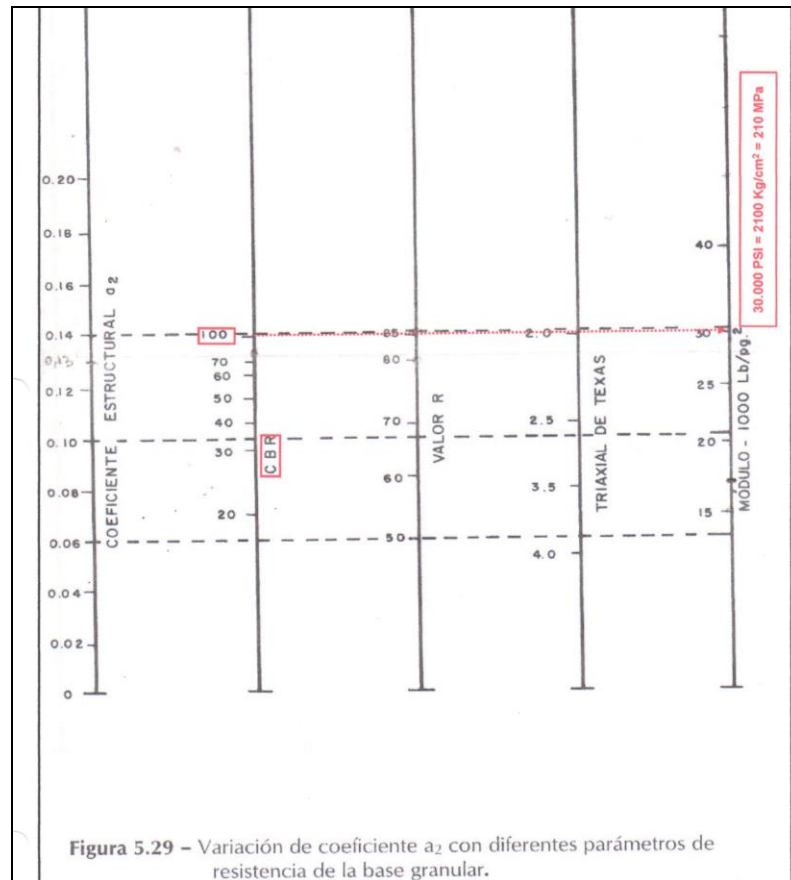


Figura 113. (Figura 5.29). Variación coeficiente (a_2) Vs. resistencia base granular
Fuente: Montejo, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia (2ª Ed). ISBN No. 958-96036-2-9. Colombia

Mezclas de Diseño Teórico-Normativas INVÍAS/2013	MR (Resistencia a la Flexo-tracción)			Mezclas de Diseño Obtenidas INVESTIGACIÓN	MR (Resistencia a la Flexo-tracción)			F'c (Resistencia a la Compresión)		
	Kg/cm ²	Mpa	PSI		Kg/cm ²	Mpa	PSI	Kg/cm ²	Mpa	PSI
	38	3.8	543		41	4.1	586	320	32.0	4,571
	40	4.0	571		43	4.3	614	390	39.0	5,571
	42	4.2	600		45	4.5	643	400	40.0	5,714

Figura 114. Variables consideradas en (MR) y (F'c) a las mezclas estudiadas – a.
Fuente: Elaboración propia

Módulo de Elasticidad (Ec) - 33%F'c			Módulo de Elasticidad (Ec) - 40%F'c		
Kg/cm ²	Mpa	PSI	Kg/cm ²	Mpa	PSI
201,135	20,113.5	2,873,360	199,055	19,905.5	2,843,646
221,003	22,100.3	3,157,180	221,926	22,192.6	3,170,369
260,194	26,019.4	3,717,061	258,512	25,851.2	3,693,028

Figura 115. Variables consideradas en (MR) y (F'c) a las mezclas estudiadas – b.
Fuente: Elaboración propia

$$\log_{10} W_{82} = Z \cdot S_o + 7,35 \log_{10} (D+25,4) - 10,39 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5-1,5} \right]}{1 + \frac{1,25 \times 10^{19}}{(D+25,4)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 P_i) \times \log_{10} \left[\frac{Mr C_{dx} (0,09 D^{0,75} - 1,132)}{1,51 \times J \left[0,09 D^{0,75} - \frac{7,38}{(E_c/k)^{0,25}} \right]} \right]$$

En donde:

W_{82} : Número previsto de ejes equivalentes de 8,2 t (18.000 libras o 82 kN), a lo largo del periodo de diseño.

Z : Desviación normal estándar.

S_o : Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento.

D : Espesor del pavimento de concreto (en mm).

ΔPSI : Diferencia entre los índices de servicio inicial y final.

P_i : Índice de servicio final.

Mr : Resistencia media del concreto (en MPa) a flexotracción a los 28 días (método de carga en los tercios de la luz).

C_d : Coeficiente de drenaje.

J : Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto, en MPa.

k : Módulo de reacción, dado en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante) en la que se apoya el pavimento de concreto.

Ecuación 13. Formulación original AASHTO
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Figura 116. Ejemplo utilización software ecuación AASHTO
Fuente: Vázquez, L. R. (1993). Versión (2.0) ecuación AASHTO-1993

- La metodología y como ya se mencionó en los numerales 6.5.1 y 6.5.2, solicita la determinación de un módulo de reacción (K) en materiales. Éste, debe considerarse a nivel de piso de fundación o subrasante original compacta mínimo al (95% PM) denominándose como ($K_{Natural}$) – Véase Figura 113 y Tabla 9; y para el afirmado de apoyo - que es donde finalmente reposará el espesor de concreto hidráulico -, se le denominará módulo de reacción compuesto ($K'_{Natural+BG}$) – Véase Figura 117 y Tabla 10.

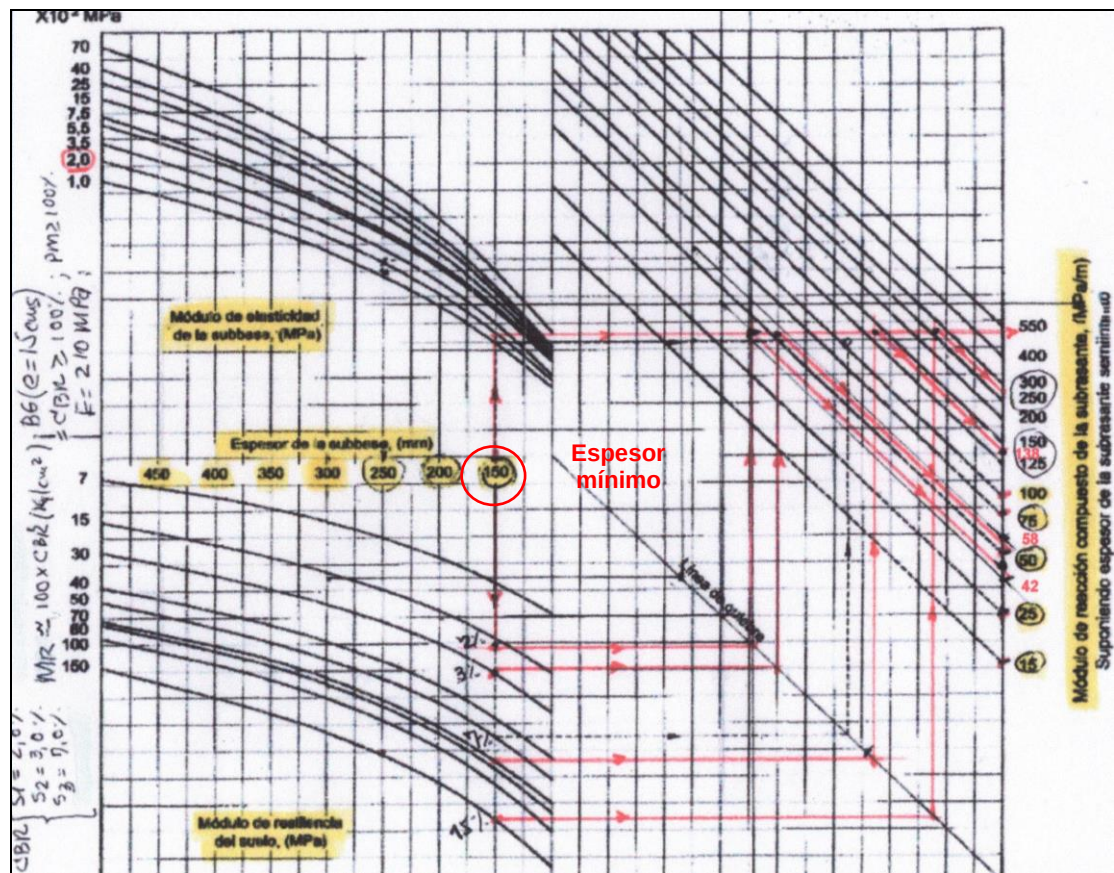


Figura 117. Módulo de reacción compuesto subrasante + granular ($K'_{Natural+BG}$)
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Tabla 10. Valores de módulo de reacción compuesto ($K'_{Natural+BG}$)

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Resiliente BG (Kg/cm ²) - PSI	(2000) 140	(2000) 140	(000) 140
Módulo Reacción ($K'_{Natural+BG}$) MPa/m (PCI)	42 (154)	58 (213)	138 (506)

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, con estos valores se deben corregir sus cifras por una pérdida de soporte denominada (LS) objeto del material y calidad final erosiva sobre el que se apoyarán finalmente las losas de hormigón. A esta variable se le denominará ($K''_{Corregido LS}$) – Véase Figuras 118 a 119 y Tabla 11 respectivamente.

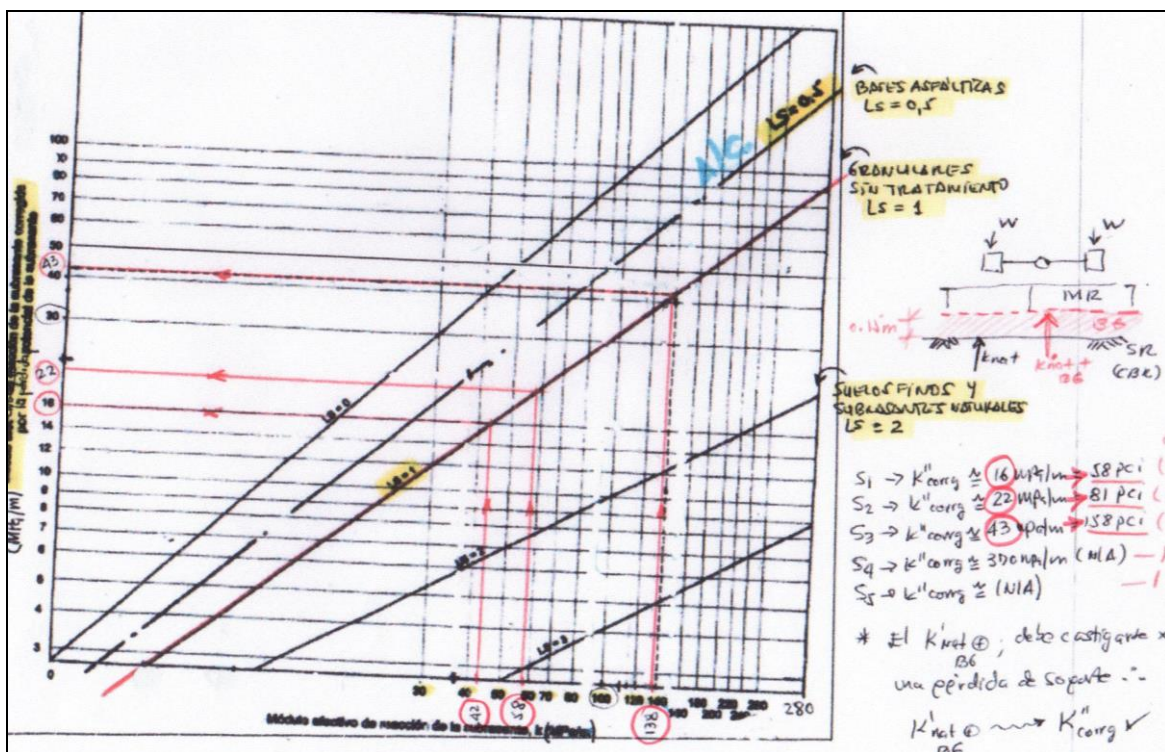


Figura 118. Módulo de reacción corregido por pérdida de soporte (LS) ($K''_{Corregido}$)
 Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Tabla 11. Valores de módulo de reacción corregido ($K''_{Corregido \text{ LS}}$)

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Reacción ($K'_{Natural+BG}$) MPa/m (PCI)	42 (154)	58 (213)	138 (506)
Módulo Reacción ($K''_{Corregido}$) MPa/m (PCI)	16 (58)*	22 (81)*	43 (158)*

Fuente: Elaboración propia

El valor (LS) asumido correspondió a la unidad (1.0) – *materiales granulares sin tratar* (Mr : de 1000 a 3000 Kg/cm^2). Estos últimos valores*, son los que se ingresarán finalmente al software para la modelación de las alternativas de pavimento.

Tipos de sub base o base	Factor de pérdida de soporte
Sub bases granulares tratadas con cemento (Mr: de 7000 a 14000 Mpa)	0,00 a 1,00
Sub bases tratadas con cemento (Mr: de 3500 a 7000 Mpa)	0,00 a 1,00
Bases asfálticas (Mr: de 2500 a 7000 Mpa)	0,00 a 1,00
Sub bases estabilizadas con asfaltos (Mr: de 300 a 2000 Mpa)	0,00 a 1,00
Estabilización con cal (Mr: de 150 a 1000 Mpa)	1,00 a 3,00
Materiales granulares sin tratar (Mr: de 100 a 300 Mpa)	1,00 a 3,00
Suelos finos y sub rasantes naturales (Mr: de 20 a 300 Mpa)	2,00 a 3,00

Figura 119. Valores de pérdida de soporte (LS) gráfica por tipo de material
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

- Para esta modelación, no se consideró ninguna *condición de efecto berma* – Véase Figura 113, más sí, los pasadores de transferencia de carga por las condición físicas asumidas para una obra en espacio confinado (Bordillos, andenes y canastillas o pasadores de tapón) – Véase Figura 120 y Fotografía 11 respectivamente.

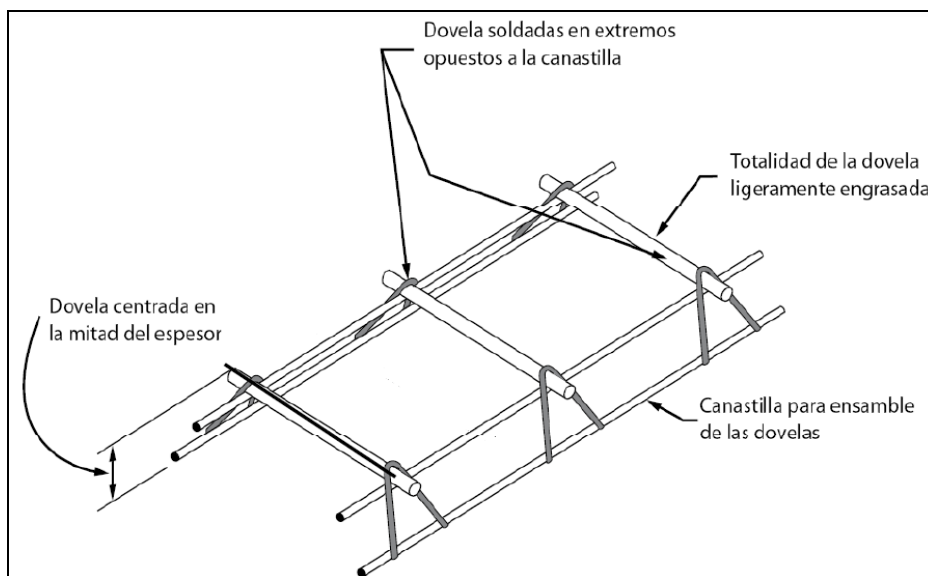


Figura 120. Transferencia de carga por canastillas
Fuente: ACI (2010) Committee 360R-10. Design of slabs on ground. EUA

- Ahora bien, la metodología exige la adopción de un nivel de confiabilidad (R) un el tipo de vía a considerar para uso y nivel de servicio – Véase Figura 124. Para nuestro caso, se estableció un porcentaje ($R=85\%$), que correspondientemente asume una cuantía en desviación normal estándar ($Z_r=-1,037$) – Véase Figura 122 y un error estándar combinado ($S_o=0.35$) para un pavimento en construcción nueva – Véase Figura 123.



Fotografía 11. Condición de confinamiento – no condición de berma
Fuente: Elaboración propia

La incorporación de la confiabilidad en la metodología se fundamenta en un posible cambio del nivel tráfico a lo largo del periodo de diseño, o habidas reparaciones que sufrirá el pavimento por defectos y daños en el proceso constructivo y abandonos en etapas de mantenimiento.

El nivel de confiabilidad (R), trata el efecto combinado del grado de seguridad y la desviación normal estándar (Zr), cuyo producto es sumado directamente al logaritmo del tránsito en la ecuación mostrada en la Ecuación 13. La desviación normal estándar (Zr) tiene en cuenta la variación en el comportamiento del pavimento y el rango recomendado fue obtenido del ensayo AASHO originalmente.

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Carreteras de primer orden	80 – 99	75 – 95
Carreteras secundarias	80 – 95	75 – 95
Caminos vecinales	50 – 80	50 – 80

Figura 121. Nivel de confiabilidad (R) en función del tipo de vía
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Si se usa una desviación estándar (Zr) diferente a las recomendadas (No quiero decir que no se pueda usar), se pueden obtener “*Factores de seguridad*” para diferentes confiabilidades, los cuales se encuentran tabulados en la Tabla 12. Para el caso en estudio, no existió aplicabilidad alguna al respecto.

Confiabilidad R, %	Desviación normal estándar Z_r
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Figura 122. Valores de (Z_r) en función del nivel de confiabilidad (R)
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Pavimento rígido So	0.30 - 0.40
Pavimento nuevo	0.35
sobrecapa	0.40

Figura 123. Valores del error estándar combinado (S_o) pavimentos
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Tabla 12. Factores de seguridad para nivel de confianza

R (%)	F.S.
50	1.0
60	1.3
70	1.7
80	2.4
90	3.8
95	5.5
96	6.1
97	7.0
98	8.4
99	11.1
99.9	24.6

Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Como se observa, para confiabilidades mayores al ($R=80\%$) se obtienen factores de seguridad altos, incluso mayores a los usados por ejemplo en el diseño de estructuras de contención en taludes, las cuales normalmente tienden a tener fallas súbitas, mientras los pavimentos presentan fallas de tipo progresivo en su período de servicio.

- También la metodología estima el famoso “Nivel de serviciabilidad” ($\Delta PSI = P_o - P_f$), que consiste en definir oportunamente cualquier tipo de intervención, rehabilitación, refuerzo o reconstrucción en el pavimento durante su etapa de operación. Con base en las recomendaciones establecidas por la misma metodología, se taso un valor de serviciabilidad inicial en ($P_o=4,5$) que es lo normal para un pavimento tipo rígido, y su serviciabilidad final en ($P_f=2,5$) para el tránsito considerado y que vamos a sustentar más adelante – Véase Figura 124.

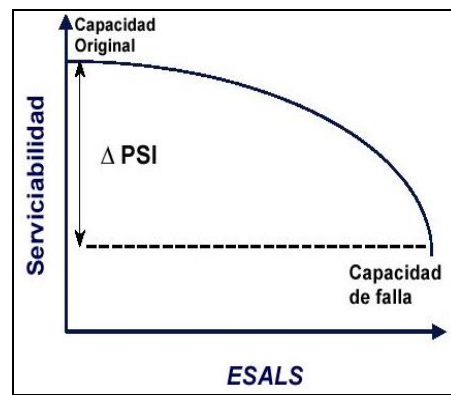


Figura 124. Nivel de serviciabilidad

Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

- El parámetro de módulo de elasticidad (E_c) y módulo de rotura (S_c), se fijan de acuerdo a los requisitos ya establecidos y sustentados en las Figuras 117 y 118 respectivamente.
- Debido a que se consideró el sistema de transferencia de carga por canastillas, la metodología define un coeficiente aritmético (J) para este tipo de variable – Véase Figura 125. Igualmente deberán ser estipuladas unas mínimas condiciones de drenaje (C_d); valores introducidos para tener en cuenta la capacidad del pavimento de concreto hidráulico a la transmisión de cargas entre paños por medio de sus discontinuidades a nivel de sus juntas de construcción; y la segunda y última, la calidad del drenaje determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada, así como el porcentaje en tiempo sobre el cual el pavimento de concreto hidráulico está expuesto a niveles de humedad aproximándose a la saturación – Véase Figura 126.

	hombro			
	Elemento de transmisión de carga			
	Concreto asfáltico		Concreto hidráulico	
Tipo de pavimento	si	no	si	no
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
Reforzado continuo	2.9 – 3.2	-----	2.3 – 2.9	-----

Figura 125. Valores de coeficiente de transmisión de carga
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Calidad del drenaje	P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Figura 126. Valores de coeficiente de drenaje
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Para este caso, se asumió un valor ($J=3.6$) por la condición de no estipular bermas y aportar efecto transferente en los pasadores, construcción parcial no reforzada o reforzada con juntas y el aporte brindado por la trabazón de agregados (Caras fracturadas) en los hormigones calculados. El coeficiente de drenaje (C_d), se asumió por igual un valor de (1.0), soportado en condiciones de calidad de drenaje exterior bueno y evacuación de aguas antes de (24) horas.

- Tránsito de diseño

Para la aplicación de este método se asumirá el mínimo umbral clasificatorio para un nivel de tránsito tipo NT-1 y NT-3 ($NEE=5E+06$), según enfoque normativo INVÍAS-2013, Artículo 100 – Véase Figura 127.

Tabla 100 - 1. Niveles de Tránsito	
NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT3	$N_{80kN} > 5.0$

Figura 127. (Tabla 100-1). Niveles de tránsito
Fuente: INVÍAS (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
Artículo 100. Colombia

De la misma manera son tenidos en cuenta los criterios técnicos mostrados en las Figuras 3 y 4, además del nivel considerado en el numeral 6.5 de la presente investigación. Se establece de igual forma, que el número de carriles en cada dirección es de uno, y por ende, el tránsito que se asume toma en cuenta el (100%) de circulación que pasa por el carril de diseño del total del tránsito estimado – Véase Figura 128.

No. carriles en cada dirección	Porcentaje de ejes simples equivalentes de 18 kips en el carril de diseño (F_c)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 ó más	50 – 75

Figura 128. Porcentaje de ejes simples (8.2 Ton) por el carril de diseño
Fuente: AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures – 1993

Finalmente, se mantendrán los lineamientos considerados en este materia por el del total del tránsito estimado y también establecido en el “Manual de Diseño de Pavimentos Rígidos para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito – INVÍAS-ICPC-2008 (Categorías To y T2 para un tránsito promedio diario estimado en TPD=200 y 1000 veh/día)” – Véase Figura 129.

Categoría	Tipo de Vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2 t
T ₀	(Vt) – (E)	0 a 200	< 1'000.000
T ₁	(Vs) – (M ó A) – (CC)	201 a 500	1'000.000 a 1'500.000
T ₂	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	501 a 1.000	1'500.000 a 5'000.000
T ₃	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	1.001 a 2.500	5'000.000 a 9'000.000
T ₄	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	2.501 a 5.000	9'000.000 a 17'000.000
T ₅	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	5.001 a 10.000	17'000.000 a 25'000.000
T ₆	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	Más de 10.001	25'000.000 a 100'000.000

Tabla 3-1. Categorías de tránsito para la selección de espesores

Figura 129. (Tabla 3-1). Categorías de tránsito para la selección de espesores
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
ISBN: 978-958-97411-8-4

Cuando se modele el análisis por sensibilidad en metodología “PCA-1984”, allí no se pueden considerar ejes equivalentes de carga (8.2 Ton = 80 KN = 18 kips), sino que se deben transformar a “Repeticiones de carga” por eje patrón para el camión diseño tipo (C₂G) así establecidos – Véase Figuras 3 a 4, y Tabla 13 respectivamente.

Este vehículo posee un eje delantero de (8 Ton) y un trasero de (11 Ton), que al requerirlos en estas solicitudes, deberán dividirse sus ejes equivalentes por su respectivo factor daño (Fd).

Tabla 13. Repeticiones esperadas según nivel de tránsito asumido (T0-T2)

NEE (500.000) Ejes 8.2 Ton	Eje Carga (Ton)	Factor Daño Camión C ₂ G	Repeticiones Esperadas Asumidas
	Simple (80 KN)	2.90	173.000
	Tándem (220 KN)		173.000
	Trídem (240 KN)		-
NEE (5E+06) Ejes 8.2 Ton	Eje Carga (Ton)	Factor Daño Camión C ₂ G	Repeticiones Esperadas Asumidas
	Simple (80 KN)	2.90	1'.724.000
	Tándem (220 KN)		1'.724.000
	Trídem (240 KN)		-

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de la aplicación al modelo “AASHTO-1993”, se obtuvieron las siguientes estructuras – Véase Anexo J, Figuras 130 a 133 y Tablas 14 a 16 respectivamente.

Losa Concreto Hidráulico MR=3.8-4.0-4.2 MPa	Ver Figuras 134 a 136 Anexo J	Módulo Reacción (K'' Corregido) (PCI = Lb/ft³) 58-81-158
Base Granular Clase A BG-38 o 25 Gradación Fina CBR>100%-100% PM	15 cms	
Subrasante de Fundación CBR (2%-3%-7%) al (95% PM)		

Figura 130. Esquemática estructural modelación pavimentos AASHTO-1993

Fuente: Elaboración propia

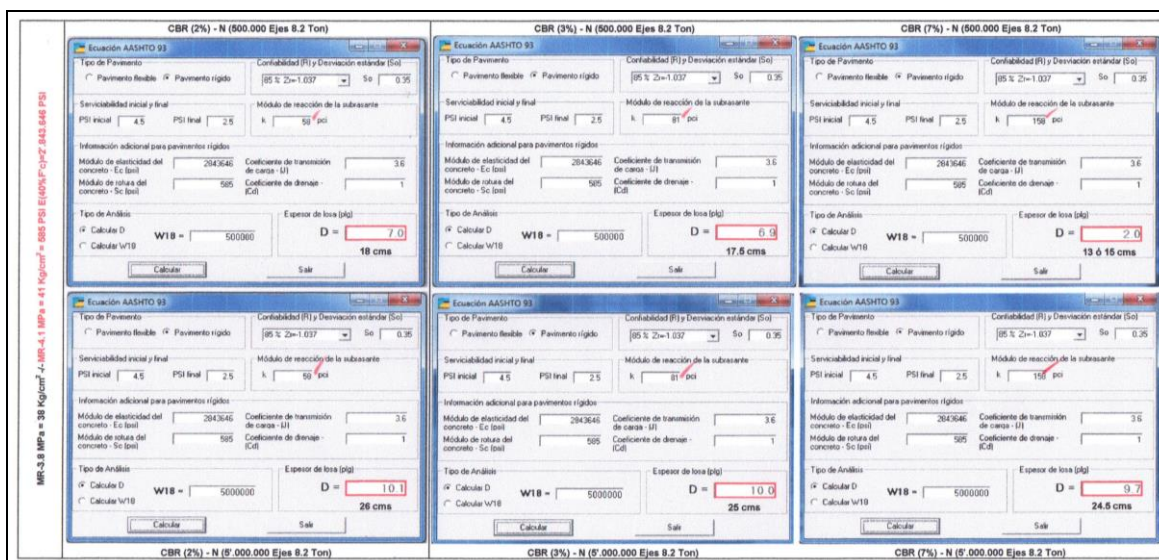


Figura 131. Espesores de concreto MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

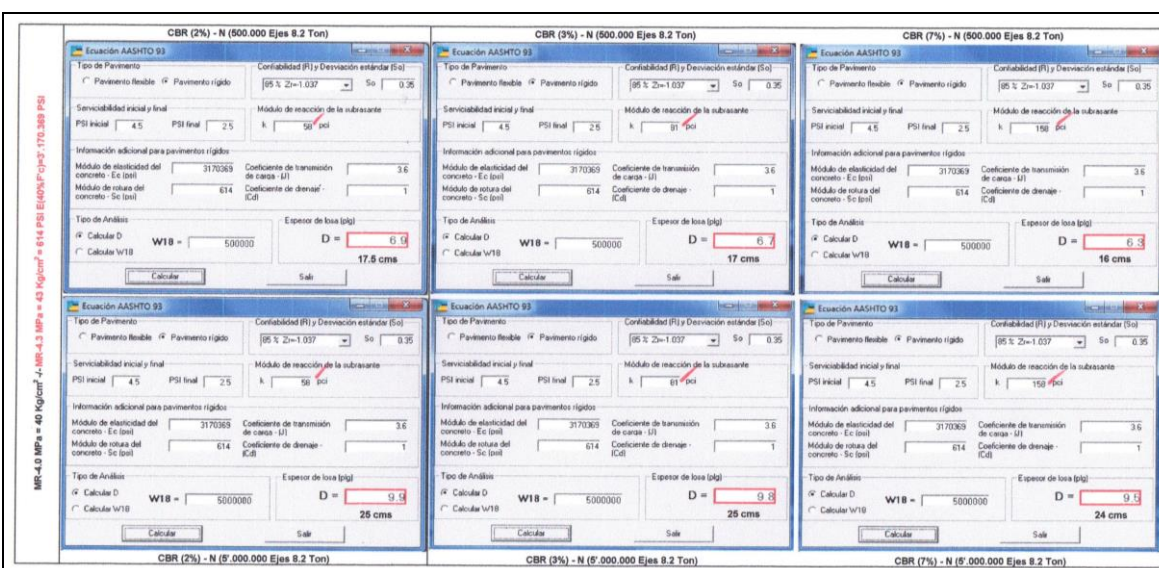


Figura 132. Espesores de concreto MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

MR-4.2 MPa = 42 Kg/cm² - MR-4.5 MPa = 45 Kg/cm² = 642 PSI Ecuación 93 = 583.028 PSI

CBR (2%) - N (500.000 Ejes 8.2 Ton)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: ☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiablez (R) y Desviación estándar (So): [95 % 2σ=1.037] So [5σ 0.35]

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial [4.5] PSI final [2.5] k [50 psi]

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (ksi) [360000] Coeficiente de transmisión de carga - U₁ [3.6]

Módulo de ruptura del concreto - f_c (ksi) [642] Coeficiente de diseño - IC_D [1]

Tipo de Análisis: ☒ Calcular D ☐ Calcular W₁₈

Espesor de losa [pulg] D = [6.7] 17 cms

CBR (3%) - N (500.000 Ejes 8.2 Ton)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: ☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiablez (R) y Desviación estándar (So): [95 % 2σ=1.037] So [5σ 0.35]

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial [4.5] PSI final [2.5] k [81 psi]

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (ksi) [360000] Coeficiente de transmisión de carga - U₁ [3.6]

Módulo de ruptura del concreto - f_c (ksi) [642] Coeficiente de diseño - IC_D [1]

Tipo de Análisis: ☒ Calcular D ☐ Calcular W₁₈

Espesor de losa [pulg] D = [6.6] 17 cms

CBR (7%) - N (500.000 Ejes 8.2 Ton)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: ☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiablez (R) y Desviación estándar (So): [95 % 2σ=1.037] So [5σ 0.35]

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial [4.5] PSI final [2.5] k [158 psi]

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (ksi) [360000] Coeficiente de transmisión de carga - U₁ [3.6]

Módulo de ruptura del concreto - f_c (ksi) [642] Coeficiente de diseño - IC_D [1]

Tipo de Análisis: ☒ Calcular D ☐ Calcular W₁₈

Espesor de losa [pulg] D = [6.2] 16 cms

CBR (2%) - N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: ☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiablez (R) y Desviación estándar (So): [95 % 2σ=1.037] So [5σ 0.35]

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial [4.5] PSI final [2.5] k [50 psi]

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (ksi) [360000] Coeficiente de transmisión de carga - U₁ [3.6]

Módulo de ruptura del concreto - f_c (ksi) [642] Coeficiente de diseño - IC_D [1]

Tipo de Análisis: ☒ Calcular D ☐ Calcular W₁₈

Espesor de losa [pulg] D = [9.7] 24.5 cms

CBR (3%) - N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: ☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiablez (R) y Desviación estándar (So): [95 % 2σ=1.037] So [5σ 0.35]

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial [4.5] PSI final [2.5] k [81 psi]

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (ksi) [360000] Coeficiente de transmisión de carga - U₁ [3.6]

Módulo de ruptura del concreto - f_c (ksi) [642] Coeficiente de diseño - IC_D [1]

Tipo de Análisis: ☒ Calcular D ☐ Calcular W₁₈

Espesor de losa [pulg] D = [9.7] 24.5 cms

CBR (7%) - N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton)

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento: ☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiablez (R) y Desviación estándar (So): [95 % 2σ=1.037] So [5σ 0.35]

Serviciabilidad inicial y final: PSI inicial [4.5] PSI final [2.5] k [158 psi]

Información adicional para pavimentos rígidos:

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (ksi) [360000] Coeficiente de transmisión de carga - U₁ [3.6]

Módulo de ruptura del concreto - f_c (ksi) [642] Coeficiente de diseño - IC_D [1]

Tipo de Análisis: ☒ Calcular D ☐ Calcular W₁₈

Espesor de losa [pulg] D = [9.3] 23.5 cms

Figura 133. Espesores de concreto MR-4.2 MPa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Resumen de espesores MR-3.8 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Reacción (K'' _{Corregido}) MPa/m (PCI)	16 (58)*	22 (81)*	43 (158)*
NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	180	175	150
NEE	5'000.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	260	250	245

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Resumen de espesores MR-4.0 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Reacción ($K''_{\text{Corregido}}$) MPa/m (PCI)	16 (58)*	22 (81)*	43 (158)*
NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	175	170	160
NEE	5'.000.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	250	250	240

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resumen de espesores MR-4.2 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Reacción ($K''_{\text{Corregido}}$) MPa/m (PCI)	16 (58)*	22 (81)*	43 (158)*
NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	170	170	160
NEE	5'.000.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	245	245	235

Fuente: Elaboración propia

6.5.4.2. Dimensionamiento PCA-1984

- Considera el módulo de reacción de la subrasante original (K), una capa granular de aporte, las repeticiones de carga y los criterios de esfuerzo (Fatiga) y erosión admisibles (Bombeo).
- El método de diseño de la PCA, hace las siguientes consideraciones:
 - ✓ Provisión de una subrasante o afirmado granular de soporte (Tipo base o subbase granular) razonablemente uniforme seleccionando materiales y control a la densificación.
 - ✓ Prevención del efecto “Bombeo” cuando el tránsito previsto y las condiciones del suelo lo hagan necesario – Véase Fotografía 12.



Fotografía 12. Efecto “Bombeo” en un pavimento de concreto
Fuente: Elaboración propia

- ✓ Distribución de juntas para controlar adecuadamente las tensiones provocadas por la restricción al alabeo y por el desplazamiento de las losas denominado “Grado de transferencia de carga”.
 - ✓ Adopción de un espesor que permita mantener las tensiones que provocan las cargas del tránsito, por debajo de las admisibles.
 - ✓ Como se mencionó, para el diseño de la estructura de pavimento rígido son considerados los criterios de la resistencia a la flexotracción del concreto hidráulico medido en su módulo de rotura (MR), la resistencia efectiva de la subrasante (K_{Natural}) y el módulo de reacción del paquete granular conjunto ($K'_{\text{Natural+BG}}$) en donde se apoyarán las losas de hormigón. Espesor de base granular (15 cms). Estos parámetros se limitan por los efectos de la deflexión del pavimento en los bordes, sus juntas y las esquinas perimetrales asumiendo el trabajo de no condición por bermas más el aporte brindado por un sistema de transferencia de carga eficaz.
- Criterios de Diseño:

Período de Diseño	=	Normalmente a (20) años
Criterio de Fatiga	=	Acción repetida de cargas ($\leq 100\%$)
Criterio de Erosión	=	Falla por pérdida soporte ($\leq 100\%$)
Tipo de Pavimento	=	Sin bermas, con dovelas de transferencia carga
Tránsito de Diseño	=	Véase Tabla 13.

FS Carga = Las tensiones inducidas en el pavimento de concreto por las cargas de los vehículos en movimiento son menores que las producidas por las mismas cargas cuando el vehículo está estacionado o transita a baja velocidad; por lo que es necesario considerar un factor de seguridad con respecto a las cargas asumidas. En la Figura 134, se presentan los valores de dicho factor, que para nuestro caso se estableció en un valor aritmético de (1,0).

FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGAS	CASOS
1,2	Calles del sistema de tránsito general con alto volumen de tránsito pesado en condiciones de flujo interrumpido.
1,1	Calles del sistema arterial mayor con moderado volumen de tránsito de camiones
1,0	Calles de los sistemas colector y local que soporten un tránsito reducido de camiones

Figura 134. Factores de mayoración y seguridad de cargas
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, mediosy altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
ISBN: 978-958-97411-8-4

Módulo Reacción (K_{Natural}) = Se estipularon para la subrasante original según los CBR seleccionados, los valores establecidos en la Tabla 9.

Módulo Combinado ($K'_{\text{Natural+BG}}$) = Se estipularon para las subrasantes originales, los valores fijados en la Figura 135. Acá en esta variable es donde se diferencia con la metodología AASHTO-1993 – Véase Tabla 17, y tampoco se castiga por pérdida de soporte (LS). La base granular ($\text{CBR} \geq 100\% - 100\% \text{PM}$).

Valor de k para subrasante		Valor de k para la base							
		100 mm		150 mm		225 mm		300 mm	
MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³	MPa/m	Lb/pulg ³
18	73	23	85	26	96	32	117	38	140
28	147	45	165	35	180	57	210	66	245
48	220	64	235	55	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

Tabla 2-15. Influencia del espesor de la base granular en el valor de k

Figura 135. (Tabla 2-15). Influencia del espesor de la base granular en el valor (K')
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
ISBN: 978-958-97411-8-4

Tabla 17. Valores de módulo de reacción combinado ($K'_{\text{Natural+BG}}$)

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Resiliente (Kg/cm ²) - PSI	(200) 2857	(300) 4286	(700) 10000
Módulo Reacción (K_{Natural}) MPa/m (PCI)	18 (66)	28 (102)	48 (172)
Módulo Reacción ($K'_{\text{Natural+BG}}$) MPa/m (PCI)	23 (85)	35 (146)	55 (203)

Fuente: Elaboración propia

Concreto Hidráulico = Véase Figuras 117 y 118.
Transmisión Carga = Sí. Trabazón de agregados (Caras fracturadas) y canastillas de transferencia de carga.
Efecto Bombeo = Recomendaciones PIARC – Véase Figura 136.
Para nuestro caso, no tuvimos en cuenta ningún índice para afectación del consumo en erosión.

Al material granular de apoyo (Base granular) se le consideran los mismos requisitos técnicos que se postularon para el modelamiento AASHTO-1993 (Base granular clase A tipo BG-38 o 25, gradación fina CBR $\geq$ 100%-100% PM).

Para la modelación se realizó un análisis por cada subrasante, nivel de tránsito y resultados real en las mezclas de concreto, utilizando para ello la ayuda del software desarrollado por la Universidad del Cauca y referenciado en el numeral 6.5.4 de la presente investigación – Véase Figuras 137 a 138.

Como resultado de la aplicación, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las Tablas 18 a 20, Figura 139 y Anexo J respectivamente.

Clase de erodabilidad	Descripción del material	Indices recomendados para evaluar el potencial de erosión
A	Concreto pobre con 8% de cemento; concreto bituminoso con 6% de cemento asfáltico o capas permeables y drenantes	0,5-1,5
B	Material granular tratado con cemento con 5% de cemento manufacturado en planta; material granular tratado con bitúmen con 4% de cemento asfáltico.	1,5-2,5
C	Material granular tratado con 3,5% de cemento manufacturado en planta; material granular tratado con bitúmen con 4% de cemento asfáltico.	2,5-3,5
D	Material granular tratado insitu con 2,5% de cemento y/o suelos tratados.	3,5-4,5
E	Material granular no tratado	4,5-5,5
-	Sin base	5,5-7,5

Figura 136. Recomendaciones sobre erosión potencial de materiales soporte
Fuente: PIARC (2000). Permanent International Association of Road Congresses. Improved prediction models for PPR – Pavement Performance Related. Volume I: Final report. FHWA-RD-00-130, p. 54-55. EUA



Figura 137. Software BS-PCA – a.
Fuente: Solano, E. Benavides, C. (2010). Diseño de pavimentos rígidos por el método de la PCA. Version 1.3. Universidad del Cauca: Popayán. Colombia

Figura 138. Software BS-PCA – b.

Fuente: Solano, E. Benavides, C. (2010). Diseño de pavimentos rígidos por el método de la PCA. Version 1.3. Universidad del Cauca: Popayán. Colombia

Losa Concreto Hidráulico MR=3.8-4.0-4.2 MPa	Ver Tablas 17 a 19 Anexo J	Módulo Reacción (K' Natural+BG) (MPa/m) 23-35-55
Base Granular Clase A BG-38 o 25 Gradación Fina CBR>100%-100% PM	15 cms	
Subrasante de Fundación CBR (2%-3%-7%) al (95% PM)		

Figura 139. Esquemática estructural modelación pavimentos PCA-1984

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resumen de espesores (FM=1) MR-3.8 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Reacción ($K'_{\text{Natural+BG}}$) MPa/m (PCI)	23 (85)	35 (146)	55 (203)
NEE	173.000 repeticiones c/u		
Espesor losa (mm)	225	205	185
[%Fatiga] (%Erosión)	[85] (11)	[74] (16)	[90] (27)
NEE	1'724.000 repeticiones c/u		
Espesor losa (mm)	250	225	215
[%Fatiga] (%Erosión)	[49] (52)	[53] (81)	[0] (84)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Resumen de espesores (FM=1) MR-4.0 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Reacción ($K'_{\text{Natural+BG}}$) MPa/m (PCI)	23 (85)	35 (146)	55 (203)
NEE	173.000 repeticiones c/u		
Espesor losa (mm)	215	195	180
[%Fatiga] (%Erosión)	[90] (16)	[89] (24)	[70] (34)
NEE	1'.724.000 repeticiones c/u		
Espesor losa (mm)	235	220	215
[%Fatiga] (%Erosión)	[98] (82)	[21] (95)	[0] (84)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resumen de espesores (FM=1) MR-4.2 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
Módulo Reacción ($K'_{\text{Natural+BG}}$) MPa/m (PCI)	23 (85)	35 (146)	55 (203)
NEE	173.000 repeticiones c/u		
Espesor losa (mm)	210	190	175
[%Fatiga] (%Erosión)	[64] (18)	[68] (29)	[57] (42)
NEE	1'.724.000 repeticiones c/u		
Espesor losa (mm)	230	220	215
[%Fatiga] (%Erosión)	[48] (95)	[0] (95)	[0] (84)

Fuente: Elaboración propia

6.5.4.3. Dimensionamiento manual ICPC-INVÍAS-2008

Otra forma de chequeo *muy conservadora y de ágil tanteo*, es la utilizada con ayuda del “Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito” cuyos autores son los Ings. Cipriano A. LONDOÑO N. y Jorge A. ÁLVAREZ, auspiciados por el MINISTERIO DEL TRANSPORTE, INVÍAS e ICPC en el año 2008 – Véase Figura 140 y Anexo J respectivamente.

Alcance:

- El manual está orientado hacia el diseño de pavimentos de concreto hidráulico para carreteras de diversa índole, desde caminos rurales hasta vías de primer orden. Otras aplicaciones son la pavimentación de vías urbanas, parqueaderos, pisos industriales, muelles, vías y aeropuertos que están por fuera de su alcance.
- El objetivo del manual es el de establecer un catálogo de diseño de estructuras en función de las variables más importantes que inciden en la determinación de los espesores y calidades de las capas.
- Este catálogo está constituido sobre la base de los métodos definidos por la “Portland Cement Association – PCA-1984” y la “American Association of State Highway And Transportation Officials – AASHTO-1993”.
- En el diseño del pavimento es necesario tener en cuenta varios elementos, de los cuales los más importantes son la capacidad portante del suelo, el tránsito de diseño, condiciones climáticas y materiales constituyentes.

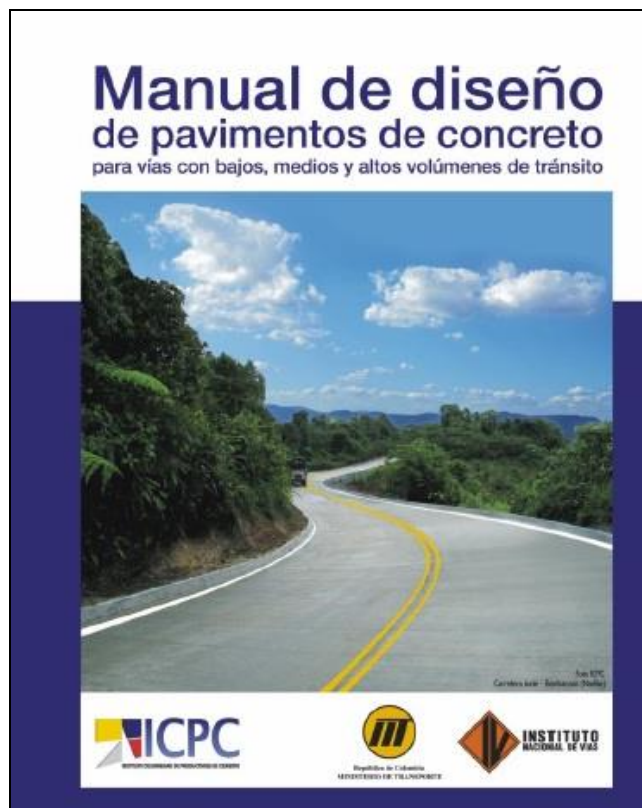


Figura 140. Manual ICPC-INVÍAS-2008

Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia

ISBN: 978-958-97411-8-4

Se presenta de manera sucinta, la descripción de cada variable tenida en cuenta para los análisis y elaboración del mencionado catálogo:

- ✓ El tránsito y el período de diseño.
- ✓ La calidad de la subrasante de fundación.
- ✓ El material de soporte en donde se apoyará finalmente las losas.
- ✓ Las características de la mezcla hidráulica.
- ✓ Las juntas de construcción.
- ✓ La transferencia de carga entre losas y confinamiento lateral.

Allí muy fácilmente y basados en las Figuras 141 a 142 mostradas igualmente en el Anexo J, se depura en función de la clasificación de la subrasante, el nivel del tránsito de diseño, la resistencia a la flexo-tracción (MR) del hormigón y el material soporte en donde descansará el pavimento de concreto hidráulico (Base granular de espesor ≥ 150 mm con igual calidad a la enunciada en las metodologías AASHTO-1993 y PCA-1984 respectivamente), la selección de un espesor final de diseño para el hormigón del pavimento de concreto hidráulico en condición de transferencia de carga y no constitución de bermas.

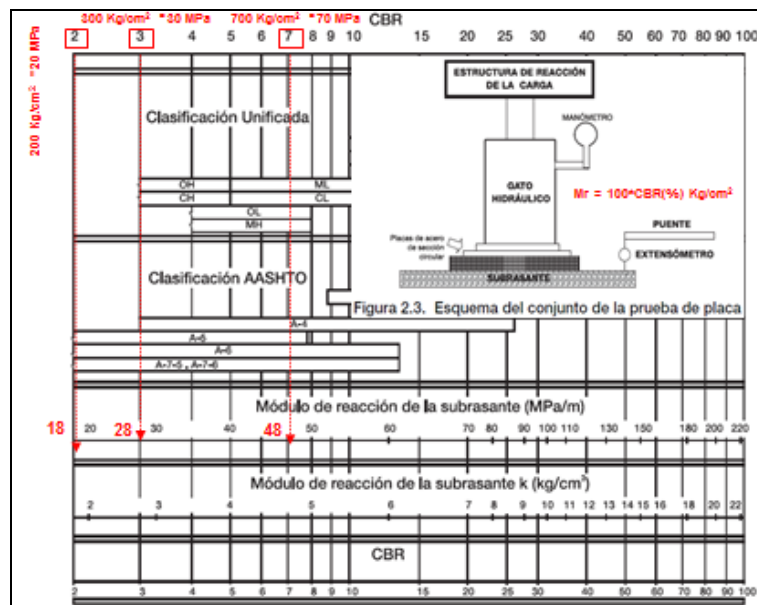


Tabla 2-12. Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K

Consideraciones sobre pavimentos especiales

En Colombia se tiene una gran tradición en la construcción de pavimentos de concreto en prácticamente cualquiera de sus aplicaciones, desde pisos industriales, en bodegas para el almacenamiento de cargas livianas hasta grandes áreas para el manejo de contenedores; pasando por la adecuación de los pisos de viviendas, ciclovías, andenes, pavimentos urbanos, pavimentos rurales, autopistas y en fin en cuanto posibilidad exista.

Los espesores dados en este manual están dirigidos a la pavimentación de vías solicitadas por vehículos con llantas neumáticas, dispuestas en los ejes indicados en el capítulo referente al tránsito, por lo tanto pavimentos que han de ser solicitados por otro tipo de vehículo requieren que se diseñen teniendo en cuenta las particulares de dichos vehículos.

En la literatura técnica se consiguen cartas, nomogramas y manuales para calcular el espesor de las losas para prácticamente cualquiera de los vehículos y para los medios para el manejo y almacenamiento de cargas en forma de arrumes, estanterías o contenedores.

En general se recomienda que el espesor de cualquier losa para pavimentos de concreto no tenga menos de 13 cm de espesor y que la longitud de las losas no sea mayor a 25 veces el espesor ni mayor a 1,3 veces el ancho de la misma.

Cuando se tengan pavimentos con más de 30 cm de espesor es necesario tener en cuenta que los procesos constructivos son más exigentes, que es necesario poner más atención durante la colocación y vibrado del concreto, además del aserrado de las juntas,

Figura 141. Módulo reacción subrasante y consideraciones especiales diseño
 Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías
 con bajos, mediosy altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
 ISBN: 978-958-97411-8-4

Clase o Tipo	CBR (%)	Módulo resiliente (kg/cm ²)
S1	Min 2%	< 2
S2	Prom 3%	2 - 5
S3	Prom 7%	5 - 10
S4		20 - 10
S5		> 20
		> 2,000

Tabla 3-2. Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia.

Denominación	Descripción
SN	Subrasante Natural
BG	Base Granular
BEC	Base Estabilizada con Cemento

Tabla 3-3. Clasificación de los materiales de soporte para el pavimento de concreto.

Descripción	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)
MR1	38
MR2	40
MR3	42
MR4	45

Tabla 3-4. Valores de resistencias a la flexotracción del concreto (Módulo de rotura).

Categoría	Tipo de Vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2 t
T0	(V) - (E)	0 a 200	500.000 < 1.000.000
T1	(Vs) - (M ó A) - (CC)	201 a 500	1.000.000 a 1.500.000
T2	(Vp) - (A) - (AP-MC-CC)	501 a 1.000	1.500.000 a 5.000.000
T3	(Vp) - (A) - (AP-MC-CC)	1.001 a 2.500	5.000.000 a 9.000.000
T4	(Vp) - (A) - (AP-MC-CC)	2.501 a 5.000	9.000.000 a 17.000.000
T5	(Vp) - (A) - (AP-MC-CC)	5.001 a 10.000	17.000.000 a 25.000.000
T6	(Vp) - (A) - (AP-MC-CC)	Más de 10.001	25.000.000 a 100.000.000

Tabla 3-1. Categorías de tránsito para la selección de espesores

En la Tabla 3-1 las siglas tienen el siguiente significado:

M: Medias
Vt: Vía terciaria
A: Anchas
Vs: Vía secundaria
CC: Carreteras de 2 direcciones
Vp: Vía principal
MC: Carreteras multicariles
E: Estrechadas
AP: Autopistas

Denominación	Descripción
D	Dovelas
B	Bermas
No D	No Dovelas
No B	No Bermas

Tabla 3-5. Denominación del sistema de transferencia de cargas y confinamiento lateral

Variables y su representación				
Suelos	Tránsito	Transferencia y confinamiento	Soporte	Concreto
S1 (CBR<2)	T0 (EALS <1x10 ⁷)	D y B (Dovelas y Bermas)	SN (Subrasante)	MR1=38 MPa
S2 (2<CBR<5)	T1 (1x10 ⁷ EALS <1,5x10 ⁷)	D y No B (Dovelas y No Bermas)	BG (15 cm BG)	MR2=40 MPa
S3 (5<CBR<10)	T2 (1,5x10 ⁷ EALS <5x10 ⁷)	No D y B (No Dovelas y Bermas)	BEC (15 cm BEC)	MR3=42 MPa
S4 (10<CBR<20)	T3 (5x10 ⁷ EALS <9x10 ⁷)	No D y No B (No Dovelas y No Bermas)		MR4=45 MPa
S5 (CBR>20)	T4 (9x10 ⁷ EALS <17x10 ⁷)			
	T5 (17x10 ⁷ EALS <25x10 ⁷)			
	T6 (25x10 ⁷ EALS <100x10 ⁷)			

Tabla 3-6. Variables consideradas en los análisis de diseño del pavimento

En donde:

Sl: "Clase de suelo con l variando desde 1 hasta 5"	BG: "Base granular"
Tl: "Clase de tránsito con l variando desde 0 hasta 6"	BEC: "Base estabilizada con cemento"
D: "Dovelas"	CBR: "Relación de soporte de California"
B: "Bermas"	EALS: Ejes equivalentes definidos con el procedimiento "Equivalent Axle Load System"
SN: "Suelo natural o subrasante"	

Figura 142. Tablas (3-1, 3-2, 3-3, 3-4, 3-5 y 3-6)
Fuente: INVÍAS-ICPC (2008). Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín. Colombia
ISBN: 978-958-97411-8-4

Como resultado de la aplicación del modelo, se obtuvo la siguiente estructura – Véase Anexo J, Figuras 143 a 151 y Tablas 21 a 23 respectivamente.

S1 = CBR (2%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																					
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T0																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		Dy B	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	Dy B	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	Dy B	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	Dy B	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	Dy B	Dy no B	No Dy B	No Dy no B
SN	MR1			24	28	23	27	23	27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR2			23	27	22	26	22	26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR3			23	26	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR4			21	24	20	24	20	24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR2			22	25	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR3			21	24	20	24	20	24	29	22	19	22	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR4			20	23	19	23	19	23	28	21	18	21	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR1			20	23	19	22	19	22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR2			19	22	19	21	19	21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR3			18	21	18	21	18	21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR4			18	20	17	20	18	20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
		Tránsito T2																			
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S1 = CBR (2%) - To = N (5'.000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 143. Espesor de losa (S1-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

S2 = CBR (3%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																					
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
		Tránsito T0																			
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1			24	28	23	27	23	27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR2			23	27	22	26	22	26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR3			23	26	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR4			21	24	20	24	20	24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR2			22	25	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR3			21	24	20	24	20	24	29	22	19	22	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR4			20	23	19	23	19	23	28	21	18	21	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR1			20	23	19	22	19	22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR2			19	22	19	21	19	21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR3			18	21	18	21	18	21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR4			18	20	17	20	18	20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T2																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S2 = CBR (3%) - T2 = N (5'.000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 144. Espesor de losa (S2-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

S3 = CBR (7%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

6

Consideraciones sobre pavimentos especiales

En general se recomienda que el espesor de cualquier losa para pavimentos de concreto no tenga menos de 13 cm de espesor y que la longitud de las losas no sea mayor a 25 veces el espesor ni mayor a 1,3 veces el ancho de la misma.

El objetivo del manual es el de establecer un catálogo de diseño de estructuras en función de las variables más importantes que inciden en la determinación de los espesores y calidades de las capas. Ese catálogo se construye con base en los métodos de diseño más conocidos en el país como son el de la Portland Cement Association -PCA- versión 1984 (Ref. 7.20) y el de la American Association of State Highway And Transportation Officials -AASHTO- versión 1993 (Ref. 7.1).

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES

Tránsito T2

		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S3 = CBR (7%) - T2 = N (5'.000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 145. Espesor de losa (S3-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia

S1 = CBR (2%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																					
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T0																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B
SN	MR1			24	28	23	27	23	27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR2			23	27	22	26	22	26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR3			23	26	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR4			21	24	20	24	20	24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR2			22	25	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR3			21	24	20	24	20	24	29	22	19	22	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR4			20	23	19	23	19	23	28	21	18	21	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR1			20	23	19	22	19	22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR2			19	22	19	21	19	21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR3			18	21	18	21	18	21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR4			18	20	17	20	18	20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T2																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S1 = CBR (2%) - T2 = N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 146. Espesor de losa (S1-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

S2 = CBR (3%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																					
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T0																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B
SN	MR1			24	28	23	27	23	27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR2			23	27	22	26	22	26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR3			23	26	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR4			21	24	20	24	20	24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR2			22	25	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR3			21	24	20	24	20	24	29	22	19	22	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR4			20	23	19	23	19	23	28	21	18	21	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR1			20	23	19	22	19	22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR2			19	22	19	21	19	21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR3			18	21	18	21	18	21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR4			18	20	17	20	18	20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T2																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No Dy no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
IEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S2 = CBR (3%) - T2 = N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 147. Espesor de losa (S2-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

S3 = CBR (7%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																					
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T0																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		DyB	Dy no B	No Dy B	No D y no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No D y no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No D y no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No D y no B	DyB	Dy no B	No Dy B	No D y no B
SN	MR1			24	28	23	27	23	27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR2			23	27	22	26	22	26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR3			23	26	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR4			21	24	20	24	20	24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR2			22	25	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR3			21	24	20	24	20	24	29	22	19	22	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR4			20	23	19	23	19	23	28	21	18	21	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR1			20	23	19	22	19	22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR2			19	22	19	21	19	21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR3			18	21	18	21	18	21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR4			18	20	17	20	18	20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T2																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S3 = CBR (7%) - T2 = N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 148. Espesor de losa (S3-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia

S1 = CBR (2%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																									
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																									
Tránsito T0																									
		S1				S2				S3				S4				S5							
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B				
SN	MR1			24	28			23	27	23			27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR2			23	27			22	26	22			26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR3			23	26			21	25	21			25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR4			21	24			20	24	20			24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR1			23	26			22	26	22			26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR2			22	25			21	25	21			25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR3			21	24			20	24	20			24	20	23	20	23	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR4			20	23			19	23	19			23	20	23	20	23	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR1			20	23			19	22	19			22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR2			19	22			19	21	19			21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR3			18	21			18	21	18			21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR4			18	20			17	20	18			20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T2																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S1 = CBR (2%) - T2 = N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 149. Espesor de losa (S1-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

S2 = CBR (3%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																					
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T0																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1			24	28	23	27	23	27	21	24	21	24	20	24	20	24	20	23	20	23
	MR2			23	27	22	26	22	26	20	24	20	24	20	23	20	23	19	22	19	22
	MR3			23	26	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR4			21	24	20	24	20	24	19	22	19	22	18	21	18	21	18	21	18	21
BG	MR1			23	26	22	26	22	26	21	24	21	24	20	23	20	23	20	23	20	23
	MR2			22	25	21	25	21	25	20	23	20	23	19	22	19	22	19	22	19	22
	MR3			21	24	20	24	20	24	29	22	19	22	19	22	19	22	18	21	18	21
	MR4			20	23	19	23	19	23	28	21	18	21	18	21	18	21	17	20	18	20
BEC	MR1			20	23	19	22	19	22	18	21	18	21	18	20	18	20	17	20	17	20
	MR2			19	22	19	21	19	21	17	20	17	20	17	20	17	20	17	19	17	19
	MR3			18	21	18	21	18	21	17	19	17	19	16	19	17	19	16	19	17	19
	MR4			18	20	17	20	18	20	16	19	17	19	16	18	17	18	15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T2																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S2 = CBR (3%) - T2 = N (5'.000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 150. Espesor de losa (S2-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

S3 = CBR (7%) - To = N (500.000 Ejes 8.2 Ton) (0<=TPD<=200) - BG (15 cms) Dovela y No Berma																								
ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																								
		Tránsito T0																						
		S1				S2				S3				S4				S5						
		DyB	Dy noB	NoD yB	NoD y noB	DyB	Dy noB	NoD yB	NoD y noB	DyB	Dy noB	NoD yB	NoD y noB	DyB	Dy noB	NoD yB	NoD y noB	DyB	Dy noB	NoD yB	NoD y noB			
SN	MR1		24	28		23	27	23	27		21	24	21	24		20	24	20	24		20	23	20	23
	MR2		23	27		22	26	22	26		20	24	20	24		20	23	20	23		19	22	19	22
	MR3		23	26		21	25	21	25		20	23	20	23		19	22	19	22		19	22	19	22
	MR4		21	24		20	24	20	24		19	22	19	22		18	21	18	21		18	21	18	21
BG	MR1		23	26		22	26	22	26		21	24	21	24		20	23	20	23		20	23	20	23
	MR2		22	25		21	25	21	25		20	23	20	23		19	22	19	22		19	22	19	22
	MR3		21	24		20	24	20	24		29	22	19	22		19	22	19	22		18	21	18	21
	MR4		20	23		19	23	19	23		28	21	18	21		18	21	18	21		17	20	18	20
BEC	MR1		20	23		19	22	19	22		18	21	18	21		18	20	18	20		17	20	17	20
	MR2		19	22		19	21	19	21		17	20	17	20		17	20	17	20		17	19	17	19
	MR3		18	21		18	21	18	21		17	19	17	19		16	19	17	19		16	19	17	19
	MR4		18	20		17	20	18	20		16	19	17	19		16	18	17	18		15	18	17	18

Tabla 4-1. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T0 como factor principal

ESPESORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																					
Tránsito T2																					
		S1				S2				S3				S4				S5			
		D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B	D y B	D y no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	25	29	25	29	24	28	24	28	22	26	22	26	22	25	22	25	21	25	22	25
	MR2	24	28	25	28	24	27	24	27	22	25	22	25	21	24	22	24	21	24	22	24
	MR3	24	27	25	27	24	28	26	28	21	24	22	24	20	23	22	23	20	23	22	23
	MR4	22	26	25	26	23	27	26	27	20	23	22	24	19	22	22	23	19	22	22	23
BG	MR1	24	28	24	28	23	27	23	27	22	25	22	25	21	25	22	25	21	24	21	24
	MR2	23	27	23	27	23	26	23	26	21	24	22	24	21	24	22	24	20	23	21	23
	MR3	22	26	23	26	23	27	25	27	20	24	22	24	20	23	22	23	20	23	21	23
	MR4	21	25	23	25	22	26	25	26	19	23	22	23	19	22	22	23	19	22	21	23
BEC	MR1	21	24	21	24	21	24	21	24	19	22	21	22	19	22	20	22	19	21	20	22
	MR2	20	23	21	23	20	23	21	23	19	21	21	22	18	21	20	22	18	20	20	22
	MR3	19	23	21	23	20	23	23	24	18	21	21	22	18	20	20	22	17	20	20	22
	MR4	18	22	21	23	19	22	23	24	17	20	21	22	17	19	20	22	17	19	20	22

Tabla 4-3. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal

S3 = CBR (7%) - T2 = N (5'000.000 Ejes 8.2 Ton) (500<=TPD<=1000) - BG (15 cms) Dovela y No Berma

Figura 151. Espesor de losa (S3-T0/T2-BG-DyNB-MR-3) MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

Losa Concreto Hidráulico MR=3.8-4.0-4.2 MPa	Ver Tablas 20 a 22 Anexo J	Módulo Reacción ($K_{Natural+15\text{ cms BG}}$) (MPa/m) Dovela (D) No Berma (NB)
Base Granular Clase A BG-38 o 25 Gradación Fina CBR>100%-100% PM	15 cms	
Subrasante Fundación CBR (2%-3%-7%)		

Figura 152. Esquemática estructural modelación pavimentos ICPC-INVÍAS-2008
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Resumen de espesores MR-3.8 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
NEE	T0=500.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	-	240	150
NEE	T2=5'.000.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	270	260	240

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Resumen de espesores MR-4.0 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	-	240	220
NEE	5'.000.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	270	260	240

Fuente: Elaboración propia

Como resumen general a la aplicación de las metodologías utilizadas, y sobre la base clasificatoria de tres tipos de subrasante (S1-S2-S3 al 95%PM), dos niveles de tránsito (NT-1 bajo y NT-3 alto) y la transición por medio de la inclusión de (150 mm) compactos de base granular (CBR>=100% al 100%PM), los espesores calculados fueron los siguientes para las tres mezclas hidráulicas en estudio – Véase Figura 153, Gráficas 43 a 45 y Anexo J respectivamente.

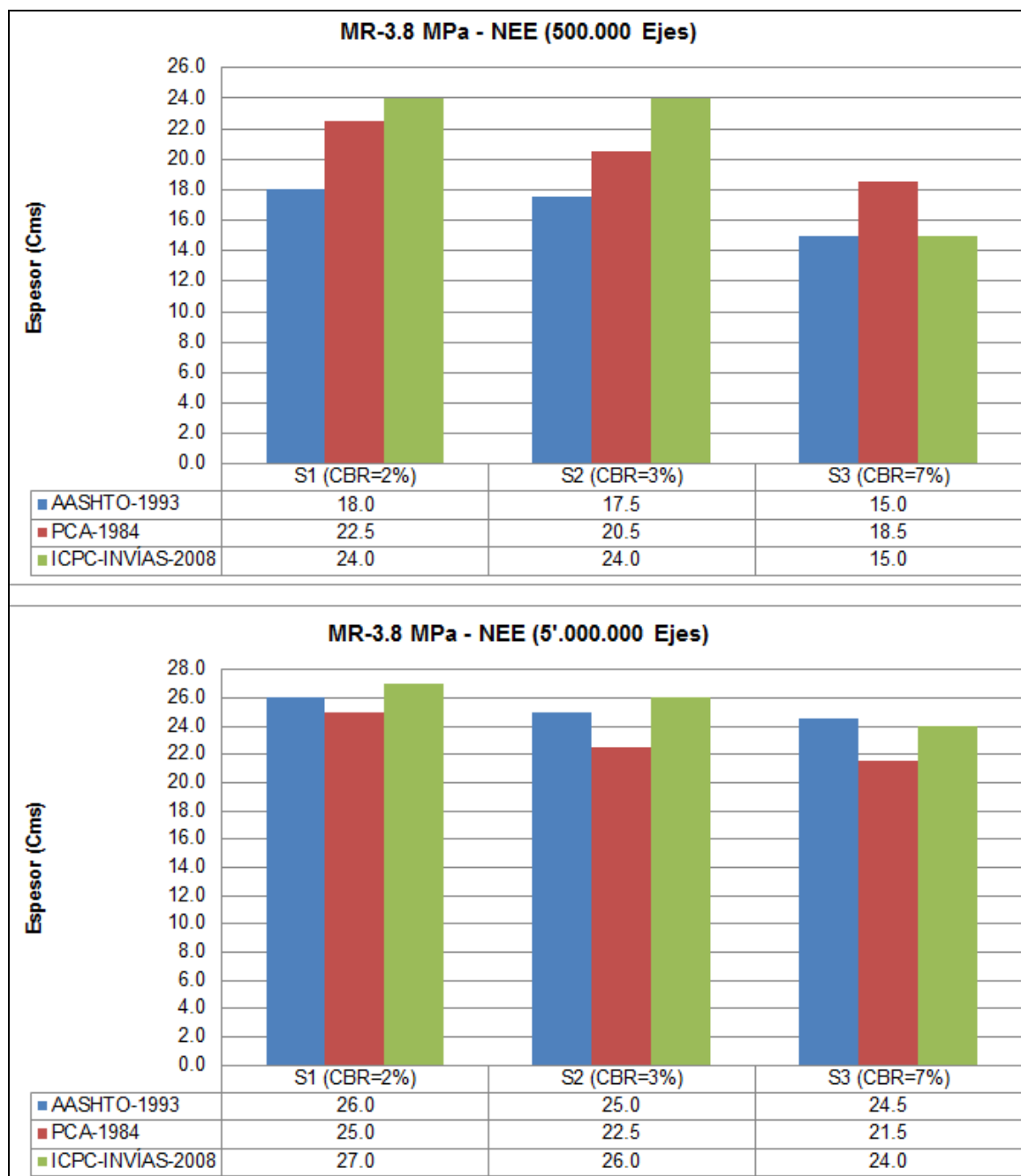
Tabla 23. Resumen de espesores MR-4.2 MPa

Descripción	S1	S2	S3
CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	-	230	210
NEE	5'.000.000 ejes 8.2 Ton		
Espesor losa (mm)	260	250	230

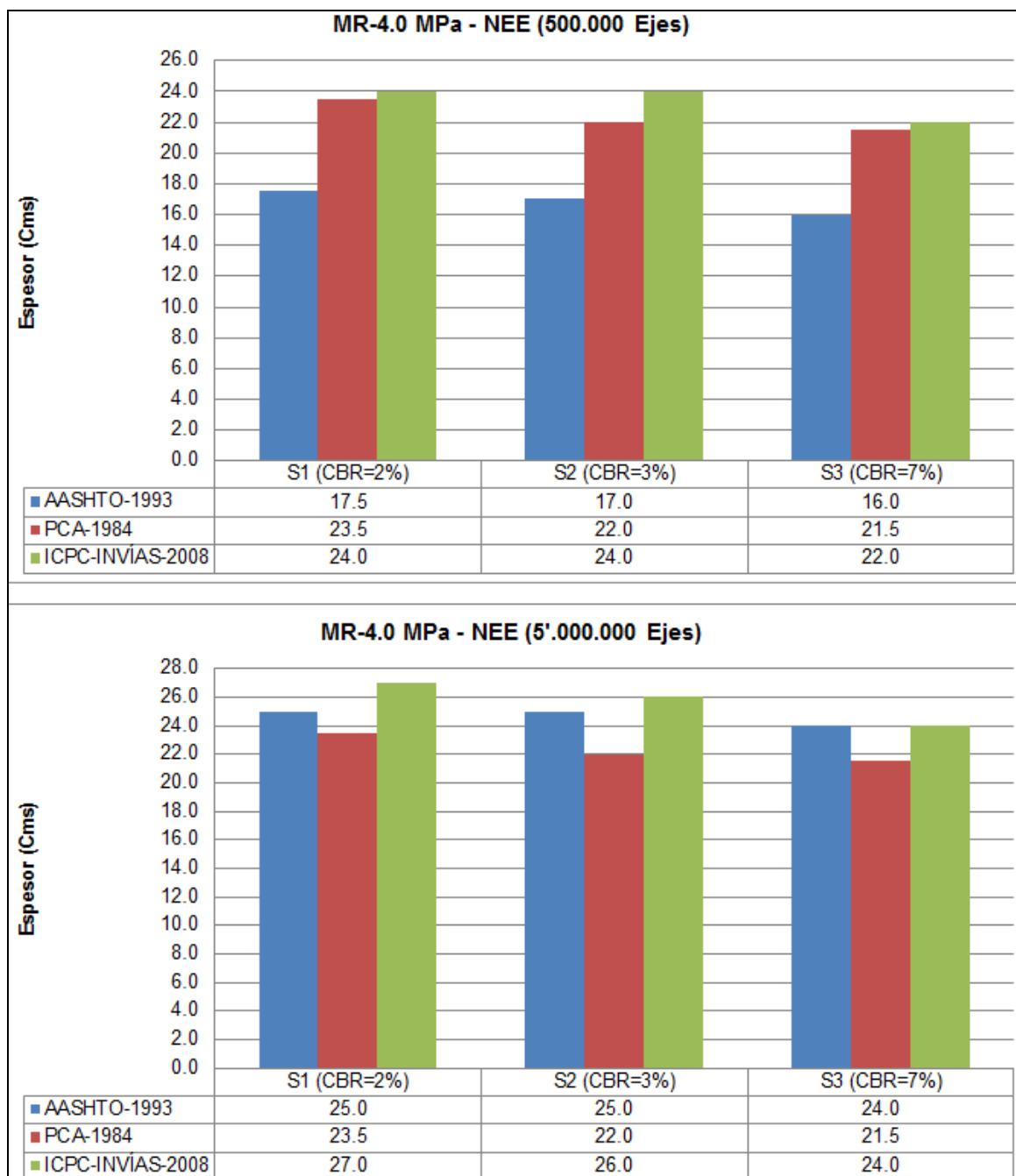
Fuente: Elaboración propia

		S1	S2	S3
3.8 Mpa	TRÁNSITO NT-1			
	AASHTO-1993	18.0	17.5	15.0
	PCA-1984	22.5	20.5	18.5
	ICPC-INVIAS-2008	-	24.0	15.0
	TRÁNSITO NT-2			
	AASHTO-1993	26.0	25.0	24.5
	PCA-1984	25.0	22.5	21.5
	ICPC-INVIAS-2008	27.0	26.0	24.0
		S1	S2	S3
4.0 Mpa	TRÁNSITO NT-1			
	AASHTO-1993	17.5	17.0	16.0
	PCA-1984	23.5	22.0	21.5
	ICPC-INVIAS-2008	-	24.0	22.0
	TRÁNSITO NT-2			
	AASHTO-1993	25.0	25.0	24.0
	PCA-1984	23.5	22.0	21.5
	ICPC-INVIAS-2008	27.0	26.0	24.0
		S1	S2	S3
4.2 Mpa	TRÁNSITO NT-1			
	AASHTO-1993	17.0	17.0	16.0
	PCA-1984	21.0	19.0	17.5
	ICPC-INVIAS-2008	-	23.0	21.0
	TRÁNSITO NT-2			
	AASHTO-1993	24.5	24.5	23.5
	PCA-1984	23.0	22.0	21.5
	ICPC-INVIAS-2008	26.0	25.0	23.0

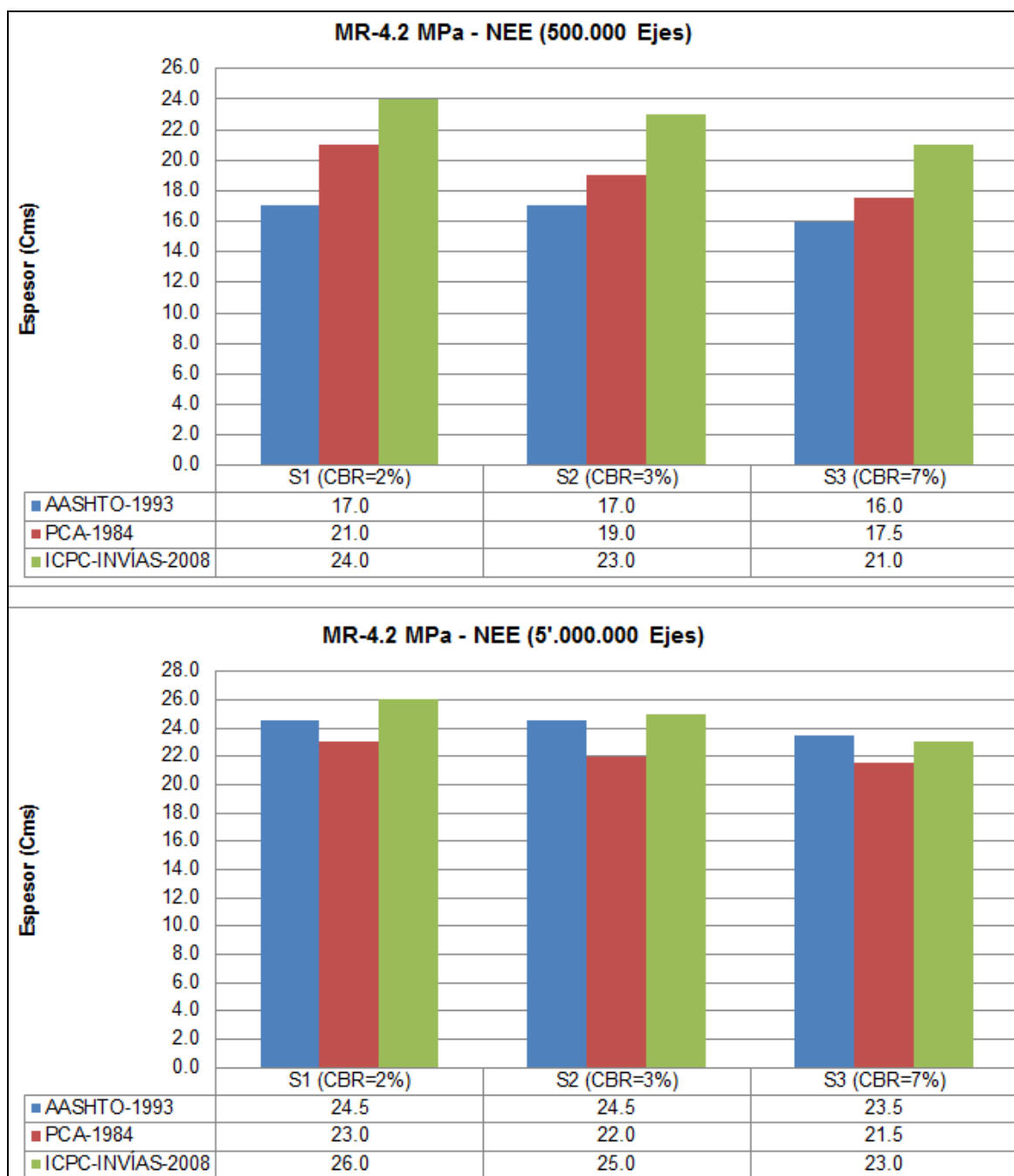
Figura 153. Resumen general espesores calculados por metodologías de diseño
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 43. Comparativo espesores calculados MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 44. Comparativo espesores calculados MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 45. Comparativo espesores calculados MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia

7. EVALUACIÓN DE COSTOS

Para comparar el estudio de las mezclas obtenidas con adición de RAP y las establecidas convencionalmente por diseños, en relación con el ámbito económico, se realizó un análisis comparativo entre el precio unitario objeto de sus procesos de manufactura por cada tipo de escenario.

De la misma manera, se compara de forma directa los beneficios y los costos que ellas demandan en dichos procesos de producción. Para esto se calcula la “Relación (B/C)”, en donde se halla la suma de los beneficios descontados traídos al presente, dividiéndolos sobre la suma de los costos igualmente descontados.

El análisis para tener una conclusión cercana a su viabilidad, debe tener en cuenta la siguiente comparación:

- Si $(B/C > 1)$, indica que los beneficios superan los costos. Por consiguiente, el negocio debe ser considerado.
- Si $(B/C = 1)$, indica que no hay ganancias, pues los beneficios son iguales a los costos.
- Si $(B/C < 1)$, indica que los costos son mayores que los beneficios. Por consiguiente, el negocio no se debe considerar.

En la Figura 154, se muestra un esquema representativo referido al respecto.

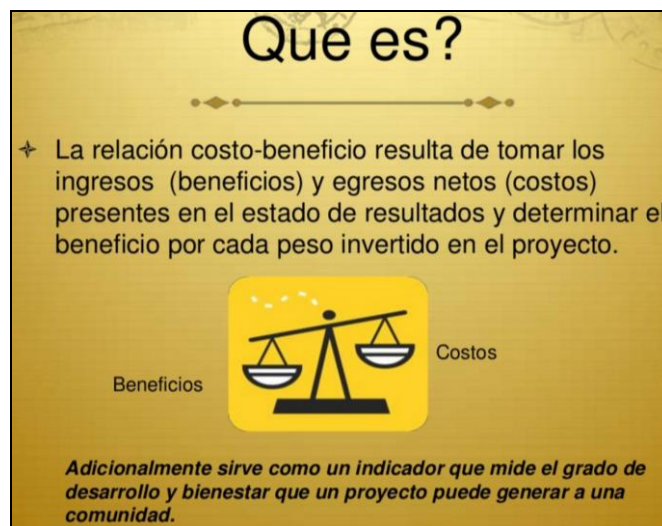


Figura 154. Qué es una relación beneficio/costo?

Fuente: Blank & Tarquin, A. (2006). Ingeniería económica. Editorial McGraw-Hill, (6ª Ed). Universidad Autónoma de México: México DF. México

En la Figuras 155 a 160, Tablas 24 a 25 y Anexo M, se muestran los “Análisis de precios unitarios” y “Resumen de los diseños” objeto del estudio en la presente investigación. Se recomienda el uso prudencial de la información adjuntada.

 ASFALTART El Espíritu de las grandes obras	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	Versión: 3 Implementación: Marzo 9 de 2016 Código: PC-F-4 Tipo Documento: Formato				
PROYECTO: PLANTA DE CONCRETO HIDRÁULICO ANILLO VIAL GIRÓN - KM. 2 GIRÓN/FLORIDABLANCA						
CONCEPTO: MEZCLA HIDRÁULICA TIPO MR-3.8 Mpa EN PLANTA		UNIDAD: M3				
ITEM: MR-38 CONVENCIONAL		CANTIDAD:				
I. EQUIPO						
Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Cantidad	Valor Unitario	
HERRAMIENTA MENOR (% M de O)	%	10%			129	
PLANTA DE CONCRETO	HORA	60,000	1.00	1.00	60,000	
Sub-Total					60,130	
II. MATERIALES EN OBRA						
Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Desperdicio	Valor Unitario	
GRAVA 100% PESCADERO	KG	30	1,218.00	1.05	38,304	
ARENA 100% PESCADERO	KG	37	636.00	1.05	24,670	
AGUA	KG	50	150.00	1.10	8,250	
CEMENTO ART TIPO III CEMEX S.A.	KG	500	340.00	1.05	178,500	
ADICIÓN AG-ALC	KG	75	40.00	1.02	3,060	
ADITIVOS	GLB	9,000	1.00	1.00	9,000	
Sub-Total					261,784	
III. TRANSPORTES						
Material	Vol-peso ó Cant.	Distancia	M3(Tn)-Km	Tarifa	Valor-Unit.	
PUESTA IN SITU - PLANTA PROYECTO					825	
Sub-Total					825	
IV. MANO DE OBRA						
Trabajador	Cantidad	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.
OFICIAL	1	80,000	30,000	110,000	150.00	733
AYUDANTE	2	30,000	12,000	84,000	150.00	560
Sub-Total						1,293
Total Costo Directo					324,032	
V. COSTOS INDIRECTOS						
Descripción	Porcentaje	Valor Total				
ADMINISTRACION	2.0%	6,481				
IMPREVISTOS	1.0%	3,240				
UTILIDAD	2.0%	6,481				
Sub-Total		16,202				
PRECIO UNITARIO TOTAL APROXIMADO AL PESO		340,234				

Figura 155. APU MR-3.8 MPa – Convencional
Fuente: ASFALTART S.A.

 ASFALTART El Espíritu de las Grandes Obras	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	Versión: 3 Implementación: Marzo 9 de 2016 Código: PC-F-4 Tipo Documento: Formato				
PROYECTO: PLANTA DE CONCRETO HIDRÁULICO ANILLO VIAL GIRÓN - KM. 2 GIRÓN/FLORIDABLANCA						
CONCEPTO: MEZCLA HIDRÁULICA TIPO MR-3.8 Mpa EN PLANTA		UNIDAD: M3				
ITEM: MR-38 + ADICIÓN DE RAP	CANTIDAD: 					
I. EQUIPO						
Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Cantidad	Valor Unitario	
HERRAMIENTA MENOR (% M de O)	%	10%			129	
PLANTA DE CONCRETO	HORA	60,000	1.00	1.00	60,000	
Sub-Total						60,130
II. MATERIALES EN OBRA						
Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Desperdicio	Valor Unitario	
GRAVA (80%) PESCADERO	KG	30	776.00	1.05	24,444	
AGREGADO RECICLADO TIPO RAP (20%)	KG	0	194.00	1.05	0	
ARENA 100% PESCADERO	KG	37	878.00	1.05	34,110	
AGUA	KG	50	165.00	1.10	9,075	
CEMENTO ART TIPO III CEMEX S.A.	KG	500	380.00	1.05	183,750	
ADICIÓN AG-ÁLC	KG	75	40.00	1.02	3,060	
ADITIVOS	GLB	9,000	1.00	1.00	9,000	
Sub-Total						263,439
III. TRANSPORTES						
Material	Vol-peso ó Cant.	Distancia	M3(Tn)-Km	Tarifa	Valor-Unit.	
PUESTA IN SITU - PLANTA PROYECTO					825	
Sub-Total						825
IV. MANO DE OBRA						
Trabajador	Cantidad	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.
OFICIAL	1	80,000	30,000	110,000	150.00	733
AYUDANTE	2	30,000	12,000	84,000	150.00	560
Sub-Total						1,293
Total Costo Directo						325,688
V. COSTOS INDIRECTOS						
Descripción	Porcentaje	Valor Total				
ADMINISTRACION	2.0%	6,514				
IMPREVISTOS	1.0%	3,257				
UTILIDAD	2.0%	6,514				
Sub-Total						16,284
PRECIO UNITARIO TOTAL APROXIMADO AL PESO						341,972

Figura 156. APU MR-3.8 MPa con adición de RAP
Fuente: ASFALTART S.A.

 ASFALTART El Espíritu de las grandes obras	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	Versión: 3 Implementación: Marzo 9 de 2016 Código: PC-F-4 Tipo Documento: Formato
---	--------------------------------------	--

PROYECTO:	PLANTA DE CONCRETO HIDRÁULICO ANILLO VIAL GIRÓN - KM. 2 GIRÓN/FLORIDABLANCA		
CONCEPTO:	MEZCLA HIDRÁULICA TIPO MR-4.0 Mpa EN PLANTA	UNIDAD:	M3
ITEM:	MR-4Q CONVENCIONAL	CANTIDAD:	

I. EQUIPO

Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Cantidad	Valor Unitario
HERRAMIENTA MENOR (% M de O)	%	10%			236
PLANTA DE CONCRETO	HORA	60,000	1.00	1.00	60,000
Sub-Total					60,237

II. MATERIALES EN OBRA

Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Desperdicio	Valor Unitario
GRAVA 100% PESCADERO	KG	30	1,293.00	1.05	40,730
ARENA 100% PESCADERO	KG	37	551.00	1.05	21,406
AGUA	KG	50	162.00	1.10	8,910
CEMENTO ART TIPO III CEMEX S.A.	KG	500	390.00	1.05	204,750
ADICIÓN AG-ÁLC	KG	75	40.00	1.02	3,060
ADITIVOS	GLB	11,000	1.00	1.00	11,000
Sub-Total					289,856

III. TRANSPORTES

Material	Vol-peso ó Cant.	Distancia	M3(Tn)-Km	Tarifa	Valor-Unit.
PUESTA IN SITU - PLANTA PROYECTO					825
Sub-Total					825

IV. MANO DE OBRA

Trabajador	Cantidad	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.
OFICIAL	1	80,000	30,000	110,000	100.00	1,100
AYUDANTE	3	30,000	12,000	126,000	100.00	1,260
Sub-Total						2,360

Total Costo Directo

353,278

V. COSTOS INDIRECTOS

Descripción	Porcentaje	Valor Total
ADMINISTRACION	2.0%	7,066
IMPREVISTOS	1.0%	3,533
UTILIDAD	2.0%	7,066
Sub-Total		17,664

PRECIO UNITARIO TOTAL APROXIMADO AL PESO

370,942

Figura 157. APU MR-4.0 MPa – Convencional
Fuente: ASFALTART S.A.

	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	Versión: 3 Implementación: Marzo 9 de 2016 Código: PC-F-4 Tipo Documento: Formato				
PROYECTO: PLANTA DE CONCRETO HIDRÁULICO ANILLO VIAL GIRÓN - KM. 2 GIRÓN/FLORIDABLANCA						
CONCEPTO: MEZCLA HIDRÁULICA TIPO MR-4.0 Mpa EN PLANTA		UNIDAD: M3				
ITEM: MR-40 + ADICIÓN DE RAP		CANTIDAD:				
I. EQUIPO						
Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Cantidad	Valor Unitario	
HERRAMIENTA MENOR (% M de O)	%	10%			194	
PLANTA DE CONCRETO	HORA	60,000	1.00	1.00	60,000	
Sub-Total					60,195	
II. MATERIALES EN OBRA						
Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Desperdicio	Valor Unitario	
GRAVA (80%) PESCADERO	KG	30	820.00	1.05	25,830	
AGREGADO RECICLADO TIPO RAP (20%)	KG	0	206.00	1.05	0	
ARENA 100% PESCADERO	KG	37	798.00	1.05	31,002	
AGUA	KG	50	193.00	1.10	10,615	
CEMENTO ART TIPO III CEMEX S.A.	KG	500	370.00	1.05	194,250	
ADICIÓN AG-ÁLC	KG	75	40.00	1.02	3,060	
ADITIVOS	GLB	11,000	1.00	1.00	11,000	
Sub-Total					275,757	
III. TRANSPORTES						
Material	Vol-peso ó Cant.	Distancia	M3(Tn)-Km	Tarifa	Valor-Unit.	
PUESTA IN SITU - PLANTA PROYECTO					825	
Sub-Total					825	
IV. MANO DE OBRA						
Trabajador	Cantidad	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.
OFICIAL	1	80,000	30,000	110,000	100.00	1,100
AYUDANTE	2	30,000	12,000	84,000	100.00	840
Sub-Total						1,940
Total Costo Directo						338,717
V. COSTOS INDIRECTOS						
Descripción	Porcentaje	Valor Total				
ADMINISTRACION	2.0%	6,774				
IMPREVISTOS	1.0%	3,387				
UTILIDAD	2.0%	6,774				
Sub-Total		16,936				
PRECIO UNITARIO TOTAL APROXIMADO AL PESO						355,653

Figura 158. APU MR-4.0 MPa con adición de RAP
Fuente: ASFALTART S.A.

 ASFALTART El Espíritu de las Grandes Obras	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	Versión: 3 Implementación: Marzo 9 de 2016 Código: PC-F-4 Tipo Documento: Formato				
PROYECTO: PLANTA DE CONCRETO HIDRÁULICO ANILLO VIAL GIRÓN - KM. 2 GIRÓN/FLORIDABLANCA						
CONCEPTO: MEZCLA HIDRÁULICA TIPO MR-4.2 Mpa EN PLANTA		UNIDAD: M3				
ITEM: MR-42 CONVENCIONAL	CANTIDAD: 					
I. EQUIPO						
Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Cantidad	Valor Unitario	
HERRAMIENTA MENOR (% M de O)	%	10%			236	
PLANTA DE CONCRETO	HORA	60,000	1.00	1.00	60,000	
Sub-Total					60,237	
II. MATERIALES EN OBRA						
Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Desperdicio	Valor Unitario	
GRAVA 100% PESCADERO	KG	30	1,200.00	1.05	37,800	
ARENA 100% PESCADERO	KG	37	625.00	1.05	24,281	
AGUA	KG	50	170.00	1.10	9,350	
CEMENTO ART TIPO III CEMEX S.A.	KG	500	415.00	1.05	217,875	
ADICIÓN AG-ÁLC	KG	75	40.00	1.02	3,060	
ADITIVOS	GLB	11,000	1.00	1.00	11,000	
Sub-Total					303,366	
III. TRANSPORTES						
Material	Vol-peso ó Cant.	Distancia	M3(Tn)-Km	Tarifa	Valor-Unit.	
PUESTA IN SITU - PLANTA PROYECTO					825	
Sub-Total					825	
IV. MANO DE OBRA						
Trabajador	Cantidad	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.
OFICIAL	1	80,000	30,000	110,000	100.00	1,100
AYUDANTE	3	30,000	12,000	126,000	100.00	1,260
Sub-Total						2,360
V. COSTOS INDIRECTOS						
Descripción	Porcentaje	Valor Total				
ADMINISTRACION	2.0%	7,336				
IMPREVISTOS	1.0%	3,668				
UTILIDAD	2.0%	7,336				
Sub-Total		18,339				

Figura 159. APU MR-4.2 MPa – Convencional
Fuente: ASFALTART S.A.

 ASFALTART El Espíritu de las Grandes Obras	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	Versión: 3 Implementación: Marzo 9 de 2016 Código: PC-F-4 Tipo Documento: Formato				
PROYECTO: PLANTA DE CONCRETO HIDRÁULICO ANILLO VIAL GIRÓN - KM. 2 GIRÓN/FLORIDABLANCA						
CONCEPTO: MEZCLA HIDRÁULICA TIPO MR-4.2 Mpa EN PLANTA		UNIDAD: M3				
ITEM: MR-42 + ADICIÓN DE RAP		CANTIDAD: 				
I. EQUIPO						
Descripción	Tipo	Tarifa/Hora	Rendimiento	Cantidad	Valor Unitario	
HERRAMIENTA MENOR (% M de O)	%	10%			194	
PLANTA DE CONCRETO	HORA	60,000	1.00	1.00	60,000	
Sub-Total						60,195
II. MATERIALES EN OBRA						
Descripción	Unidad	Precio-Unit.	Cantidad	Desperdicio	Valor Unitario	
GRAVA (80%) PESCADERO	KG	30	809.00	1.05	25,484	
AGREGADO RECICLADO TIPO RAP (20%)	KG	0	202.00	1.05	0	
ARENA 100% PESCADERO	KG	37	794.00	1.05	30,847	
AGUA	KG	50	193.00	1.10	10,615	
CEMENTO ART TIPO III CEMEX S.A.	KG	500	390.00	1.05	204,750	
ADICIÓN AG-ÁLC	KG	75	40.00	1.02	3,060	
ADITIVOS	GLB	11,000	1.00	1.00	11,000	
Sub-Total						285,755
III. TRANSPORTES						
Material	Vol-peso ó Cant.	Distancia	M3(Tn)-Km	Tarifa	Valor-Unit.	
PUESTA IN SITU - PLANTA PROYECTO					825	
Sub-Total						825
IV. MANO DE OBRA						
Trabajador	Cantidad	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimiento	Valor-Unit.
OFICIAL	1	80,000	30,000	110,000	100.00	1,100
AYUDANTE	2	30,000	12,000	84,000	100.00	840
Sub-Total						1,940
Total Costo Directo						348,715
V. COSTOS INDIRECTOS						
Descripción	Porcentaje	Valor Total				
ADMINISTRACION	2.0%	6,974				
IMPREVISTOS	1.0%	3,487				
UTILIDAD	2.0%	6,974				
Sub-Total			17,436			
PRECIO UNITARIO TOTAL APROXIMADO AL PESO			366,151			

Figura 160. APU MR-4.2 MPa con adición de RAP
Fuente: ASFALTART S.A.

Tabla 24. Resumen diseños convencionales de mezclas tipo MR

Cantidades/M ³	MR-3.8 MPa	MR-4.0 MPa	MR-4.2 MPa
Agregado grueso (Kg)	1216	1293	1200
Agregado fino (Kg)	635	551	625
Agua (Kg)	150	162	170
Cemento (Kg)	340	390	415
Asentamiento ("	3		
Relación (A/C)	0.44	0.42	0.41
Cemento portland	ART – Tipo III		
Densidad (Kg/m ³)	2.341	2.396	2.410
Contenido aire	1%		

Fuente: ASFALTART S.A.

Tabla 25. Resumen diseños investigación de mezclas tipo MR + RAP

Cantidades/M ³	MR-3.8 MPa	MR-4.0 MPa	MR-4.2 MPa
Agregado grueso (Kg)	970	1025	1011
Agregado fino (Kg)	878	798	794
Agua (Kg)	165	193	193
Cemento (Kg)	350	370	390
Asentamiento ("	3		
Relación (A/C)	0.47	0.48	0.49
Cemento portland	ART – Tipo III		
Densidad (Kg/m ³)	2.333	2.386	2.388
Contenido aire	1%		

Fuente: ASFALTART S.A.

Las relaciones (B/C), serían las siguientes concluyendo que para la mezcla inicial (MR-3.8 MPa) no es rentable el negocio para producción de mezcla hidráulica debido a que los costos de producción con la adición del agregado reciclado son prácticamente iguales a los costos de producción sin la adición del mismo.

- (B/C) MR-3.8 MPa = $(\$340.234 + \$13.860) / (\$341.972) = 1.0$
- (B/C) MR-4.0 MPa = $(\$370.942 + \$14.900) / (\$355.653) = 1.1$
- (B/C) MR-4.2 MPa = $(\$385.127 + \$12.316) / (\$366.151) = 1.1$

Para las mezclas (MR-4.0 y 4.2 MPa) si es rentable el negocio de producción habida cuenta del margen de utilidad por metro cúbico en mezcla hidráulica producida. El ahorro promedio está alrededor de los (\$30.900) por metro cúbico, es decir, un porcentaje de aprovechamiento del (8 al 9%) sobre los valores en costo directo del producto. Lo anterior debido que para estas mezclas, sus diseños estuvieron muy similares, en cuanto a la compensación y dosificación en cantidades de agregado grueso combinado y arena (57% + 43%).

CONCLUSIONES

RAP

1. Ofrece significativos ahorros de energía, de materiales no renovables y de los fondos económicos destinados a la conservación de carreteras. Esto contribuye a la sostenibilidad de los proyectos viales y a la disminución de impactos ambientales.
2. Su reutilización promueve una menor disposición de escombros. Igualmente se disminuye la necesidad explotar nuevas fuentes de materiales vírgenes, menor consumo de energía y contaminación generada por su transporte.
3. Sus propiedades mecánicas ofrecen buen parte de garantía para el diseño y manufactura de una mezcla hidráulica, habida cuenta de su excelente participación en la re-fabricación de concretos asfálticos.
4. Su mayor obstáculo dentro de una óptima selección, es la determinación adecuada del uso granulométrico que se le pueda dar. Debe analizarse muy bien la escogencia de su TM y % participativo para incluirse dentro de las fórmulas de trabajo en frío (Heterogranularidad en sus tamaños, así como su % de asfalto residual). Se postula para futura investigación, realizar validación con más de una fracción.
5. Su densidad bulk en fracción gruesa es aproximadamente un (12%) menor respecto a la del agregado pétreo vírgen grueso.
6. Se encontraron valores competentes y dentro de umbrales de control en lo referido a su dureza, formas, sanidad, plasticidad, limpieza, fracturación, angularidad, peso específico y absorción.
7. La absorción de agua que experimenta es poca debido a la presencia del asfalto residual. El resultado condicionó el valor sustancial en el asentamiento de las mezclas, tendencia al flotado y oscurecimiento al color convencional de la mezcla.
8. Su adición indiscutiblemente, es un beneficio económico en la valoración de costos financieros para la producción de cualquier tipo de mezcla ó combinación con otros agregados pétreos compatibles.
9. La incorporación del insumo generó disminución en la densidad de las mezclas analizadas (MR-38 0.34% / MR-40 0.42% y MR-42 0.92%).
10. Se pudo reemplazar solo un (20%) de la masa correspondiente al agregado grueso vírgen. Lo anterior, habida cuenta al cumplimiento de combinaciones establecidas para el no propiciamiento de desfases de mayor intervalo respecto a los usos granulométricos establecidos por la normativa y metodologías de diseño.
11. Es totalmente recomendable el resguardo, manipulación y cuidados complementarios al insumo después de su obtención en los procesos referenciados.

12. Se deben emitir recomendaciones para futuros trabajos de investigación, utilizando dicho insumo para el diseño y manufactura de otros concretos hidráulicos.

AGREGADOS PÉTREOS VÍRGENES

13. La fuente “Río Chicamocha” del sector “Pescadero” suministra muy buenos agregados pétreos (Crudo y arenas naturales) para la manufactura de las mezclas.
14. Debe considerarse el tratamiento y adición de insumos cementicios especiales para contrarrestar efecto “Agregado-álcali” en las mezclas hidráulicas.
15. Existe desfavorabilidad para la manufactura de mezclas hidráulicas con la incorporación de RAP en lo referido al contenido de agregado fino (Arena), cuyos valores aumentaron en un promedio cercano al (36%). En lo referido al agregado grueso, los resultados fueron favorables desde el punto de vista incluyente, ya que se obtuvieron disminuciones sobre su combinación total cercanas al (23%).

CEMENTO PÓRTLAND

16. La utilización de los cementos tipo ART (III), ayudan enormemente en la adquisición de resistencias a tempranas edades.
17. Las interpretaciones estadísticas valoradas al insumo, evidencian discontinuidad coyuntural en el resultado de ensayo en “Expansión sobre barras de mortero”, que estando dentro del cumplimiento normativo, da cuenta del condicionamiento comercial y técnico con el que se aprovecha el producto cementicio a nivel nacional.
18. Es casi premeditario, la incorporación de elemento refrigerantes para la manufactura de las mezclas hidráulicas tipo MR-40 y 42. Lo anterior soportado en la alta incorporación sobre la cantidad de cemento y generación de exotermicidad.
19. Se evidenció por las metodologías utilizadas para el diseño de las mezclas, que los contenidos de cemento variaron a los que una mezcla convencional puede requerir: (MR-38 +3% / MR-40 -5% y MR-42 -6%).

AGUA

20. El insumo analizado e incorporado proveniente de la fuente “Aguablanca”, cumple requerimientos básicos normativos NTC e INVÍAS/2013.
21. Al practicársele ensayos complementarios (Contenido de azúcares, sulfatos, cloruros, sodio, potasio y sólidos totales) se evidenció cumplimiento a la luz de los requerimientos exigidos por la normatividad internacional – ACI.

22. Los contenidos de agua en los diseños de las mezclas aumentaron en un (15%); esto sobre la base de la trabajabilidad inducida por la presencia de asfalto residual en el RAP, así como el comportamiento mecánico de un agregado reciclado.

RESULTADOS PRODUCTO FINAL

23. Reducción de la densidad en las mezclas del orden (0.6%).
24. Todas las curvas de resistencia a la flexión y compresión, así con las correspondientes a los módulos de elasticidad demostraron normal comportamiento estadístico para cada uno de los resultados esperados. El (100%) de las resistencias tanto en flexotracción como en compresión, cumplen requisito normativo antes de los (10) días de edad (MR-4.0 y 4.2 Mpa), y sobre (11 a 14) días (MR-3.8 Mpa). Esto proviene no solo de la buena calidad del tipo de cemento pórtland utilizado, sino del aporte brindado por la adición cementicia en el control del efecto “Agregado-álcali”. Para el MR-38 llamó la atención que con valores algo bajos de resistencia a la compresión para su uso típico en estructuras de pavimento rígido, se obtuvieron resistencias moderadas de módulo de rotura.
25. La medida en tiempos de fraguado se encuentran dentro de los intervalos de mezclas convencionales para temperaturas y condiciones ambientales cálidas.
26. Los valores de correlación (K) encontrados para las pruebas de flexión y compresión, se encuentran dentro de los intervalos recomendados por la normatividad internacional ACI ($2.1 \leq K \leq 2.7$).
27. Las fallas de los especímenes a compresión, se encontraron de manera normal dentro de las tipologías consideradas por la ACI.
28. Los resultados experimentales, estadísticamente se avalaron con las medidas base del promedio aritmético obtenido (C), desviación estándar (s) y validación en proceso por medio de la obtención del coeficiente de variación (V%), que para todos los casos consideró procesos de excelente a buena operación para muestreos ejecutados en laboratorio ($V < 4\%$).
29. El valor de módulo de elasticidad correspondiente a la mezcla hidráulica MR-40 – comparada con una convencional de las mismas características producida por la multinacional CEMEX, se encuentra un (17%) por debajo de su cifra obtenida. Lo anterior da cuenta que para llegar a esta misma calidad, la única mezcla con incorporación de RAP que puede alcanzarlo es la de tipo MR-42.
30. Se recomendaría evaluar todas las propiedades mecánicas investigadas, en pruebas sobre un tramo de prueba real, con el objetivo de testificar con ayuda de equipos de medición y auscultación especial en el área de ingeniería de pavimentos y control técnico en laboratorio sobre pruebas destructivas, los datos aquí obtenidos.

31. Debe contemplarse la medición de tracción indirecta en núcleos extraídos, así como algunos ensayos de tipo dinámicos excluidos en la presente investigación
32. Se pudo reemplazar solo un (20%) de la masa correspondiente al agregado grueso vírgen por el RAP. Lo anterior, habida cuenta del cumplimiento a las combinaciones establecidas para no propiciar desfases de mayor intervalo con respecto a los usos establecidos por las franjas granulométricas y metodológicas de diseño.
33. La porcentualidad entre resultados (f_c/ME) y (MR/f_c) - Kg/cm² fueron del orden promedio correspondiente al (0.17%) y (11.7%) respectivamente.
34. Las temperaturas de fraguado correspondiente a los MR-38 y 42, superaron umbral recomendado por literatura e investigaciones especializadas (34oC).

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CONSULTADAS Y UTILIZADAS

35. Persisten errores de digitación, presentación y ausencia complementaria de criterios técnicos entre la reciente formulación INVÍAS/2013 como su recíproca NTC.
36. En la obtención y comparación de módulos elásticos bajo enfoque normativo nacional como internacional, se evidencian diferenciamentos sustanciales en sus umbrales y requisitos mínimos de aceptación.
37. Existen divergencias en el uso interpretativo y aplicación particular correspondiente al uso normativo que establecen las normas INVÍAS/2013 y NTC respectivamente. Una cosa es el control para la manufactura y diseño de concretos hidráulicos que no son de uso en la construcción de proyectos de infraestructura vial, y otra totalmente diferente, la que se pretende promover en la construcción de estructuras generales que no son los pavimentos hidráulicos. Tanto la comercialización como manufactura de dichas mezclas promocionadas por empresas nacionales y multinacionales apostadas en el territorio nacional, hacen más preferencia y cumplimiento por las segundas que por las primeras.

MODELAMIENTOS ESTRUCTURALES PARA DISEÑO DE PAVIMENTO

38. Las mezclas evaluadas pueden ser utilizadas sin restricción alguna como concretos para la construcción de pavimentos rígidos en vías de bajos y medios volúmenes de tránsito NT-1 / NT-2 (Hasta 5E+06 ejes equivalentes de 8.2 Ton).
39. Existió cumplimiento a las expectativas de validación y modelación referido a la determinación de aceptables y competentes módulos de elasticidad.
40. Existe gran divergencia en la obtención de agrimensuras definidas por las dos metodologías tradicionales (AASHTO-1993 y PCA-1984), versus la contemplada por el manual nacional vigente INVÍAS/ICPC-2008, en donde son algo “Sobredimensionados” los espesores calculados en función de los conceptos por este último considerado.

41. Para la modelación, se ratifica una divergencia en más de un (20%) en los resultados que asume el manual ICPC/INVÍAS-2008 con respecto a los obtenidos por las metodologías AASHTO-1993 y PCA-1984.
42. La validación se enfocó a suelos de fundación con subrasantes entre regulares a pobres. Esto puede dar cuenta de una mejor, adaptable solución técnico-económica a las necesidades de vías hasta de un orden secundario.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. “Guide for Design of Pavement Structures”. Washington: 1986. 1993. 1998. 2 vol.

ASOCIACION COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE GRAVA - ASOGRAVAS – ASOCIACION COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO - ASOCRETO. “Experiencia Internacional en Agregados Reciclados – Mitos y Realidades”. Bogotá: 2011.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE. La carretera de hormigón: Guía práctica para la transferencia de tecnología. Panamá: FICEM, 2006. 59 p.

ASTEC INTERNATIONAL INC, DON BROCK, J. “Fresado y Reciclaje”. Boletín Técnico T-1275. 2004.

ÁVILA, Edna, SOTO, Andrés, SÁNCHEZ, Héctor M. - “Estériles del Carbón y su Uso en Concreto Hidráulico para Pavimentos”. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC. Congreso Internacional de Materiales. Bogotá: 2013.

BLOG 360° CONCRETOS ARGOS S.A. “Agregados Reciclados - Qué y Para Qué? – Notas Técnicas. Bogotá: 2015. <http://www.concretosargos.com>

BOJACÁ, Néstor, TORRES, Nancy. “Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de Concretos con Agregado Reciclado” – American Concrete Institute, Seccional Colombia. ISSN No. 20111592. Bogotá: 2013.

BOLLA, Gustavo, LOPEZ, Patricia, FACENDINI, Susana. “Hormigón con Agregados Reciclados de Pavimentos Colapsados” – Asociación Argentina del Hormigón Elaborado. Buenos Aires: 2008.

BOLZAN, Pablo. - “Reciclado de Mezclas Asfálticas en Caliente”. Comisión Permanente del Asfalto. Jornadas Técnicas. Buenos Aires: 2011.

BOTASSO H. G, CUATTROCHINO A. C, REBOLLO O. R, SOENGAS C. J, “Reciclado de Pavimentos Asfálticos”. Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional de La Plata. Buenos Aires: 2004. <http://www.cedex.es/Reciclado de Pavimentos Asfálticos.pdf>, Tomado de DIRECT-MAT “Synthesis of National and International Documents on Existing Knowledge Regarding the Recycling of Reclaimed Roads Materials in Asphalt” - 2010.

CÁRDENAS, Jaleydi, FONSECA, Elsa. "Modelación Comportamiento Reológico del Asfalto Convencional y Modificado con Polímero Reciclado, Estudiado desde la Relación Viscosidad-Temperatura." Revista EIA 12.2 (2009): 125-137.

CONGRESS CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES FOR ROADS – 16TH WORD MEETING LISBOA. "Hormigón con Agregados Reciclados para Carreteras". Universidad Tecnológica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil. Paraná: 2010.

EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS – ECOPETROL. "Manual Técnico de Productos". CIB: 2013.

ESCÁRRAGA, Andrés. "Concreto con Material Reciclado" – Buenos Aires: 2014.

GESTION DEL RCD DEL IDU. "Primer Foro Internacional Manejo Integral RCD Programa Escombros Cero". Alcaldía Mayor de Bogotá DC. Bogotá: 2012.

GOMEZ, José. M. VÁZQUEZ, Eric, AGULLO, Luis. "Cualidades Físicas y Mecánicas de los Agregados Reciclados". Universidad Politécnica de Cataluña. Madrid: 2011.

GUZMÁN, M^a. F. PÉREZ, Diego. "Agregados No Convencionales para Preparación de Concretos Ecológicos". Universidad Pontificia Bolivariana UPB, Seccional Bucaramanga. Bucaramanga: 2011.

HERRERA, Carmen "Seguimiento al Diagnóstico, Diseño y Construcción de la Rehabilitación de las Rutas SITP-Suba-Bogotá con Estabilización de Base Granular Asfalto Caliente y Reciclado de Carpetas Asfálticas". Especialización en Ingeniería de Pavimentos – Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá: 2014.

HUANG, Yang Hsien. "Pavement Analysis and Design". New Jersey: Prentice-Hall, 1993.

HUANG, Yang Hsien, BIRD, ROGER N, HEIDRICH, Oliver. "A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements." Resources, Conservation and Recycling 52.1 (2007): 58-73
<http://www.google.com/patents/US8758597>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. "Normas Técnicas Colombianas NTC-121, 174, 396, 550, 673 y 1377". Bogotá: ICONTEC, 2013.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO DE BOGOTÁ D.C. "Reglamento IDU-ET-2011". Resolución 4880 del 05/XII/2011. Bogotá: IDU, 2011.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO ICPC - INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVÍAS. “Manual de Diseño de Pavimento Rígido para Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito”. Bogotá: 2008.

LONDOÑO NARANJO, Cipriano Alberto. “Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos de Concreto”. Instituto Colombiano de Productores de Cemento - ICPC, Medellín: ICPC, 2001.

MINISTERIO DEL TRANSPORTE. “Manual de diseño de pavimentos rígidos para vías con bajos, mediosy altos volúmenes de tránsito”. Medellín: Colombia. 2008.

MINISTERIO DEL TRANSPORTE. “Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito”. Bogotá: INVÍAS, 2007.

MINISTERIO DEL TRANSPORTE. “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras”. Resolución 0001376 del 26/V/2014. Bogotá: INVÍAS, 2013.

MINISTERIO DEL TRANSPORTE. “Normas de Ensayo de Construcción de Carreteras”. Resolución 0001376 del 26/V/2014. Bogotá: INVÍAS, 2013.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras”. Universidad Católica de Colombia. Bogotá: 2002, 2ª edición.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION–NAPA, “Informe Especial SR-191 Dave Newcomb”. Houston: 2004.

PINO, Leopoldo. “Reciclado de Pavimentos en Carreteras. Aplicación en Cuba”. <http://www.monografias.com/trabajos98/reciclado-pavimentos-carreteras.Cuba>: 2010.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION PCA. “Metodología de Diseño en Pavimento Rígido”. 1984.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Thickness design for concrete pavements. Chicago: PCA, 1984. 32 p.

SABINO, Carlos. “El Proceso de Investigación”. Editorial Panamericana, 2ª edición. Bogotá: 1995.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. “Tecnología del Concreto y del Mortero”. Biblioteca de la Construcción. Bhandar Editores Ltda., 3ª edición. Bogotá: 1996.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. JARAMILLO, Diego. “Evaluación de los Concretos en Pavimentos Rígidos” – Reunión del Concreto. Cartagena: RC-2010.

SEVERICH, Mario, VALENZUELA G, Rodrigo. "Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de la Ciudad de Cochabamba Mediante el Fresado y Reciclado en Frío". Cochabamba: 2010.

TECONCARRETERAS. "Pavimentos de Asfalto y Concreto". Blog MX <http://www.tecnocarreteras.mx> 2013.

VALMIR, B. "Fresado de Pavimentos Asfálticos". Sao Paulo: 2008.

WIRTGEN, "Manual de Reciclado en Frío". 2004.

WITCZAK, Matthew W y YODER, Eldon Joseph. Principles of pavement design. New York: John Wiley, 1975. 711 p.