



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE EL PAVIMENTO FLEXIBLE Y EL PAVIMENTO RÍGIDO

Rafael Alejandro Torres Ziri6n

Asesorado por el Ing. Jos6 Francisco Torres Ju6rez

Guatemala, octubre de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE
EL PAVIMENTO FLEXIBLE Y EL PAVIMENTO RÍGIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

RAFAEL ALEJANDRO TORRES ZIRIÓN

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ FRANCISCO TORRES JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2007



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE EL PAVIMENTO FLEXIBLE Y EL PAVIMENTO RÍGIDO

Rafael Alejandro Torres Ziri6n

Asesorado por el Ing. Jos6 Francisco Torres Ju6rez

Guatemala, octubre de 2007

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE
EL PAVIMENTO FLEXIBLE Y EL PAVIMENTO RÍGIDO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 11 de abril de 2007.

Br. Rafael Alejandro Torres Ziri6n

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Creador de todo el universo, y por quien hoy estoy acá, en este momento único de mi vida.
- Virgen María** Madre de Dios y de todos los hombres, por su gran ejemplo y por ser modelo de mujer.
- Mi padre** Ing. José Francisco Torres Juárez, por toda la confianza depositada en mi.
- Mi madre** Doris Zirión de Torres, por su inmenso amor, palabras de aliento y por estar siempre a mi lado.
- Mis hermanos** Mónica, Francisco, Bruno, Marielos y Pablo, por ser mis compañeros de vida y compartir conmigo infinidad de momentos.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios Por darme el don de la vida y permitirme llegar a esta etapa tan importante para mí.

Mi padre, asesor y padrino

Ing. José Francisco Torres Juárez, por guiar mis pasos desde pequeño llevándome hasta este punto; por su gran ejemplo, apoyo y dedicado esfuerzo durante toda mi carrera.

Mi amigo y compañero de estudios

Ing. José Miguel García Escobar, por su constante esfuerzo y apoyo, durante mi carrera y en la culminación de la misma.

Mis amigos

Julissa Benavente y familia, Mayly Gómez, Juan Carlos y Julio Ruiz, Rodolfo Rodas; por su compañía y amistad durante todos estos años.

Mis centros educativos Instituto San Ignacio y Kinal; por brindarme las bases de mi formación académica y fortalecer mi espíritu de superación.

Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Por permitir desenvolverme en ella, durante éstos últimos años de mi vida académica y brindarme la formación necesaria para convertirme en un profesional de la ingeniería.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XIII
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	XVII
GLOSARIO.....	XIX
RESUMEN.....	XXVII
OBJETIVOS.....	XXIX
INTRODUCCIÓN.....	XXXI
1. DEFINICIONES DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLE Y RÍGIDO.....	1
1.1 Pavimento Flexible.....	1
1.1.1 Conformación.....	2
1.1.2 Función del pavimento.....	2
1.1.3 Funciones de las distintas capas de un Pavimento Flexible.....	3
1.1.3.1 Sub base.....	3
1.1.3.2 Base.....	5
1.1.3.3 Capa de rodadura.....	8
1.2 Pavimento Rígido.....	8
1.2.1 Funciones de las distintas capas de un Pavimento Rígido.....	11
1.2.1.1 Sub base.....	11
1.2.1.2 Base.....	12
1.2.1.3 Capa de rodadura.....	12
2. PAVIMENTO FLEXIBLE.....	15

2.1 Diseño de un Pavimento Flexible.....	15
2.1.1 Método de AASHTO.....	15
2.1.1.1 Variables a considerar.....	16
2.1.1.1.1 Variables en función del tiempo.....	16
2.1.1.1.2 Variables en función del tránsito....	17
2.1.1.1.3 Confiabilidad (R).....	17
2.1.1.1.4 Sub rasantes expansivas.....	17
2.1.1.1.5 Criterios para determinar la serviciabilidad.....	17
2.1.1.1.6 Propiedades de los materiales.....	18
2.1.1.1.7 Drenajes.....	18
2.1.1.2 Determinación de espesores.....	19
2.1.1.2.1 Determinación del número estructural requerido.....	19
2.1.1.2.2 Estabilidad y factibilidad de la construcción.....	20
2.1.1.2.2 Espesores mínimos en función del número estructural.....	21
2.1.2 Método del Instituto de Asfalto.....	21
2.1.2.1 Estimación del tránsito.....	22
2.1.2.2 Materiales.....	24
2.1.2.3 Espesores de diseño.....	27
2.1.3 Tráfico y cargas de diseño.....	27
2.2 Ejecución de un Pavimento Flexible.....	30
2.2.1 Tratamientos para los Pavimentos Flexibles.....	30
2.2.1.1 Tratamientos superficiales.....	30
2.2.1.1.1 Descripción.....	30
2.2.1.1.2 Propósito.....	30
2.2.1.1.3 Criterio.....	31

2.2.1.1.4 Procedimientos de ejecución.....	31
2.2.1.2 Macadam de penetración.....	34
2.2.1.3 Riegos de sello.....	34
2.2.1.4 Carpeta de arena – asfalto.....	35
2.2.1.5 Pavimentos con emulsión asfáltica.....	35
2.2.1.6 Concreto asfáltico en caliente.....	35
2.2.1.6.1 Descripción.....	35
2.2.1.6.2 Propósito.....	36
2.2.1.6.3 Criterios.....	36
2.2.1.6.4 Procedimientos de ejecución	36
2.3 Mantenimiento del Pavimento Flexible.....	39
2.3.1 Mantenimiento de la red vial pavimentada.....	39
2.3.1.1 Descripción.....	39
2.3.1.2 Propósito.....	40
2.3.1.3 Criterio para realizar el mantenimiento.....	40
2.3.1.4 Procedimiento de ejecución de un Pavimento Flexible.....	40
2.3.2 Escarificación, conformación, compactación e imprimación del pavimento existente.....	42
2.3.2.1 Descripción.....	42
2.3.2.2 Propósito.....	42
2.3.2.3 Criterios.....	42
2.3.2.4 Procedimientos de ejecución.....	43
2.3.3 Recuperación y estabilización con emulsión asfáltica para un pavimento existente.....	44
2.3.3.1 Descripción.....	44
2.3.3.2 Propósito.....	44
2.3.3.3 Criterios.....	45
2.3.3.4 Procedimientos de ejecución.....	45

2.3.4 Fallas.....	46
2.3.4.1 Fallas por insuficiencia estructural.....	46
2.3.4.2 Fallas por defectos constructivos.....	46
2.3.4.3 Fallas por fatiga.....	47
2.3.4.4 Agrietamiento tipo “piel de cocodrilo”.....	49
2.3.4.5 Deformación permanente en la superficie del pavimento.....	50
2.3.4.5.1 Surcos.....	50
2.3.4.6 Fallas por cortante.....	51
2.3.4.7 Consolidación del terreno de cimentación....	52
2.3.4.8 Agrietamiento longitudinal.....	52
3. PAVIMENTO RÍGIDO.....	55
3.1 Diseño del Pavimento Rígido.....	55
3.1.1 Método AASHTO.....	56
3.1.1.1 Variables a considerar.....	57
3.1.1.1.1 Ejes simples equivalentes de 82 kN a lo largo del período de diseño.....	57
3.1.1.1.1.1 Conforme el número de carriles en ambas direcciones.....	57
3.1.1.1.1.2 Conforme el número de carriles en cada dirección...	57
3.1.1.1.2 Desviación normal estándar Z_r	58
3.1.1.1.3 Error estándar combinado S_o	59
3.1.1.1.4 Variación del Índice de Serviciabilidad “ ΔPSI ”.....	60
3.1.1.1.5 Coeficiente de drenaje “ c_d ”.....	60
3.1.1.1.6 Coeficiente de transmisión de	

carga (J).....	61
3.1.1.1.7 Módulo de Elasticidad del concreto	
“E _c ”	62
3.1.1.1.8 Factor de pérdida de soporte L _s ”..	63
3.1.1.1.9 Módulo de Reacción “K”	64
3.1.2 Método PCA (<i>Portland Cement Association</i>).....	64
3.1.2.1 Elementos básicos.....	65
3.1.2.2 Factores de diseño.....	67
3.1.2.2.1 Resistencia a la flexión del	
concreto (módulo de rotura, MR)...	67
3.1.2.2.2 Capacidad soporte de la sub	
rasante o de la sub base (k).....	68
3.1.2.2.3 Período de diseño.....	68
3.1.2.2.4 Tráfico y cargas de diseño.....	69
3.1.2.2.4.1 Proyección.....	71
3.1.2.2.4.2 Capacidad.....	72
3.1.2.2.4.3 Tráfico promedio diario	
de camiones (TPDC).....	73
3.1.2.2.4.4 Distribución de camiones	
en cada dirección.....	74
3.1.2.2.4.5 Distribución de carga de	
eje.....	74
3.1.2.2.5 Factor de seguridad de carga.....	75
3.1.2.3 Diseño de espesores.....	75
3.1.2.4 Diseño de juntas.....	76
3.1.2.4.1 Juntas transversales de	
construcción.....	77
3.1.2.4.2 Juntas transversales de expansión...	78
3.1.2.4.2.1 Juntas con dovelas.....	78

3.1.2.4.2.2 Juntas sin dovelas.....	78
3.1.2.4.3 Juntas transversales de contracción	79
3.1.2.4.4 Juntas longitudinales de contracción	79
3.1.2.4.5 Juntas longitudinales de construcción.....	80
3.1.2.5 Selladores de juntas.....	81
3.2 Ejecución del Pavimento Rígido.....	81
3.2.1 Construcción.....	81
3.2.1.1 Materiales de construcción aptos.....	82
3.2.1.1.1 Evaluación de agregados locales..	82
3.2.1.1.2 Disponibilidad y certificación de materiales cementantes.....	84
3.2.1.1.2.1 Puzolanas.....	86
3.2.1.1.2.2 Escorias.....	87
3.2.1.1.3 Disponibilidad y certificación de aditivos y compuestos de curado..	88
3.2.1.1.3.1 Aditivos.....	88
3.2.1.1.3.1.1 Aditivos para aire ocluido.....	89
3.2.1.1.3.1.2 Los aditivos acelerantes.....	90
3.2.1.1.3.1.3 Los aditivos Retardantes.....	90
3.2.1.1.3.1.4 Aditivos reductores de agua.....	91
3.2.1.1.3.2 Compuestos de curado.....	91
3.2.2 Especificación de los requisitos del plan de gestión y control de calidad por parte del contratista.....	92

3.2.2.1	Definiciones básicas de del plan de gestión de calidad y d el control de calidad por parte del contratista.....	92
3.2.2.1.1	Aseguramiento de la calidad.....	92
3.2.2.1.2	Control de calidad.....	93
3.2.2.1.3	Ensayos para aceptación.....	93
3.2.2.2	Plan de gestión de calidad.....	94
3.2.3	Preparación de la rasante.....	95
3.2.3.1	Introducción.....	95
3.2.3.2	Nivelación y compactación de la sub rasante.....	96
3.2.3.2.1	Actividades previas a la nivelación	96
3.2.3.2.2	Extracción de materiales no aptos de la sub rasante.....	97
3.2.3.2.3	Protección de la rasante.....	97
3.2.3.2.4	Operaciones de construcción de la rasante.....	97
3.2.3.2.5	Requisitos para la compactación...	98
3.2.3.3	Estabilización de la sub rasante.....	101
3.2.3.3.1	Estabilización con cal.....	101
3.2.3.3.2	Estabilización con cemento.....	104
3.2.3.4	Apisonado de prueba	105
3.2.3.5	Recepción de la sub rasante.....	106
3.2.3.6	Protección de la rasante.....	106
3.2.3.7	Condiciones climáticas adversas.....	106
3.2.4	Construcción de bases y sub bases.....	107
3.2.4.1	Introducción.....	107
3.2.4.2	Sub-base.....	107
3.2.4.3	Base estabilizada mecánicamente.....	109

3.2.4.4 Bases estabilizadas químicamente.....	110
3.2.4.4.1 Base tratada con cemento.....	110
3.2.4.4.2 Concreto económico (econocreto)...	113
3.2.4.4.3 Base tratada con asfalto.....	114
3.2.4.5 Capas drenantes.....	116
3.2.5 Preparación para la pavimentación con concreto.....	116
3.2.5.1 Aprobación de la rasante.....	117
3.2.5.2 Funcionamiento de la planta de concreto....	118
3.2.5.2.1 Manejos de los acopios de agregados.....	119
3.2.5.2.2 Ensayo de uniformidad el concreto	121
3.2.5.3 Acerca del equipo de pavimentación.....	121
3.2.5.4 Acerca de la cuerda de guía.....	122
3.2.6 Mezcla de concreto.....	123
3.2.6.1 Introducción.....	123
3.2.6.1.1 Requisitos para una mezcla de concreto.....	123
3.2.6.1.2 Proceso de diseño de la mezcla en laboratorio.....	124
3.2.6.2 Acerca del diseño de la mezcla de concreto.....	125
3.2.6.2.1 Trabajabilidad.....	125
3.2.6.2.1.1 Trabajabilidad del concreto formado por moldes deslizantes.....	126
3.2.6.2.1.2 Resistencia.....	127
3.2.6.2.1.3 Resistencia a los sulfatos.....	127

3.2.6.2.1.4 Incorporación de aire	128
3.2.6.3 Materiales cementantes suplementarios y cementos combinados.....	129
3.2.6.4 Incompatibilidad entre materiales.....	131
3.2.6.5 Requisitos para los agregados.....	132
3.2.6.5.1 Granulometría de los Agregados.....	132
3.2.6.5.2 El caso de los agregados de escorias.....	135
3.2.6.5.3 El caso de los agregados de concreto reciclado.....	136
3.2.6.6 Ajustes en obra del diseño de mezcla de concreto.....	136
3.2.7 Colocación, terminación, texturizado y curado del concreto.....	138
3.2.7.1 Introducción.....	138
3.2.7.2 Factores críticos para la pavimentación con concreto.....	138
3.2.7.3 Entrega del concreto en el sitio.....	139
3.2.7.4 Colocación del concreto.....	139
3.2.7.5 Colocación del acero empotrado y las barras de unión.....	141
3.2.7.6 Consolidación del concreto.....	142
3.2.7.7 Terminación del concreto.....	145
3.2.7.8 Texturizado del concreto.....	146
3.2.7.9 Estriado del concreto.....	148
3.2.7.10 Curado del concreto.....	149
3.3 Mantenimiento para el Pavimento Rígido.....	150
3.3.1 Reparaciones de profundidad parcial.....	151

3.3.1.1 Necesidad.....	151
3.3.1.2 Investigación preliminar.....	152
3.3.1.3 Bordes de la reparación.....	152
3.3.1.4 Remoción.....	153
3.3.1.4.1 Aserrado y cincelado.....	153
3.3.1.4.2 Fresado.....	154
3.3.1.5 Limitaciones.....	155
3.3.1.6 Limpieza.....	155
3.3.1.7 Preparación de juntas.....	156
3.3.1.7.1 Juntas longitudinales.....	156
3.3.1.7.2 Juntas transversales y grietas.....	157
3.3.1.7.3 Junta con la berma.....	158
3.3.1.8 Materiales para la reparación.....	158
3.3.1.8.1 Mezclas de concreto de alta resistencia inicial.....	158
3.3.1.8.2 Mezclas de concreto de fraguado normal.....	158
3.3.1.8.3 Materiales de resistencia rápida patentado.....	159
3.3.1.8.4 Morteros de resina epóxica y concreto epóxico.....	159
3.3.1.9 Colocación del material.....	160
3.3.1.9.1 Colocación del adherente.....	160
3.3.1.9.2 Mezclado.....	160
3.3.1.9.3 Consolidación.....	161
3.3.1.9.4 Acabado.....	161
3.3.1.9.5 Texturizado.....	162
3.3.1.9.6 Cortes con sierra.....	162
3.3.1.9.7 Sellado.....	162

3.3.1.9.8 Curado.....	162
3.3.1.10 Resellado de juntas.....	163
3.3.1.11 Comportamiento en terreno.....	164
3.3.2 Reparaciones de profundidad total.....	164
3.3.2.1 Investigación preliminar.....	164
3.3.2.2 Marcado de las áreas de remoción.....	165
3.3.2.3 Aislamiento del área a remover.....	165
3.3.2.3.1 Aislamiento del carril y de la berma adyacente.....	165
3.3.2.3.2 Aislamiento transversal.....	165
3.3.2.4 Remoción de la losa por izado.....	167
3.3.2.5 Remoción de la losa demoliéndola.....	168
3.3.2.5.1 Demoledoras de pavimentos.....	168
3.3.2.5.2 Martillos neumáticos.....	169
3.3.2.6 Preparación del área de reparación.....	170
3.3.2.6.1 Transferencia de carga.....	170
3.3.2.6.1.1 Pavimentos para tránsito pesado.....	171
3.3.2.6.1.2 Pavimentos de poco tráfico y cortes para brechas.....	173
3.3.2.7 Vaciado del concreto.....	176
3.3.2.8 Sellado de juntas.....	177
3.3.2.9 Comportamiento en el campo.....	178
3.3.3 Fallas.....	179
3.3.3.1 Grietas por adición de aguas.....	181
3.3.3.2 Abultamientos por mal acabado.....	181
3.3.3.3 Superficie antiderrapante.....	182
3.3.3.4 Sangrado.....	182
3.3.3.5 Deficiente curado.....	182

3.3.3.6 Compactación inadecuada del concreto.....	183
3.3.3.7 Desportillamiento de losas.....	183
3.3.3.8 Grietas plásticas.....	184
3.3.3.9 Grietas duras o estructurales.....	184
3.3.3.10 Grietas duras por contracción del concreto	184
3.3.3.11 Grietas duras por deficiencia estructural de la losa.....	185
3.3.3.12 Grietas duras por bombeo de la sub rasante.....	185
3.3.3.13 Grietas duras por deficiente compactación de la terracería.....	186
4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS.....	187
4.1 Introducción.....	187
4.2 Especificaciones.....	187
4.2.1 Proyecto Construcción ruta RN - 13 tramo Génova - Caballo Blanco.....	187
4.2.2 Proyecto Ampliación CA - 9 - Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia.....	189
4.3 Renglones de costos unitarios.....	190
4.3.1 Integración de costos unitarios para el Pavimento Flexible.....	190
4.3.2 Integración de costos para un Pavimento Rígido.....	197
4.4 Costos totales.....	205
CONCLUSIONES.....	207
RECOMENDACIONES.....	209
BIBLIOGRAFÍA.....	211
APÉNDICE.....	213

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Esquema de esfuerzos debido a las cargas.....	10
2. Esquema de las cargas por rueda para diseño (ruedas duales).....	29
3. Porcentaje de camiones en el carril de diseño en una carretera de varios carriles.....	70
4. Detalle de diámetros comerciales de dovelas respecto al espesor de la losa.....	80
5. Curvas de humedad – densidad típica, que muestran el efecto del contenido de humedad en la densidad.....	100
6. Factor de trabajabilidad versus factor de grosor para combinación de agregados.....	134
7. Detalle de sección típica para una carretera tipo “A”.....	214
8. Detalle de sección típica para una carretera tipo “E” modificada.....	214
9. Ubicación de tensiones estimadas en el procedimiento de diseño de pavimentos.....	215

TABLAS

I.	Períodos de diseño.....	17
II.	Espesores mínimos sugeridos.....	20
III.	Factor de distribución por carril.....	23
IV.	Normas AASHTO y ASTM.....	24
V.	Valor percentil por nivel de tránsito.....	25
VI.	Grados de asfalto de acuerdo al tipo de clima.....	26
VII.	Espesores mínimos de capas asfálticas sobre bases.....	27
VIII.	Tipos, manifestaciones y causas de fallas en pavimentos flexibles.....	47
IX.	Principales factores que afectan a los tres tipos básicos de fallas de un pavimento flexible.....	48
X.	Porcentaje de camiones en el carril de diseño.....	57
XI.	Número de carriles en una dirección.....	58
XII.	Valores de Z_r en función de la confiabilidad R.....	58
XIII.	Niveles de confiabilidad R en función del tipo de carretera.....	59
XIV.	Confiabilidad y factores de seguridad recomendados.....	59
XV.	Calidad del drenaje.....	61
XVI.	Valores de coeficiente de drenaje " C_d ".....	61
XVII.	Valores de coeficiente de transmisión de carga (J).....	62
XVIII.	Correlación entre la resistencia a la compresión y el Módulo de Elasticidad " E_c ".....	63
XIX.	Valores del factor de pérdida de soporte L_s por el tipo de sub base o base.....	63
XX.	Efectos de la sub base granular sobre los valores de k.....	68
XXI.	Tasas anuales de crecimiento con sus correspondientes factores de proyección.....	69
XXII.	Materiales más comunes para el sellado de juntas.....	81

XXIII.	Métodos de remoción.....	166
XXIV.	R. 1 Reacondicionamiento de la sub rasante.....	190
XXV.	R. 2 Capa de sub base.....	191
XXVI.	R. 3 Capa de base granular.....	192
XXVII.	R. 4 Riego de imprimación.....	193
XXVIII.	R. 5 Riego de liga.....	194
XXIX.	R. 6 Concreto asfáltico en caliente.....	195
XXX.	R. 7 Cemento asfáltico para concreto asfáltico AC-20.....	196
XXXI.	R. 8 Estabilización con cal.....	197
XXXII.	R. 9 Cal.....	198
XXXIII.	R. 10 Capa de base granular.....	199
XXXIV.	R. 11 Hechura de mezcla (concreto 4000 PSI).....	200
XXXV.	R. 12 Colocación.....	201
XXXVI.	R. 13 Texturizado.....	202
XXXVII.	R. 14 Curado.....	203
XXXVIII.	R. 15 Corte.....	204
XXXIX.	Resumen de costos totales para el proyecto construcción de la ruta RN-13 tramo Génova – Caballo Blanco.....	205
XL.	Resumen de costos totales para el proyecto ampliación CA-9 - Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia.....	206
XLI.	Resumen de especificaciones para colocación de juntas.....	215
XLII.	Resumen de especificaciones para colocación de dovelas.....	216
XLIII.	Resumen de costos para equipo.....	216
XLIV.	Resumen de costos para mano de obra.....	217
XLV.	Resumen de costos para materiales.....	217

LISTA DE SÍMBOLOS

ACI	Asociación Americana del Concreto.
AASHTO	Asociación Americana de los Funcionarios de la Carretera y del Transporte del Estado.
ASTM	Asociación Americana para las Pruebas de los Materiales.
W₁₈	Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.
Zr	Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.
S_o	Desviación estándar de todas las variables.
ΔPSI	Pérdida de serviciabilidad.
Mr	Módulo de resiliencia de la sub-rasante.
SN	Número estructural.
W₈₂	Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas, a lo largo del período de diseño.
D	Espesor de pavimento de concreto, en milímetros.
P_t	Índice de serviciabilidad.
M_r	Resistencia media del concreto (en MPa) a flexo-tracción a los 28 días (método de carga en los tercios de la luz).
C_d	Coefficiente de drenaje.
J	Coefficiente 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, sub-base o sub-rasante) en la que se apoya el pavimento de concreto.

MR	Módulo de rotura.
TPD	Tránsito promedio diario en ambas direcciones todos los vehículos.
TPDC	Tránsito promedio diario de camiones en ambas direcciones.
TPDA	Tránsito promedio diario anual.
FSC	Factor de seguridad de carga.
ESAL	Ejes equivalentes a 18,000 lbs.

GLOSARIO

ADITIVO

Sustancia que se incorpora en pequeñas cantidades a un ingrediente básico, antes de la mezcla, para conferirle ciertas características.

AGREGADO

Arena, grava, piedra o cualquier otro material inerte, que se mezcla con cal o cemento para la confección de morteros y hormigones.

ANÁLISIS DE COSTOS

Evaluación de los renglones de trabajo, comparándolos con los resultados obtenidos con la finalidad de rectificar los procedimientos de construcción empleados y así escoger la mejor alternativa.

BASE

(Llamada también sub base en el caso del pavimento rígido). Capa de suelo granular, que se encuentra debajo de la carpeta de rodadura, con su cama de asiento, si la llevara. Su función es soportar cargas del procedentes del pavimento; distribuyendo dicha carga hasta la sub rasante.

BERMA	Espacio estrecho entre el pie de un desmonte y la cuneta, destinado a recibir los derrumbes del talud.
BOMBEO	Fenómeno que produce la eyección forzada por las juntas y bordes del pavimento, de una suspensión en agua de los suelos finos de la sub rasante, debido al paso frecuente de cargas pesadas.
CAPA PERMEABLE	Capa de material pétreo provista de abundante cantidad de vacíos no capilares.
CARPETA DE RODADURA	Capa superficial que soporta directamente las cargas de los vehículos, la cuál sirve de protección a las estructuras subyacentes mencionadas anteriormente, además de hacer durable la superficie al tránsito.
COMPACTACIÓN	Operación mecanizada para dar a los suelos y agregados, la densidad conveniente.
CONCRETO ASFÁLTICO	Mezcla compactada en caliente de agregados pétreos, polvo mineral y asfalto, en determinadas proporciones.

CONSOLIDACIÓN	Reducción de los índices de vacíos de un suelo, a consecuencia de la reducción del agua y aire intersticiales, mediante la aplicación de cargas durante un lapso determinado.
COSTO	Conjunto de erogaciones que se efectúan en la ejecución de un proyecto, de acuerdo a los renglones que los componen; los costos pueden ser directos o indirectos.
CURADO	Procedimiento que asegura la temperatura y humedad necesarias para que se cumplan los procesos de fraguado y endurecimiento en condiciones óptimas.
DESPORTILLAMIENTO	Deterioro que se manifiesta en el borde de una estructura.
EMULSIÓN ASFÁLTICA	Dispersión por medios mecánicos de asfalto en agua, a la cual se incorpora un agente emulsivo.
ESCARIFICACIÓN	Proceso mediante el cuál se realizan incisiones poco profundas para facilitar la salida de ciertos humores.
ESCORIA	Residuo resultante de la fundición del hierro en altos hornos.

ESTABILIZACIÓN	Tratamiento de un suelo con el fin de aumentar su capacidad para soportar un pavimento, bajo la acción de cargas determinadas.
FALLA	Movimientos diferenciales en sentido vertical, de las losas rígidas, en las juntas o grietas.
HOMBRO	La parte del camino contigua a la superficie de rodadura, destinada a la detención de vehículos en emergencia y como protección de los efectos de la erosión.
IMPRIMACIÓN	Aplicación de un material bituminoso, de baja viscosidad, para recubrir y aglutinar las partículas minerales, previamente a la colocación de una base o capa superficial.
JUNTA	Separación establecida entre dos partes contiguas de una obra, para permitir su expansión o retracción por causa de las temperaturas ambientes.
MACADAM	Capa de piedras más o menos uniformes, trituradas y trabajadas, a las que en ocasiones une un ligante y tienen muchas veces sus espacios vacíos rellenos con recebo.

MANTENIMIENTO	Es conservar a éste en una condición similar a cuando estaba recién construido.
NIVELACIÓN	Emparejamiento de una superficie a un nivel dado.
PAVIMENTO	Superestructura de una vía, construida sobre la superficie sub rasante y compuesta normalmente por la sub base, la base y la capa de rodadura, cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir los esfuerzos al terreno, distribuyéndolos en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales, así como proveer una superficie lisa y resistente para los efectos del tránsito.
PAVIMENTO FLEXIBLE	Estructura cuya capa superior está constituida por materiales granulares o por mezclas asfálticas, la cual se adapta a las deformaciones de la base.
PAVIMENTO RÍGIDO	Estructura cuya capa superior está constituida por una losa de concreto de cemento Pórtland.
PROMONTORIO	Altura muy considerable del terreno.
RED VIAL	Conjunto de vías debidamente clasificadas.

RIEGO DE SELLO	Recubrimiento de una superficie, con un ligante en estado líquido, seguido usualmente de la aplicación uniforme de un agregado fino.
RODADURA	Es el ancho útil de camino.
SUB BASE	Capa debajo de la base, de menor calidad que ésta y con el fin de servir de soporte ante una mala sub-rasante; sobre la cual se coloca.
SUB RASANTE	Es la cota de la vía, después de haber realizado cortes y rellenos, por lo tanto, es la que determina el movimiento de tierras.
SUPERFICIE DE RODADURA	Área destinada a la circulación de vehículos, o bien la capa sobre la cual se aplican directamente las cargas del tránsito.
SURCO	Hendidura que se hace en la tierra al ararla.
TERRAPLÉN	Macizo de tierra con que se rellena un vacío para llegar al nivel de la sub-rasante.
TRÁFICO	Los peatones y vehículos de todo tipo, con sus respectivas cargas, considerados aisladamente o en conjunto, mientras utilizan cualquier vía.

TRATAMIENTO SUPERFICIAL Riego, sobre la calzada, de un ligante en estado líquido, seguido de un recubrimiento de grava en una o varias operaciones sucesivas.

RESUMEN

Los pavimentos son los elementos estructurales vitales que intervienen en la construcción de carreteras; dentro de los mismos podemos encontrar los pavimentos flexibles, los cuales se encuentran conformados por las capas de sub-rasante, sub-base, base y carpeta asfáltica; cada una cumple con una función en específico. Al llevarse a cabo un proyecto de pavimento flexible, se tiene como punto de partida el proceso de diseño del mismo, el cual se auxilia de dos métodos muy reconocidos dentro de ésta área, como lo son el método AASHTO y el método del Instituto del Asfalto. Luego del diseño, se realiza la ejecución del mismo, etapa dentro de la cual se realizan las diferentes aplicaciones que tienen los pavimentos flexibles, como lo son los tratamientos superficiales, macadam de penetración, riegos de sello, carpeta de arena-asfalto, pavimentos con emulsión asfáltica y el concreto asfáltico en caliente. Para finalizar el proyecto de pavimento flexible, se lleva a cabo el mantenimiento de la red vial pavimentada, realizándose obras como la recuperación y estabilización con emulsión asfáltica y haciéndose mención de los diferentes tipos de fallas que afectan a este tipo de pavimentos.

Por otro lado, se tienen los pavimentos rígidos, los cuales pueden estructurarse por la capa de sub rasante, base y losa de concreto. Para el proyecto de pavimento rígido se trabajaron las tres etapas mencionadas anteriormente para el pavimento flexible. Inicialmente se tiene la etapa de diseño, que incluye el método AASHTO y el método PCA (*Pórtland Cement Association*).

Al continuar con la ejecución del mismo, se mencionan todos los aspectos que intervienen en el proceso de construcción; así mismo se menciona el plan de gestión de calidad, aspecto de mucha importancia para obtener una buena obra civil. También se debe tomar en cuenta la preparación de la rasante, la construcción de la base y sub base, llegándose así a los trabajos de preparación previos a la pavimentación con concreto hidráulico. Seguidamente se entra en detalle sobre la mezcla de concreto y todo lo que conlleva su realización; terminando con la colocación, terminación, texturizado y curado del concreto.

Para finalizar el proyecto de pavimento rígido, se lleva a cabo el mantenimiento del mismo, en el cual se realizan reparaciones de profundidad parcial y reparaciones de profundidad total. Por último se mencionan las diferentes fallas que pueden llegar a afectar un pavimento rígido.

El último capítulo se encuentra conformado por los costos de ejecución que intervinieron en los proyectos: construcción de la ruta RN-13 tramo Génova – Caballo Blanco y la ampliación CA-9-Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia; estimándose el costo total de ejecución de cada proyecto, realizándose con cada uno de los dos pavimentos mencionados anteriormente, y concluyéndose en cuál es la mejor opción para realizar cada uno de los dos proyectos.

OBJETIVOS

General

Exponer los pavimentos flexibles y rígidos, así como su proceso constructivo, el cual comprende varias etapas, como lo son: diseño, ejecución y mantenimiento de los mismos; así como las diferentes aplicaciones que poseen, regidos a las normas y especificaciones vigentes para su construcción.

Específico

Comparar los pavimentos a base de asfalto con los pavimentos de concreto hidráulico, en cuanto a costos de ejecución se refiere; mediante la realización de dos proyectos de carreteras, actualmente en ejecución, los cuáles son: la construcción de la ruta RN-13 tramo Génova – Caballo Blanco y la ampliación CA-9-Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia; y en base a esto, concluir con la mejor opción, para la realización de cada proyecto.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se presentan dos métodos aplicados a la construcción de carreteras; teniéndose por un lado, el pavimento a base de asfalto conocido también como pavimento flexible, debido a su comportamiento ante las cargas ocasionadas por los vehículos que lo transitan. Dicho comportamiento se presenta de un modo plástico. Por otro lado, se tiene el pavimento construido con concreto hidráulico, llamado también pavimento rígido.

Siendo éstos dos métodos constructivos, vitales para la realización de una carretera, se considera de mucha importancia realizar un análisis comparativo de costos entre los mismos; deduciéndose de dicha comparación la conveniencia de la realización de un proyecto determinado, aplicando uno de los dos procesos constructivos mencionados anteriormente.

Inicialmente se realiza una breve introducción sobre cada uno de los dos tipos de pavimentos tratados en el presente trabajo de investigación, haciendo mención de la función del pavimento y los diferentes elementos estructurales que lo conforman. Seguidamente se entra en detalle respecto a los procesos de diseño, ejecución y mantenimiento de cada uno de los pavimentos.

Finalizando con un análisis comparativo de costos, realizado para dos proyectos en particular; los cuáles son: la construcción de la ruta RN-13 tramo Génova – Caballo Blanco y la ampliación CA-9-Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia; los cuales se encuentran en ejecución actualmente.

Finalmente, se llega a las conclusiones respecto a la conveniencia del uso de cada tipo de pavimento, dependiendo de las condiciones del proyecto y los costos, que la aplicación que cada método constructivo implicará.

1. DEFINICIONES DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLE Y RÍGIDO

1.1 Pavimento Flexible

El pavimento flexible también conocido como pavimento de asfalto es una estructura formada por varias capas como lo son la sub-rasante, la sub base, la base y la carpeta asfáltica; cada una con una función determinada, las cuales en conjunto tienen los siguientes propósitos:

- a. Resistir y distribuir adecuadamente las cargas producidas por el tránsito. El pavimento flexible debe estar constituido de manera tal que las cargas, producidas por el tránsito, no provoquen deformaciones de ningún tipo en su estructura, siendo de mucha importancia el espesor que el mismo tenga.
- b. Tener la impermeabilidad necesaria. Este pavimento debe ser lo suficientemente impermeable para impedir la infiltración que puede darse por parte del agua, afectando la capacidad soporte del suelo. De esto se concluye que es de mucha importancia la existencia de un drenaje adecuado.
- c. Resistir la acción destructora de los vehículos. El pavimento debe ser resistente respecto al desgaste y desprendimiento de partículas que se obtiene como consecuencia del paso de los vehículos.
- d. Resistir los agentes atmosféricos. Como un efecto continuo de su presencia, los agentes atmosféricos provocan la meteorización y alteración de los materiales que componen el pavimento, reflejándose este problema, en la vida económica y útil del mismo.

Por lo tanto deben procurarse materiales de mayor calidad y resistentes a los agentes físicos y químicos.

- e. Poseer una superficie de rodadura adecuada, que permita fluidez y comodidad hacia el tránsito de vehículos. La superficie del pavimento, debe proporcionar un aspecto agradable, seguro y confortable, de manera que el deslizamiento de los vehículos sea óptimo. Esta superficie, que debe ser lisa, también debe ser antideslizante en caso de estar húmeda.
- f. Ser flexible para adaptarse a ciertas fallas de la base o sub-base. La flexibilidad del pavimento es muy importante en caso de presentarse asentamiento en alguna de sus capas; pudiendo así adaptarse a las pequeñas fallas sin necesidad de reparaciones costosas.

1.1.1 Conformación

Los pavimentos flexibles están formados por una carpeta bituminosa apoyada sobre dos capas no rígidas, la base y la sub base, las cuales se encuentran conformadas por materiales que deben llenar las especificaciones requeridas. La calidad de estas capas va disminuyendo con la profundidad.

1.1.2 Función del pavimento

El pavimento debe ofrecer una superficie buena y resistente, con la rugosidad necesaria para garantizar buena fricción con las llantas del vehículo, además de tener el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos. Además debe poseer la resistencia y características mecánicas apropiadas para soportar las cargas debidas al tránsito, sin provocar fallas y ni deformaciones permanentes.

Las características de resistencia y deformabilidad son necesarias para la distribución de esfuerzos, de modo que lleguen a la sub rasante a niveles tolerables que no produzcan fallas, asentamientos u otras deformaciones perjudiciales.

La base, en los pavimentos flexibles, estará formada por materiales friccionantes, cuya capacidad de carga es baja, debido a la falta de confinamiento, por lo que se requiere que sobre la base exista una capa de material cohesivo y resistente a la tensión, como lo es la capa asfáltica.

1.1.3 Funciones de las distintas capas de un Pavimento Flexible

1.1.3.1 Sub base

La función de la sub base, en un pavimento flexible, es puramente económica, buscando así obtener un espesor utilizando el material más barato posible. Podría construirse dicho espesor con materiales de alta calidad como en el caso de la base, pero usualmente se hace aquella más delgada y se sustituye en parte por la sub base que es de menor calidad, trayendo como resultado un aumento en el espesor total del pavimento, pues es un hecho que cuando menor es la calidad del material utilizado, mayor será el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

Otra función de la sub base es la de servir de transición entre la base y la sub rasante; ya que el material de la base es granular más o menos grueso y el de la sub base es más fino que le anterior, de esta manera sirve como filtro para evitar que el material de la base se incruste en la sub rasante. La sub base sirve también para absorber las deformaciones que provienen de la sub rasante y que pueden ser perjudiciales para el pavimento en general.

Así también lo son los cambios volumétricos asociados a los cambios de humedad. La sub base sirve también como drenaje para desalojar el agua que se infiltre en el pavimento y para impedir la ascensión capilar hacia la base de agua procedente de la terracería.

De las funciones mencionadas anteriormente, la estructural y la económica son las que más se proyectan en la construcción de pavimentos, el resto dependen de las circunstancias y de los materiales con los que se cuente para la sub base. Generalmente las dos cualidades que se buscan en el material de sub base son: la resistencia friccionante y la capacidad de drenaje; teniendo cada una, en su razón de ser, la importancia de su preferencia. La resistencia friccionante contribuirá a la resistencia en conjunto del pavimento, garantizando buen comportamiento en cuanto a deformabilidad se refiere, como resultado de una buena compactación. La capacidad de drenaje, igualmente importante, es necesaria debido a la doble función que realiza tanto con el agua que se infiltra de la superficie, como la que asciende por capilaridad.

Los espesores de sub base, son muy variables y dependen de cada proyecto específico, pero suele considerarse 12 a 15 cm como la dimensión mínima constructiva.

Los materiales consistirán en materiales de tipo granular con las siguientes propiedades mínimas: un valor soporte (CBR) del 30% sobre muestra saturada y compactada al 100% del Proctor Modificado u otra compactación que el diseñador especifique; un índice plástico (IP) no mayor de 9 y un límite líquido (LL) no mayor de 40. Los materiales de sub base deben ser de fácil compactación para alcanzar la densidad máxima determinada. En el caso de que contengan gravas o rocas, éstas no deben ser mayores de los 2/3 del espesor de la sub base.

Cuando la compactación de la sub base resulte difícil por falta de finos, pueden seguirse dos alternativas: se le agregan los finos o, si ésta operación resulta cara en valor y/o trabajo, deben buscarse otros bancos de material que reúnan las especificaciones.

Cuando existan alternativas para el uso de varios bancos, dentro de los límites razonables de acarreo y/o calidad, se escogerá el que disponga de menor porcentaje de material que pase el tamiz 200, que tenga mayor CBR y menor índice plástico (IP).

Es muy importante que los bancos de materiales para sub base, llenen las especificaciones requeridas y se encuentren libres de materia vegetal, basura o terrones de arcillas y otras materias perjudiciales. Debe tenerse presente y tomar en cuenta que un gran número de fallas en los pavimentos se debe a sub bases que no llenan las especificaciones requeridas, que han sido mal compactadas o que se han contaminado debido a la falta de un adecuado drenaje o por falta de control de la sub rasante.

1.1.3.2 Base

Su función primordial es la de proporcionar un elemento resistente que transmita los esfuerzos producidos por el tránsito, hacia la sub base y sub rasante, en una intensidad adecuada. Esta también reduce el espesor de la carpeta más costosa. Muchas veces la base también debe trabajar como la sub base, respecto a la doble función de drenaje mencionada anteriormente.

Básicamente el material que constituye a la base, en el pavimento flexible, debe ser friccionante y provisto de vacíos.

La primera garantizará la resistencia adecuada y la permanencia de dicha resistencia con la variación de las condiciones que se puedan presentar, como podría ser el contenido de agua. Es lógico que no basta sólo con emplear material friccionante para garantizar la resistencia deseada, es necesaria también una compactación adecuada, necesaria para adquirir la compacidad y trabazón estructural requerida para una buena base. Los materiales utilizados para la base suelen someterse a procesos exigentes para su aprobación como lo es la trituración, produciendo efectos favorables para la resistencia y deformabilidad de la estructura a construir, ya que se obtienen partículas con formas convenientes para un reacomodo adecuado; además de esto, se deben llenar otras especificaciones por lo que es necesario tamizar dicho material.

Los espesores de las bases son muy variables de acuerdo con el proyecto de que se trate, pero suele considerarse que 12 o 15 centímetros, es el espesor mínimo que conviene construir.

Los materiales de grava o piedra triturada, provienen de la explotación de minas, de roca o piedras naturales. Los materiales retenidos en el tamiz No. 4, son agregados gruesos; los que pasan el tamiz No. 4, agregados finos; y los que pasan el tamiz No. 200, forman el relleno mineral. El material de relleno deberá estar libre de sustancias deletéreas o talcosas, poseen propiedades ligantes tales que permitan una buena compactación y contribuyan formar una capa de base bien ligada y densa. Los finos, juntamente con el agregado mineral, deberán tener un límite líquido menor de 25, un índice plástico menor de 9, y el porcentaje que pase el tamiz No. 200 deberá ser igual o menor al que pasa el tamiz No. 40. En el caso que sea necesario agregar material de relleno, para ajustarse a los requisitos de graduación o para obtener una cohesión satisfactoria del material, deberá mezclarse uniformemente todo el material de la base.

Materiales a base de arena - arcilla, son mezclas que, debidamente proporcionadas, tienen considerable resistencia a la desintegración, cuando han sido compactadas con la humedad óptima a su máxima densidad. En estas condiciones llegan a tener alto valor soporte arriba del 80% de CBR. Para que mantengan estas características, es necesario imprimarlas inmediatamente, después de construidas, aunque posteriormente se coloque la carpeta de rodadura. Son consideradas muy buenas bases mientras mantengan sus características de máxima densidad y humedad óptima, pero muy deficientes al perder humedad más allá de límites razonables, pues se desintegran rápidamente pierden de manera sensible su valor soporte. Sin son debidamente protegidas, con buenos drenajes, sub drenajes y una carpeta de rodadura, dan resultados excelentes y su construcción es económica.

Lo óptimo a requerir de estos materiales es que si son arenas, sean duras, angulosas y preferiblemente silíceas; si son arcillas, deberán ser de calidad uniforme y estar libres de terrones, materias vegetales y sustancias dañinas.

La fracción que pasa por el tamiz No. 200, será menor del 50% de la fracción que pasa el tamiz No. 40. Además de los requisitos anteriores, la base terminada debe tener un valor soporte arriba del 80%, un límite líquido no mayor de 25 y un índice plástico igual o menor de 9.

En resumen, la base debe proporcionar una superficie de rodadura adecuada, con textura y color conveniente, además de resistir los efectos abrasivos del tránsito. Es muy importante mencionar que esta capa debe impedir, hasta donde sea posible, la infiltración del agua al interior del pavimento.

1.1.3.3 Capa de rodadura

Es la capa que se coloca sobre la base. Su objetivo principal es proteger la estructura de pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores. Evita la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito de vehículos.

La capa de rodadura también contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas, si su espesor es apreciable (mayor de 4 centímetros).

1.2 Pavimento Rígido

Son los pavimentos conformados por cemento Pórtland, arena de río, agregado grueso y agua, tendido en una sola capa. Dependiendo de la necesidad, estos pavimentos pueden estructurarse por la capa de sub base y base, conformando así una losa de concreto, de espesor, longitud y ancho variables.

Los pavimentos rígidos o hidráulicos como se les conoce también, defieren de los pavimentos de asfalto o flexibles, en que poseen una resistencia considerable a la flexión, además de que se ven considerablemente afectados por los cambios de temperatura. Los pavimentos rígidos están sujetos a los siguientes esfuerzos:

- a) Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.
- b) Esfuerzos directos de compresión y cortadura, causados por las cargas de las ruedas.

- c) Esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.
- d) Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.
- e) Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

Debido a la relación que existe entre los pavimentos rígidos y los esfuerzos anteriormente mencionados y para que los pavimentos cumplan con su vida útil como se espera, es necesario basarse en los siguientes factores:

- a) Volumen, tipo y peso del tránsito a servir en la actualidad y en un futuro previsible.
- b) Valor relativo de soporte y características de la sub rasante.
- c) Clima de la región.
- d) Resistencia y calidad del concreto a emplear.

Estos factores son de mucha importancia para que el pavimento sea óptimo y económico. Por ejemplo el espesor de la losa de concreto es muy grande comparado con el requerido, es decir, que posee una carga superior a la que realmente soporta, tendrá un comportamiento satisfactorio pero su costo de construcción será muy elevado; al contrario, si el espesor es menor que el requerido, se acortará su vida de servicio, teniendo un costo de conservación elevado, obteniéndose un comportamiento poco satisfactorio.

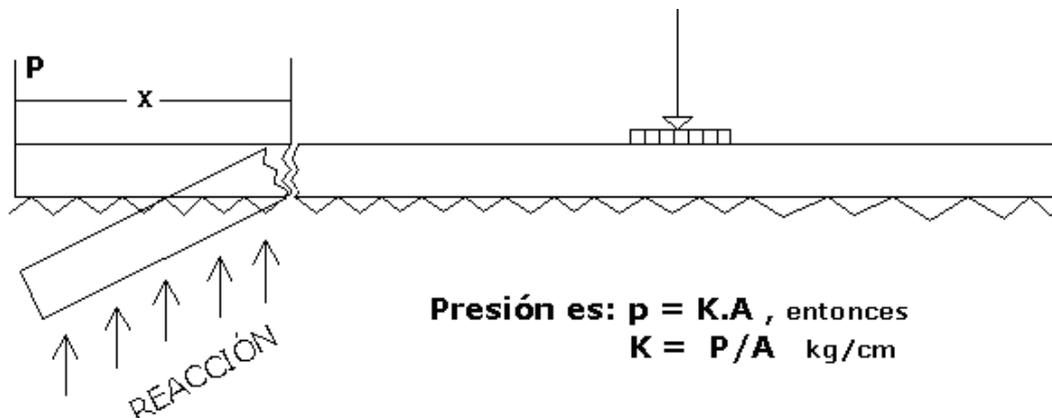
Es necesario el conocimiento del volumen del tránsito además de sus características, tanto actual como futuro, de tal manera que se puedan fijar aspectos como el número y ancho de las vías, el peso de las cargas por rueda, muy importante a la hora de calcular el espesor de las losas.

Debido a esto es muy importante toda recopilación de datos que se pueda obtener con relación al tránsito en el lugar; para esto puede recurrirse a los censos de tránsito en el lugar en estudio.

La realización de los censos de tránsito es muy relevante para estimar el tránsito futuro. Para esto debe realizarse un estudio de las características comerciales, turísticas, etc., de la región en la cuál se realizará el proyecto, densidad poblacional, vinculación de la carretera con otras existentes y el estudio de los volúmenes de tránsito y cargas de ruedas sobre caminos de igual importancia existentes en otras zonas. Además de la información recopilada anteriormente, es necesario investigar sobre la existencia de fábricas, minas, etc., cuyo tránsito pueda valorarse, el cuál va a formar parte del nuevo proyecto.

Respecto a los esfuerzos generados por las cargas, los de flexión son los más relevantes en las losas. Mediante estudios teóricos y ensayos en losas, se ha comprobado que el punto crítico de una losa de espesor uniforme, es el correspondiente a la esquina de la misma, es decir, el ángulo formado por un borde exterior y una junta transversal.

Figura 1. Esquema de esfuerzos debido a las cargas.



1.2.1 Funciones de las distintas capas de un Pavimento Rígido

1.2.1.1 Sub base

Normalmente es muy necesaria y casi siempre las condiciones de la sub rasante la exigen. Sus funciones son:

- Eliminar la acción de bombeo.
- Aumentar el valor soporte y proporcionar una resistencia más uniforme a la losa de concreto.
- Hacer mínimos los efectos de cambio de volumen en los suelos de la sub rasante.

Después de la selección del tipo de pavimento de concreto, tipo de sub base, si es necesaria y tipo de hombros (con o sin hombros de concreto, mordientes y cunetas o mordientes integrados), prosigue el espesor de diseño, que es determinado en base a los siguientes factores de diseño:

- Resistencia a la flexión del concreto (módulo de ruptura, MR).
- Resistencia de la sub rasante, o combinación de la sub rasante y la sub base (k).
- Los pesos, frecuencia y tipo de carga de eje de camión, que el pavimento tiene que soportar.
- Período de diseño, el cual en éste u otro procedimiento de diseño de pavimento es usualmente tomado de 20 años, pero puede ser mayor o menor.

1.2.1.2 Base

Es la capa que se coloca debajo de las losas de concreto y arriba de la sub base. La base puede ser de materiales granulares tales como piedra o grava triturada, de arena y grava, de mezcla o estabilizaciones mecánicas de suelos y agregados, o bien suelo – cemento, e inclusive de productos bituminosos y agregados pétreos. Las funciones de la base, en los pavimentos de concreto, en su orden de importancia son:

- Prevenir el bombeo.
- Ayudar a controlar los cambios de volumen (hinchamiento y encogimiento), en suelos susceptibles a sufrir este tipo de cambios.
- Proporcionar una superficie uniforme para el soporte de las losas.
- Aumentar la capacidad estructural del pavimento.
- Prevenir la desificación que ocurre en las bases granulares bajo el tráfico.

1.2.1.3 Capa de rodadura

Es la capa superficial de concreto de cemento Pórtland, es decir, la losa en sí, cuyas funciones son:

- Proveer un valor soporte elevado, para que resista muy bien las cargas concentradas que provienen de ruedas pesadas, trabajando a flexión, y lo distribuye bien al material existente debajo.
- Textura superficial poco resbaladiza, aún cuando se encuentre húmeda, salvo que esté cubierta con lodo, aceite u otro material deslizante.

- Proteger la superficie, sobre la cual está construido el pavimento, de los efectos destructivos del tránsito.
- Prevenir a la superficie de la penetración del agua.
- Buena visibilidad, por su color claro, da una mayor seguridad al tráfico nocturno de vehículos.
- Gran resistencia al desgaste, con poca producción de partículas de polvo.

2. PAVIMENTO FLEXIBLE

2.1 Diseño de un Pavimento Flexible

El diseño de pavimentos flexibles incluye la superficie con concretos o mezclas asfálticas. El concepto del diseño de pavimentos flexibles es determinar primero el espesor de la estructura, basado tanto en el nivel de tránsito como en las propiedades de los materiales.

Para el diseño de espesores de pavimentos flexibles, se conocen dos métodos, que son:

- Método de AASHTO
- Método del Instituto de Asfalto

2.1.1 Método de AASHTO

Para la implementación del presente método se debe hacer uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Log}_{10}W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \text{Log}_{10}(\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{\frac{0.40 + 1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}_{10} M_r - 8.07$$

En donde:

W_{18} = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.

S_o = Desviación estándar de todas las variables.

Z_r = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.

M_r = Módulo de resiliencia de la sub rasante.

SN = Número estructural.

2.1.1.1 Variables a considerar

Las variables a considerar en este método son:

2.1.1.1.1 Variables en función del tiempo

Existen dos tipos que deben tomarse en cuenta y son:

- El período de diseño
- La vida útil del pavimento

El período de diseño es el tiempo total para el cual se diseña un pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente.

La vida útil del pavimento, es aquel tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el tiempo en el que alcanza el mínimo de serviciabilidad.

El período de diseño puede llegar a ser igual a la vida útil de un pavimento, en los casos en que se consideren reconstrucciones ó rehabilitaciones a lo largo del tiempo.

El período de diseño comprende varios períodos de vida útil que son: el de pavimento original y el de las rehabilitaciones.

Tabla I. Períodos de diseño

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 - 40 años
Troncales Suburbanas	15 - 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 - 20 años
Colectoras Rurales	

2.1.1.1.2 Variables en función del tránsito

Es el número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (80 kN) ó ESAL's.

2.1.1.1.3 Confiabilidad (R)

Este valor se refiere al grado de seguridad de que el diseño de la estructura de un pavimento, pueda llegar al fin de su período de diseño en buenas condiciones.

2.1.1.1.4 Sub rasantes expansivas

En el caso de existir las mismas por efecto de saturación, es necesario analizar la pérdida de serviciabilidad debido a ésta causa, haciendo los análisis de laboratorio a los materiales existentes en el proyecto.

2.1.1.1.5 Criterios para determinar la serviciabilidad

La serviciabilidad de una estructura de pavimento, es la capacidad que tiene éste de servir al tipo y volumen de tránsito para el cual fue diseñado.

El índice de serviciabilidad se califica entre 0 (malas condiciones) y 5 (perfecto). Para el diseño de pavimentos debe asumirse la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final; la inicial es función directa del diseño de la estructura de pavimento y de la calidad con que se construye la carretera; al final va en función de la categoría del camino y se adopta en base al criterio del diseñador.

Serviciabilidad inicial

Po = 4.5 para pavimento rígidos

Po = 4.2 para pavimento flexibles

Serviciabilidad final

Pt = 2.5 ó más para caminos principales

Pt = 2.0 ó más para caminos de tránsito menor

2.1.1.1.6 Propiedades de los materiales

Son las que se valoran para el módulo de resiliencia, ya que en función de este se llega a los coeficientes de los números estructurales.

2.1.1.1.7 Drenajes

Los coeficientes de capa, son los que se ajustan con factores mayores o menores que la unidad para tomar en cuenta el drenaje y el tiempo en que las capas granulares están sometidas a niveles de humedad cerca de la saturación.

2.1.1.2 Determinación de espesores

En los pavimentos de mezclas asfálticas, por medio de la fórmula de diseño, se obtiene el número estructural y en función del mismo se determinan los distintos espesores de las capas que conforman la estructura. El diseño está basado en la identificación del número estructural del pavimento flexible y la cantidad de ejes de carga transitado.

2.1.1.2.1 Determinación del número estructural requerido

Las variables para determinarlo son las siguientes:

- La cantidad estimada de ejes equivalentes por carril, para el período de diseño.
- La confiabilidad (R).
- El conjunto total de las desviaciones estándar. Se recomienda utilizar los valores comprendidos dentro de los intervalos siguientes:

Para pavimentos flexibles	0.40 – 0.50
En construcción nueva	0.35 – 0.40
En sobre-capas	0.50

- El módulo de resiliencia efectivo (que tome en cuenta las variaciones a lo largo del año) de la sub rasante (M_r).
- La pérdida de serviciabilidad.

2.1.1.2.2 Estabilidad y factibilidad de la construcción

En la práctica no deben colocarse capas con espesores menores a los mínimos requeridos, pues las capas con espesores mayores que el mínimo son más estables. Frecuentemente se especifica un valor mayor en el espesor de capas, con el fin de mantener la estructura de pavimento en mejores condiciones para absorber los efectos que producen los suelos expansivos.

Cuando se utilicen, como capa de rodadura, tratamientos superficiales, no se debe considerar aporte estructural de esta capa; pero tiene un gran efecto en la base y sub base, ya que impermeabiliza la superficie y no permite la entrada de agua a la estructura de pavimento.

Algunos valores de espesores mínimos sugeridos para capas asfálticas y base granular en función del tránsito, son dados en la siguiente tabla.

Tabla II. Espesores mínimos sugeridos

Número de ESAL´s	Capas Asfálticas (cm)	Base Granular (cm)
Menos de 50,000	3.0	10
50,000 - 150,000	5.0	10
150,000 - 500,000	6.5	10
500,000 - 2,000,000	7.5	15
2,000,000 – 7,000,000	9.0	15
Más de 7,000,000	10.0	15

Tales mínimos dependen de las prácticas locales y está condicionado el usarlos; los diseñadores pueden encontrar necesario modificar hacia arriba los espesores mínimos, debido a la experiencia obtenida; estos valores son sugeridos y se considera su uso tomando en cuenta que son capas asfálticas sobre bases granulares sin tratar.

2.1.1.2.3 Espesores mínimos en función del número estructural

Basándose en las capas granulares no tratadas, deben estar perfectamente protegidas de presiones verticales excesivas, que lleguen a producir deformaciones permanentes. Para evitar las deformaciones excesivas, los materiales son seleccionados para cada capa así: superficie de rodadura, base granular y sub base con buen CBR, límites entre otros. Para cada uno de los materiales se deben conocer los Módulos de Resiliencia.

2.1.2 Método del Instituto de Asfalto

En este procedimiento de diseño, la estructura de pavimento es considerada como un sistema elástico de capas múltiples. El material en cada una de las capas se caracteriza por su módulo de elasticidad.

Este procedimiento es usado para el diseño de pavimentos de asfalto compuesto de combinaciones de capa asfáltica, base y sub base sin ningún tratamiento; la sub rasante es la capa subyacente más baja y es asumida infinita en el sentido vertical de arriba hacia abajo y en dirección horizontal; las otras capas de espesor finito, se asumen infinitas hasta cierto punto, en el sentido horizontal. Una continuidad ó fricción total, es asumida en la unión entre cada una de las capas para efectos de diseño.

En la metodología adoptada por este método, las cargas sobre la superficie de pavimento producen dos esfuerzos de tensión, que son críticos para propósitos de diseño, estos son: a) el esfuerzo de tensión horizontal sobre el lado de abajo en el límite de la capa asfáltica; y b) el esfuerzo de compresión vertical en la superficie de la sub rasante.

Si la fuerza de tensión es excesiva, pueden resultar grietas en la capa; si la fuerza de compresión vertical es excesiva, resultan deformaciones permanentes en la superficie de la estructura de pavimento por las sobrecargas en la sub rasante. Las deformaciones excesivas, en las capas tratadas, pueden ser controladas por las calidades a que están sujetas las propiedades de los materiales. Todos los materiales se caracterizan por el Módulo de Elasticidad del cual son seleccionados valores específicos, basados en estudios experimentales realizados.

El Módulo de Elasticidad de las mezclas asfálticas, es altamente dependiente de la temperatura que se encuentre sobre el pavimento. El Módulo de Elasticidad es función del tiempo de fraguado.

El Módulo de Resiliencia de los materiales granulares sin tratar, puede variar con las condiciones de esfuerzo en el pavimento. Valores usados en el desarrollo de las tablas de diseño dadas, varían poco desde 103 MPa (15,000 psi) hasta más de 345 MPa (50,000 psi).

En adición a los efectos de cambio mensuales de la temperatura a través del año sobre el módulo dinámico de la capa asfáltica, las curvas de diseño también toman consideraciones sobre el efecto de la temperatura sobre el módulo de resiliencia de la sub rasante y los materiales de la base.

2.1.2.1 Estimación del tránsito

Acá se define la diferencia entre “Período de Diseño” y “Período de Análisis”, de la siguiente forma: un pavimento debe ser diseñado para soportar los efectos acumulados del tránsito en cualquier período de tiempo.

El período seleccionado, en años, se define como “Período de Diseño”; al término de éste, es posible que el pavimento necesite de una acción de rehabilitación mayor, lo cual debe ser una sobre carpeta de refuerzo para restaurarlo a su condición normal. La “vida útil de un pavimento” o “Período de Análisis”, es el tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el momento en que éste alcanza las mínimas condiciones de transitabilidad y se puede extender de forma indefinida por medio de la colocación de sobre carpetas u otras acciones de rehabilitación, hasta que la carretera sea obsoleta debido a cambios significativos como:

- Pendientes
- Alineamiento geométrico
- Otros factores

Debido a que los camiones son los que más daño ocasionan a las carreteras, se debe considerar este tipo de flujo vehicular sobre el carril de diseño, por lo que se utilizan los valores dados en la siguiente tabla.

Tabla III. Factor de distribución por carril

Número de carriles en ambas direcciones	Porcentaje de camiones en el carril de diseño
2	50
4	45
6 ó más	40

El método del Instituto de Asfalto, incorpora factores de ajuste de los ejes equivalentes de diseño, para diferentes presiones de contacto de las llantas sobre el pavimento, en función de la presión de inflado y los espesores de la capa asfáltica.

Este factor de ajuste de los ejes equivalentes, es un dato que caracteriza la importancia que tiene la presión de inflado sobre el espesor de una estructura de pavimento, pues a mayor presión de inflado y menor espesor de capa de rodadura, incrementa en buena medida el número de ejes equivalentes y por lo tanto, es mayor el daño a una estructura determinada.

2.1.2.2 Materiales

Respecto al diseño de espesores de un pavimento flexible, el método del Instituto de Asfalto, considera como parámetro fundamental la evaluación de los materiales para obtener el Módulo de Resiliencia (M_r). Se han establecido valores de correlación entre el módulo y la prueba del CBR (AASHTO T-193); los valores obtenidos son bastante aproximados, sin embargo, para obtener resultados más precisos es necesario llevar a cabo la prueba del Módulo de Resiliencia (M_r) de la sub rasante. Para calcular el módulo de resiliencia a partir del CBR, se han desarrollado las siguientes fórmulas:

$$M_r \text{ (MPa)} = 10.3 \times \text{CBR}$$

$$M_r \text{ (psi)} = 1,500 \times \text{CBR}$$

Es necesario, para aplicar la metodología descrita, que se incluyan métodos de prueba normados por AASHTO y ASTM, los cuáles deben de considerar los parámetros indicados en la tabla número 4.

Tabla IV. Normas AASHTO y ASTM

Prueba	Uso	AASHTO	ASTM
Límite líquido	Clasificación	T-89	D-4318
Límite plástico	Clasificación	T-90	D-4318
Granulometría	Clasificación	T-88	D-422
Compactación	Relación humedad - densidad	T-180	D-1557
CBR	Básico para diseño de espesores	T-193	D-1883

Continúa

Valor R	Básico para diseño de espesores	T-190	D-2844
Equivalente de arena	Clasificación	T-176	C-293-79
Pasa tamiz No. 200	Clasificación	T-11 Y T-27	C-117-89 y C-136-84
Módulo de resiliencia (Mr)	Básico para diseño de espesores	Se utiliza el método MS-1 del propio Instituto de Asfalto	

En función del tránsito esperado, sobre el pavimento en estudio, el método del Instituto de Asfalto recomienda los siguientes valores percentiles, para calcular el Módulo de Resiliencia de diseño de la capa de sub rasante.

Tabla V. Valor percentil por nivel de tránsito

Nivel de tránsito	Valor percentil para diseño de sub rasantes
< de 10,000 ESAL's	60
Entre 10,000 y 1,000,000 ESAL's	75
> de 1,000,000 ESAL's	87.5

Con los valores obtenidos en el laboratorio, del Módulo de Resiliencia, de las muestras de campo, se deberá calcular el Mr de diseño de la capa de la sub rasante usando los percentiles de la tabla anterior.

Para que el diseño de los espesores de una estructura de pavimento, cumpla con su función, es necesario que los requerimientos de compactación de las capas de base y sub base, se adapten a las siguientes recomendaciones:

- Las capas de base y sub base, que son formadas por materiales granulares sin ningún tratamiento (no estabilizadas), se deben compactar con un contenido de humedad de más o menos de 1.5% de la humedad óptima, para alcanzar la densidad mínima del 100% de la densidad seca máxima de laboratorio; para tal efecto se recomiendan algunos valores para las diferentes pruebas a realizarse con materiales de sub base y base.
- Es importante señalar también, que el método incluye factores de medio ambiente y diferentes clases de tipos de asfalto; para tal caso se consideran tres diferentes temperaturas, dependiendo de la región en donde se pretenda construir el pavimento: climas fríos (7°C), templados (15.5°C) y cálidos (24°C); en los cuales se utilizan cementos asfálticos desde el AC-5 hasta el AC-40, por lo que se recomienda la siguiente clasificación:

Tabla VI. Grados de asfalto de acuerdo al tipo de clima

Clima	Temperatura media anual del aire (TMAA)	Grado de asfalto
Frío	Menor o igual a 7°C	AC-5, AC-10
Templado	Entre 7° y 24°C	AC-10, AC-20
Cálido	Mayor de 24°C	AC-20,AC-40

Para espesores mínimos, en función de la cantidad de tránsito de ejes equivalentes, este método recomienda los siguientes valores para superficies de rodadura construidas sobre bases granulares normales, sin ningún proceso de estabilización.

Tabla VII. Espesores mínimos de capas asfálticas sobre bases

Cantidad de ejes equivalentes	Condición del tránsito	Espesores mínimos de la capa asfáltica, en centímetros
Hasta 10,000	Ligero	7.5
Entre 10,000 y 1,000,000	Mediano	10
Mayor de 1,000,000	Pesado	12.5 o más

2.1.2.3 Espesores de diseño

Para el diseño final de los espesores de una estructura de pavimento, el método del Instituto de Asfalto, proporciona diversos nomogramas para los sistemas métrico, decimal e ingles; los cuales abarcan todas las variables que se puedan involucrar en el diseño y que fueron analizadas anteriormente. Los nomogramas son presentados a escala logarítmica para los siguientes parámetros:

- Las tres condiciones climáticas consideradas en la temperatura media anual del aire.
- Total de ejes equivalentes acumulados durante el período de diseño.
- Módulo de resiliencia de la sub rasante.
- Capa de concreto asfáltico de una sola capa.
- Para cuando se tiene una capa de base sin estabilizar de 15 centímetros.
- Para cuando se tiene una capa de base sin estabilizar de 30 centímetros.

2.1.3 Tráfico y cargas de diseño

Dentro de los diferentes factores influyentes para las cargas de tránsito, pueden mencionarse los siguientes:

Factores principales:

- Carga transmitida por la rueda.
- Área de influencia de la carga.
- Número de repeticiones de la carga.
- Velocidad.

Factores secundarios:

- Área de contacto de la llanta, que determina la presión de contacto.
- Número de llantas en el arreglo.
- Espaciamiento entre ejes.

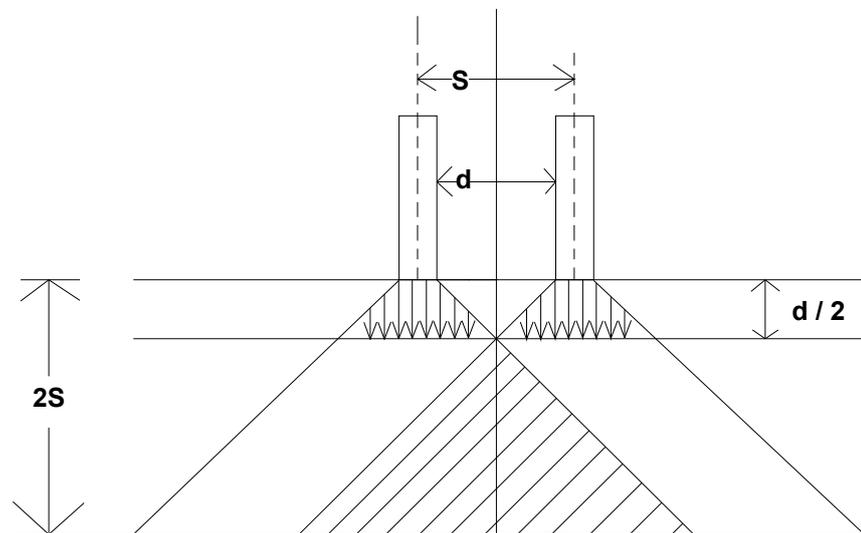
El tipo de vehículos que transitan por un camino, varían dependiendo del tipo de camino que se trate; por ejemplo, es diferente el vehículo utilizado en un camino turístico en donde se podrían observar automóviles de pasajeros, al vehículo utilizado en un camino minero, que serían vehículos de carga de diversos tonelajes dependiendo de las condiciones. Habrá caminos en los cuales el tránsito será mixto, como en las regiones agrícolas.

Se puede decir que el tránsito de vehículos es un factor de mucha relevancia en el proyecto de un camino determinado, ya que influye directamente con el diseño geométrico.

Las cargas por rueda para diseño, la profundidad a la cual los esfuerzos resultantes, dados por ruedas duales, son iguales a los de una rueda sencilla, dependen de la separación entre las mencionadas ruedas duales. Cerca de la superficie, las ruedas duales actúan independientemente. Sin embargo, a profundidades mayores, los esfuerzos provocados por ellos se traslapan, pero ellos son menores a medida que la profundidad crece, llegándose a un punto en que dichos esfuerzos son despreciables.

Por medio de análisis teóricos y por medidas directas de los esfuerzos en pavimentos, se a establecido la relación que ay entre la profundidad y la separación de las ruedas duales, teniéndose que a la profundidad aproximada de $d/2$, las ruedas dejan de actuar independientemente y los esfuerzos bajo el pavimento comienzan a combinar sus efectos debido a las dos ruedas, haciéndose despreciable este efecto a la profundidad de $2s$.

Figura 2. Esquema de las cargas por rueda para diseño (ruedas duales)



Los cálculos para determinar la carga por rueda equivalente, pueden basarse ya sea en el criterio de la igualdad de deformación o en el criterio de la igualdad de esfuerzos. Es decir, que si se conoce la máxima deflexión que ocurre bajo un conjunto de ruedas duales, una deflexión que ocurra de la misma cantidad bajo una rueda sencilla, indica que esa rueda es equivalente a las ruedas duales. Lo mismo se puede decir, aproximadamente, acerca de lo que ocurre con los esfuerzos. A profundidades pequeñas, las máximas deflexiones ocurren bajo una rueda, mientras que a mayores profundidades las deflexiones mayores ocurren bajo el centro del conjunto de las dos ruedas.

2.2 Ejecución de un Pavimento Flexible

2.2.1 Tratamientos para los Pavimentos Flexibles

Haciendo referencia a los pavimentos de asfalto, se pueden tener diferentes tipos de aplicaciones, conformándose así, una amplia variedad del uso de dicho método constructivo, como los mencionados a continuación.

2.2.1.1 Tratamientos superficiales

Utilizados frecuentemente en la ciudad de Guatemala, debido a su bajo costo y eficiencia. Está conformado por una superficie de desgaste, formada por grava triturada, con un riego de *Cut Back RC2* o similar.

2.2.1.1.1 Descripción

Es la colocación de una capa de revestimiento de poco espesor, formada por riegos sucesivos y alternados de material bituminoso y agregados pétreos.

La que no da un refuerzo de estructura sino simplemente protege la base de la acción del tiempo y del desgaste. Los tratamientos superficiales no corrigen depresiones, ni deformaciones, ni agrietamientos fuertes, solamente logran una capa impermeable.

2.2.1.1.2 Propósito

Dotar al pavimento de mejores condiciones de impermeabilidad, suavidad para el manejo, prolongar la vida útil del paquete estructural, dar una solución técnica – económica al problema del mantenimiento.

2.2.1.1.3 Criterio

Se puede realizar un tratamiento superficial para tratar una superficie amplia de carretera donde la misma este desgastada en gran parte la capa de rodadura, pero su estructura esta en condiciones de recibir cargas. Cuando la superficie impermeable esta agrietada y permite la entrada de agua en la estructura del camino, la textura de la superficie es inadecuada y se a reducido la resistencia al deslizamiento.

2.2.1.1.4 Procedimientos de ejecución

El procedimiento de ejecución del Pavimento Flexible, consiste en las siguientes etapas:

1. Señalización adecuada en el área de los trabajos.
2. Barrer la superficie total de calzada, con esto se evita que el transito circulante por el carril libre levante polvo que luego se ira a depositar en el riego impidiendo el ligamento entre el betún y el árido.
También se debe mantener siempre húmedo el hombro por el mismo motivo, hasta que esté perfectamente limpia.
3. Marcar la superficie de la calzada con una cuerda a lo largo de la misma, donde empieza la obra, para asegurar la correcta alineación del borde de la superficie a tratar.
4. Fuera del sector de la obra se verifica el funcionamiento del regador de asfalto, y la temperatura en que se encuentra el ligante. Se debe usar bidones partidos para recoger el ligante soltado en la prueba de riego de los picos, de manera de no contaminar el ambiente. Así mismo se debe calibrar el distribuidor de áridos el cual se hace generalmente donde esta apilado el material.

De esa manera se le puede recuperar. Esta calibración se hace de la siguiente forma: se da una abertura y velocidad del distribuidor determinada y se le hace pasar por encima de una lona de 1m x 1m, de esta manera se determina la cantidad de kilogramos que distribuye por metro cuadrado, variando la abertura del distribuidor y manteniendo la velocidad se calibra la cantidad de material por metro cuadrado.

5. Concluida con la tarea anterior se ajusta la altura de la barra de riego de modo que cada punto de la superficie reciba ligante de tres salidas diferentes, además se ajusta el ángulo de la barra para obtener un riego uniforme en toda la calzada.
6. Se debe ajustar la anchura cubierta por la barra de riego de modo que 1/3 del rociado aportado por la última salida de la barra pasa por el centro de la calzada. Esto ará posible que la zona del centro de la calzada reciba la cantidad correcta de asfalto después del tratamiento de la otra mitad de la carretera.
7. Una vez realizados todos estos ajustes se hace una prueba de dotación real de asfalto y con ello una grafica de calibrado de tasa de reparto.
8. Se hace la misma operación anterior en la otra mitad de la calzada.
9. Colocación de bandas de papel fuerte en posición que asegure juntas transversales limpias en el comienzo y fin tramo. La longitud "L" estará determinada por la capacidad de los camiones que se utilicen para el tendido del material pétreo.
10. El asfalto debe aplicarse sólo en superficie completamente seca (se debe evitar, en todo lo posible, la aplicación de tratamientos superficiales durante la estación lluviosa).

11. El regador se coloca a unos 15 m antes del comienzo del tramo a regar, con el propósito de que entre al sector con la velocidad calculada para la cantidad de litros necesarios por metro cuadrado. Cuando llega a la zona de las bandas de papel el operario que va en la cola del camión regador abre la barra de riego y la cierra cuando pasa por la otra banda, en todo el transcurso el camión debe ir a la misma velocidad siempre.
12. La distribución de la gravilla comienza inmediatamente después de la aplicación de asfalto, en la primera mitad se deja sin cubrir una faja de 20 centímetros a lo largo de la línea central, la que se cubre cuando se ejecuta la segunda mitad, para el tratamiento simple, si se ejecuta doble o triple es recomendable cubrir toda el área regada. La distancia entre el distribuidor de áridos y camión regador de asfalto nunca debe ser superior a 75 m (preferiblemente 30m).
13. A la vez que se va cubriendo la superficie con grava, se procede a revisar la misma completando los lugares donde falta grava o sacándola si existiera de más, para ello se debe usar cepillo, palas, etc.
14. Se pasan los dos rodillos neumáticos, que hacen el recorrido hacia atrás y adelante a una distancia de 50 m del distribuidor de áridos, a velocidad no mayor de 8 km/h.
15. Si el tratamiento superficial fuera doble o triple se repite la operación antes descrita pero con la salvedad de colocar la última capa de grava. Se hace un riego de sellado (el total de ligante regado debe ser el determinado por el pliego de especificaciones técnicas).
16. De acuerdo al tipo de ligante utilizado se debe mantener cerrado al tránsito entre 48 y 72 horas, tiempo en que se produce el curado. Una vez cumplido estos plazos se hacen 7 pasadas completas de rodillo neumático.

17. Después de este tiempo se puede abrir al tráfico, dejando en el lugar señales preventivas de material suelto y límites de velocidad.
18. Luego de siete días se procede a retirar el exceso de pedrín con barrido ligero a mano o con barredora mecánica. Si se deja en la calzada puede dañar los vehículos o romper parabrisas.
19. En lugares donde se haya producido exudación, será necesario el extendido de arena gruesa.
20. Se retiran los dispositivos de señalización temporal.

2.2.1.2 Macadam de penetración

Este tipo de tratamiento es utilizado en lugares en donde es muy común el tráfico pesado; conformándose por una capa de superficie de 5 centímetros de espesor, compactada sobre una base de grava triturada, preparada con anterioridad; por lo general se usa asfalto *Cut Back RC2* de curado medio.

2.2.1.3 Riegos de sello

Corresponde al sistema de riego que se a separado, tomando en cuenta la función que desempeña. Este tratamiento tiene los siguientes objetivos:

- Impermeabilizar los pavimentos contra el agua y la humedad.
- Mejorar las características antiderrapantes de los pavimentos construidos.
- Mejorar la visibilidad nocturna o formar señales de tránsito por medio de cambios de colores.

2.2.1.4 Carpeta de arena - asfalto

Tratamientos comúnmente utilizados en las ciudades, debido a que son silenciosos, uniformes y fáciles de limpiar. Son conformados por una proporción de asfaltos y agregados finos. Como material aglutinante se utilizan asfaltos del grado de penetrabilidad a razón de 5, 6 ó 7% máximo por peso del agregado. El mezclado se realiza en planta ordinaria para mezcla en caliente y el tendido y compactación requieren de técnicas usadas en otros pavimentos.

2.2.1.5 Pavimentos con emulsión asfáltica

Pavimentos conformados por agregados pétreos, los cuales consisten en roca triturada, arena y polvillo además de bitumen; consisten también en emulsión asfáltica *MS-2* o similar. En caso de tenerse un espesor igual o mayor a 8 centímetros es recomendable colocarlos en dos capas.

2.2.1.6 Concreto asfáltico en caliente

2.2.1.6.1 Descripción

Esta actividad consistirá en el suministro, colocación, extendido y compactado de una mezcla de concreto asfáltico en caliente. En el espesor requerido, sobre una base granular previamente acondicionada o sobre la superficie de un pavimento existente al cual se pretenda reforzar su estructura. En ambos casos previamente se deberá aplicar un riego asfáltico de liga.

2.2.1.6.2 Propósito

Restitución de las características originales del camino, como ser textura superficial, impermeabilidad, reducción de las deformaciones transversales y longitudinales, seguridad, confort, dotar de una mayor capacidad para distribuir las cargas.

2.2.1.6.3 Criterios

Para la ejecución de este trabajo, se requiere que el tramo a colocar el concreto asfáltico en caliente, no aya experimentado una deflexión mayor que las especificadas; que el deterioro de la capa de rodadura sea generalizado. Depende también de la importancia que posee el tramo para el desarrollo regional.

2.2.1.6.4 Procedimientos de ejecución

Los procedimientos de ejecución para un Pavimento Flexible, son los que se presentan a continuación:

1. Señalización del sector donde se ejecutara la carpeta asfáltica, colocación de conos, carteles de seguridad y personal para desviar el tránsito, en general se realiza primero un carril para permitir la circulación por el otro carril.
2. Barrer la superficie total de calzada, con esto se evita que el transito levante polvo que se ira a depositar en el riego de liga impidiendo el ligamento entre la nueva carpeta y la existente, también se debe mantener siempre húmedo el hombro por mismo motivo, hasta que este perfectamente limpia.

3. Marcar la superficie de la calzada con una cuerda por el borde de la calzada, para asegurar la traza del borde del riego de liga.
4. Fuera del sector de la obra se verifica el funcionamiento del regador de asfalto, temperatura en que se encuentra el ligante. Se debe usar bidones partidos para recoger el ligante soltado de manera de no contaminar el ambiente.
5. Concluida con la tarea anterior se ajusta la altura de la barra de riego de modo que cada punto de la superficie reciba ligante de tres salidas diferentes, además se ajusta el ángulo de la barra para obtener un riego uniforme en toda la calzada.
6. Colocación de bandas de papel fuerte en posición que asegure juntas transversales limpias en el comienzo y fin tramo.
7. El regador se coloca a unos 15 metros antes del comienzo del tramo a regar, con la intención de poder entrar al sector con la velocidad calculada para la cantidad de litros por metro cuadrado, cuando llega a la zona de las bandas de papel el operario que va en la cola del camión regador abre la barra de riego y la cierra cuando pasa por la otra banda, en todo el transcurso el camión debe ir a la misma velocidad siempre.
8. Con todas estas precauciones se procede a efectuar el riego de liga cuyas proporciones podrán variar entre 0.2 a 0.4 litros por m².
La temperatura de aplicación será de 60 a 80 °C. Antes de colocar el concreto asfáltico se deberá esperar un tiempo mínimo de una hora (1 hora) para permitir la evaporación del solvente del asfalto RC-250.
9. Se verifica que la plancha de la terminadora de asfalto este limpia en orden de a evitar defectos en la aplicación. A continuación se procede a calentarla para que no se pegue al principio de la extensión, conjuntamente se debe hacer una calibración previa de la plancha con las alturas requeridas (se colocan tacos de madera con la altura

- requerida), verificar que la tolva de la terminadora esté limpia y seca.
10. Una vez concluidas las tareas anteriormente especificadas se comienza con el extendido de la mezcla cuyo espesor y ancho se ira corrigiendo hasta alcanzar el requerido por el contrato. Cuando la parte trasera de un camión vuelca la carga sobre la extendedora, se debe tener cuidado de no hacerlo de golpe.
 11. La compactación inicial se hace con el rodillo neumático (compactador de llantas). Es importante, en el empleo de esta maquina que las ruedas estén limpias, para evitar que se pegue material de la carpeta, que la presión de las ruedas sea la misma para todas e igual a 6 Kg. /cm^2 .
 12. Para obtener buena compactación, el rodillo de trabajar con sus ruedas motrices tan próximo como sea posible a la terminadora. Hacer pasadas paralelas comenzando desde el borde hacia en centro en la primera media calzada y desde el centro hacia afuera en la segunda media calzada. El número de pasadas completas depende del espesor y material de la mezcla.
 13. La segunda etapa de la compactación, se desarrolla con una apisonadora de rodillo de acero vibratorio. Se debe tener especial cuidado en reducir gradualmente la velocidad, al final de cada pasada, de forma que se pueda invertir la marca sin tirones. Cuando se use esta maquina se debe comprobar además que los rodillos estén limpios para evitar dejar marcas en la superficie, asegurarse que el sistema de riego contiene agua y que funciona. La apisonadora debe ir borrando las huellas dejadas por el rodillo de neumáticos, y debe hacer el mismo recorrido que el de neumáticos. La compactación se debe terminar antes que el material se enfríe demasiado.
 14. Se ejecuta de la misma manera la otra media calzada.

2.3 Mantenimiento del Pavimento Flexible

2.3.1 Mantenimiento de la red vial pavimentada

Estos trabajos consisten en reparaciones generales, de las carreteras pavimentadas, las que pueden ser mantenimiento de rutina o mantenimiento periódico. El concepto de reparaciones generales abarca todo tipo de tareas a realizar tanto de carácter localizado y de tamaño limitado como aquellas en las cuales se debe ejecutar una reparación total o parcial de la calzada:

- Mantener impermeable la superficie de la calzada, evitando el paso del agua a través de ella o del borde del pavimento, el cual debilita las capas inferiores en las que está apoyado.
- Mantener y renovar la calidad de la superficie de la calzada y con ello las buenas condiciones de rodadura y seguridad.

2.3.1.1 Descripción

Consiste en la excavación, extracción y retiro de todo material inadecuado por debajo de la superficie del pavimento existente hasta llegar a la capa no alterada. La colocación en sucesivas capas de material compactadas (no mayor de 10 centímetros) hasta alcanzar la sub rasante, este puede ser base de grava o de roca triturada, para luego colocar mezcla asfáltica la que puede ser fría o caliente. Las causas principales de la aparición del bache son:

- Baja calidad de materiales en la construcción del pavimento.
- Infiltración de agua.
- Disgregación del material bajo la acción del tráfico.
- Estado siguiente al desarrollo de grietas en piel de cocodrilo o de hundimiento.

Por lo tanto si no se procede al relleno del bache, este se ira ampliando progresivamente el hueco y se formaran nuevos baches.

2.3.1.2 Propósito

Corregir daños o defectos superficiales, tales como peladuras, desintegraciones, fisuramiento tipo piel de cocodrilo, daños en la base y sub base debido a la fatiga y fracturamiento que ha sufrido la carpeta asfáltica.

2.3.1.3 Criterio para realizar el mantenimiento

Cuando estos daños aislados afecten el normal desplazamiento del transito constituyendo depresiones que se perciben al circular sobre estas y que su origen no este relacionado con las capas inferiores (como por ejemplo mal drenaje de las aguas subterráneas) y en tanto que el área promedio de estos daños no exceda, de 20 metros cuadrados o no cubra en total mas del 30% de la sección a reparar, mayores extensiones corresponde un proceso de rehabilitación.

2.3.1.4 Procedimiento de ejecución de un Pavimento Flexible

El procedimiento de ejecución de un Pavimento Flexible, se describe así:

1. Señalización del área de los trabajos.
2. Marcado de la zona a reparar con tiza u otro elemento dibujando un rectángulo debiendo ser dos de sus lados perpendicular al eje del camino.
3. Cortar el bache por el rectángulo en forma pareja y vertical.

4. Quitar todo el material suelto y toda el agua que esta contenida dentro del rectángulo.
5. Profundizar el bache hasta encontrar material firme y seco, si este estuviera húmedo se debe dejar abierto el tiempo necesario hasta que se seque.
6. Recortar el fondo del bache de modo que quede plano, horizontal, sin material suelto y compactarlo.
7. Impermeabilizar o ligar la base con el material bituminoso adecuado.
8. Colocación de la mezcla asfáltica (fría o caliente) en una o dos capas de espesor similar, mediante el uso de rastrillos extendedores, sin permitir la segregación de los materiales.
9. Compactación de la mezcla con plancha vibratoria y mazos apisonadores aprobados, asegurándose que la ultima capa compactada que al mismo nivel que el pavimento lindante. En caso de la que superficie a rellenar con mezcla asfáltica sea mayor de los 10 metros cuadrados es aconsejable, por el costo y el rendimiento, distribuir con patrol y usar un compactador neumático autopropulsado y una aplanadora de rodillo liso también autopropulsada.

Después de verificar el acabado de los trabajos se procede a retirar la señalización temporal.

2.3.2 Escarificación, conformación, compactación e imprimación del pavimento existente

2.3.2.1 Descripción

Este trabajo consistirá en la escarificación, desintegración del material constitutivo de la carpeta asfáltica o del tratamiento asfáltico del pavimento original del camino, humedecimiento, mezclado, vuelto a conformar, y compactado de la mezcla lograda.

El trabajo descrito deberá hacerse de modo tal que la capa escarificada llegue a mezclarse con el material de base presente en la estructura del pavimento y/o con el material de base que pudiera agregarse con fines de reforzar la estructura de la misma.

2.3.2.2 Propósito

Corregir los daños y deformaciones generalizados en la calzada, a efecto de constituir una base que soportará inicialmente las cargas de tráfico y que posteriormente recibirá una nueva carpeta asfáltica.

2.3.2.3 Criterios

Se realizará en tramos de carretera excesivamente dañados, donde exista la presencia generalizada de baches.

2.3.2.4 Procedimientos de ejecución

Los procedimientos de ejecución para el mantenimiento de un Pavimento Flexible, son los siguientes:

1. Señalización del área de los trabajos.
2. Utilizando nivelación de precisión, el supervisor tomará las secciones transversales del camino y en tramos máximos de veinte metros, nivelará previo a la ejecución de los trabajos. Amojonar el eje del camino o los diferentes puntos si se tratase de una curva.
3. Ingreso del Escarificador para el proceso de desmenuzado y desintegración de la capa de material a tratar. Cuando la superficie de rodadura a tratar la constituya algún tipo de tratamiento superficial asfáltico se podrá aceptar el uso del desgarrador de la motoniveladora apoyado por un equipo auxiliar vibro compactador, necesario para lograr resultados similares.
4. Quitar todo el material mayor de 1 ½”.
5. Acumular el material en promontorios extendidos longitudinalmente, incorporar el nuevo material si fuese necesario, humedecer uniformemente a medida que se mezcla el material escarificado.
6. Concluida con la tarea anterior se comienza el tendido del material y se procede a la compactación con un rodo vibro compactador que debe ser de tal diseño, peso y calidad que permita obtener la densidad especificada. También es conveniente hacer algunas pasadas con un rodillo neumático con el fin de compactar el material mas fino que queda en la superficie).
7. Nivelación y posterior corte de la base.

8. Barrido para eliminar todo el polvo suelto, para lograr una mejor penetración del asfalto rebajado en la base. Previo a esta operación se debe efectuar un riego tenue de toda la base, para poder así mitigar el polvo restante que no pudo sacar la barredora mecánica.
9. Riego de Imprimación de la base con el material bituminoso adecuado, MC-70 o Emulsión (SS-1, CSS-1, MS-1) de corte rápido o medio a razón de 0.95 a 1.9 litros por metro cuadrado.
10. Cierre del sector producido por el corte del asfalto rebajado entre 48 y 72 hora después de aplicado el riego.
11. Retirar los dispositivos de señalización temporal.

2.3.3 Recuperación y estabilización con emulsión asfáltica para un pavimento existente

2.3.3.1 Descripción

Es la capa de base, constituida por la carpeta de rodadura y capas de bases existentes, mezcladas con material bituminoso, con el objeto de mejorar sus condiciones de soporte y resistencia a la humedad, proporcionando una mejor distribución de las cargas de tránsito, a las capas subyacentes de la estructura del pavimento.

El espesor a recuperarse debe ser como mínimo de 20 centímetros.

2.3.3.2 Propósito

Mejorar la calidad tanto en el aspecto de su impermeabilidad como en el mejoramiento de valor soporte de la base existente, y dar así una solución a los problemas mantenimiento de las carreteras.

2.3.3.3 Criterios

Esta actividad se podrá realizar cuando el deterioro de la estructura de pavimento sea generalizado y se necesite, debido al aumento de carga, mejorar su calidad portante. A esta solución se llega cuando estabilizando la base se alcanza a los valores requeridos por la nueva situación de carga.

2.3.3.4 Procedimientos de ejecución

Los procedimientos de ejecución para el mantenimiento de un Pavimento Flexible, son los siguientes:

1. Señalización del sector donde se ejecutara la recuperación de la base, colocación de conos, carteles de seguridad y personal para desviar el tránsito, en general se realiza primero un carril para permitir la circulación por el otro carril.
2. Se nivela la sección.
3. Barrer la superficie total de calzada hasta que este perfectamente libre del material no apropiado.
4. Se escarifica la capa de rodadura y la base para lograr la homogeneidad del material para luego aplicarle emulsión asfáltica.
5. Se encaballeta la mezcla para que así se pueda humedecer en forma homogénea con la ayuda de las motoniveladoras.
6. Luego de haber logrado la humedad óptima de compactación se lo extiende y se comienza la compactación.
7. El trabajo de compactación es mismo que se realiza para los otros tipos de base.
8. Concluida la compactación se procede a barrer para el riego de imprimación, quedando listo para la carpeta de concreto asfáltico.

2.3.4 Fallas

La tecnología que el ingeniero de pavimentos a ido desarrollando, tiene por objeto evitar la aparición de todo un conjunto de deterioros y fallas; se ha logrado ir estableciendo una relación causa-efecto.

La descripción y discusión de las fallas de los pavimentos no es una tarea sencilla; su variedad y diferencia de matices bastarían para que no lo fuese, sin contar con otras dificultades, incluso ajenas a los hechos ingenieriles propiamente dichos. En pavimentos, es común que la palabra falla se utilice tanto para verdaderos colapsos o desastres locales, como para describir deterioros simples o lugares de posible evolución futura desfavorable. Las fallas de los pavimentos pueden dividirse en tres grupos fundamentales, de origen bien diferenciado:

2.3.4.1 Fallas por insuficiencia estructural

Estas fallas se dan en pavimentos construidos con materiales inapropiados en cuanto a resistencia; podría ser el caso también de materiales de buena calidad pero con un espesor insuficiente. Esta es la falla que se produce cuando las combinaciones de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y los respectivos espesores, no son los adecuados para que se establezca un mecanismo de resistencia apropiado.

2.3.4.2 Fallas por defectos constructivos

Es el caso de pavimentos que puedan estar bien proporcionados y conformados por materiales suficientemente resistentes, pero que durante su construcción se han producido errores que comprometen el comportamiento del conjunto.

2.3.4.3 Fallas por fatiga

Se trata de pavimentos que originalmente se encontraban en situaciones apropiadas, pero debido a las cargas de tránsito, sufrieron efectos de fatiga y degradación estructural. Este tipo de fallas se puede es muy común luego de un largo tiempo de servicio.

Las fallas de los pavimentos flexibles, además de clasificarse por su origen, pueden dividirse también por el modo en que suceden y se manifiestan:

Tabla VIII. Tipos, manifestaciones y causas de fallas en pavimentos flexibles

TIPO	MANIFESTACIÓN	CAUSAS
Fracturamiento	Agrietamiento	Exceso de carga (insuficiencia estructural) Repetición de carga (fatiga) Cambios de temperatura Cambios de humedad (defecto constructivo) Ondulamiento por fuerzas horizontales (deficiencia estructural o defecto constructivo) Contracción
	Dstrucción por Agrietamiento	Exceso de carga (insuficiencia estructural) Repetición de carga (fatiga) Cambios de temperatura Cambios de humedad (defecto constructivo)
Deformación	Deformación permanente	Exceso de carga (insuficiencia estructural) Proceso de deformación viscosa (fatiga, insuficiencia estructural y defecto constructivo) Aumento de compacidad (defecto constructivo, rotura de granos) Consolidación
	Falla	Expansión Exceso de carga (insuficiencia estructural) Aumento de compacidad (defecto const. rotura de granos) Consolidación Expansión
Desintegración (falla de carpeta)	Remoción	Pérdida de adherencia en la carpeta Reactividad química
	Desprendimiento	Abrasión por efecto del tránsito Pérdida de adherencia en la carpeta Reactividad química Abrasión por efecto del tránsito Degradación de los agregados

En el cuadro anterior se hace una clasificación con todas las fallas referidas a tres tipos: fracturamiento, deformación y desintegración. Dentro de estos tipos de fallas se pueden encontrar otras subdivisiones provenientes de las mismas, según la gravedad del defecto, asociándose con las causas mecánicas más comunes y los orígenes típicos. En general, estas fallas se relacionan con el efecto del tránsito, las características y estructuración del pavimento y la naturaleza del apoyo que proporciona la terrhacería; teniéndose en cuenta que las variables específicas principales que más influyen en cada tipo de falla, pueden ser distintas.

Tabla IX. Principales factores que afectan a los tres tipos básicos de fallas de un pavimento flexible

TIPO DE FALLA	TRÁNSITO	PAVIMENTO	CIMENTACIÓN (apoyo)
Fracturamiento	Carga por rueda (magnitud) Repeticiones Área de influencia de la carga Velocidad Arreglo y disposición de ruedas y ejes	Rigidez de las diversas capas Flexibilidad (adaptabilidad a la fatiga) Durabilidad Deformación plástica Deformación elástica	Rigidez en base y sub base Deformación plástica Deformación elástica
Deformación	Carga por rueda (magnitud) Repeticiones Área de influencia de la carga Velocidad Arreglo y disposición de ruedas y ejes	Espesor Resistencia Compresibilidad Susceptibilidad a cambios de volumen Deformación plástica Deformación elástica	Susceptibilidad a los cambios de volumen Deformación plástica Deformación elástica
Desintegración (fallas de carpetas)	Presión de la llanta Repeticiones Velocidad	Características del asfalto Características del agregado (porosidad, falta de adherencia con el asfalto)	Resistencia en las capas de pavimento Infiltración de agua Cambios de temperatura

En el cuadro anterior puede observarse que las fallas por insuficiencia estructural, defecto constructivo o fatiga, pueden estar presentes en cualquiera de los tres tipos fundamentales. Se presentan a continuación algunas de las fallas más comunes en los pavimentos flexibles:

2.3.4.4 Agrietamiento tipo “piel de cocodrilo”

Se trata de un agrietamiento que se presenta en la superficie de rodadura del pavimento, generando un aspecto que da nombre al fenómeno.

Este tipo de falla es indicio de movimiento excesivo de una o más de las capas del pavimento o fatiga, en muchos casos hasta en la propia carpeta. Este agrietamiento es muy común en pavimentos flexibles construidos sobre terracerías; se da también en bases débiles o con mala compactación.

Este fenómeno puede ser progresivo, terminando en destrucciones locales del pavimento, que comienzan con desprendimientos de la carpeta en lugares determinados y en la remoción acelerada de materiales granulares expuestos. Cuando se llega a estas condiciones, puede afirmarse con mayor certeza que la falla está ligada a deficiencias estructurales en la base.

Causas: En la mayoría de los casos, los agrietamientos son causados por deflexiones excesivas de una superficie apoyada sobre una sub rasante o capas inferiores inestables de pavimento. El soporte inestable es, generalmente, la consecuencia de la saturación de bases granulares o sub rasantes. Generalmente, el área afectada no es grande; sin embargo, algunas veces puede cubrir el ancho completo de la carretera. Cuando esto ocurre, probablemente es debido a la acción de cargas repetidas que exceden la capacidad de carga del pavimento.

Reparación: Como las grietas son usualmente el resultado de la saturación de bases o sub rasantes, la corrección debe incluir la remoción del material húmedo y la instalación del drenaje necesario.

Para obtener un bache resistente, se debe emplear únicamente un material asfáltico mezclado en planta (esta puede ser la reparación menos costosa, debido a que se realiza en una sola operación usando un solo material). Si no se dispone de material asfáltico mezclado en planta, se puede colocar un nuevo material granular de base, compactándolo en capas que no excedan de 15 centímetros de espesor. La base granular debe ser luego imprimada y bacheada. Cuando sea necesario, pueden realizarse reparaciones temporales, aplicando baches superficiales o capas de sello con agregado en las áreas afectadas. En todos los casos, las reparaciones deben hacerse lo más inmediatamente posible después de que aparezcan las grietas, para evitar mayores daños al pavimento. En el caso de agrietamiento por sobrecarga, un recubrimiento debidamente diseñado corregirá la falta.

Al momento de presentarse este tipo de falla, puede recurrirse también a:

- Bacheo profundo (reparación permanente).
- Bacheo superficial (reparación provisional).
- Baches de sello con agregado (reparación provisional).
- Baches de sello con lechada (reparación provisional).

2.3.4.5 Deformación permanente en la superficie del pavimento

2.3.4.5.1 Surcos

Frecuentemente está asociado a un aumento de compacidad en las capas granulares de base o sub base, debida, a su vez, a carga excesiva, carga repetida o rotura de granos; también puede deberse a la consolidación en la sub rasante o aun en el cuerpo de la terracería.

El ancho del surco excede al de la llanta y tiende a ser mayor en comparación a éste, cuanto más profunda sea la cadencia que provoca el fenómeno. La deformación a que se está haciendo referencia debe distinguirse del surco que se produce por simple desplazamiento lateral de una carpeta defectuosa; la señal distintiva es que en este último caso el material se eleva a los dos lados del surco, en tanto que en un surco de origen profundo, éste se produce sin dichas ondulaciones.

Causas: Generalmente, las grietas son debidas a la falta de soporte lateral (hombro), pero también pueden haber sido ocasionadas por el desplazamiento del material que se encuentra debajo del área agrietada, que a su vez puede ser el resultado de drenaje deficiente o encogimiento debido a la evaporación del agua en los suelos cercanos. En los tres últimos casos, los arbustos o cualquier vegetación fuerte próxima al borde del pavimento pueden también ser la causa.

Reparación: Para efectuar reparaciones provisionales, se rellenan las grietas con lechada de emulsión asfáltica o asfalto líquido mezclado con arena. Si el borde del pavimento se a asentado, se debe llevar a su nivel utilizando material de bacheo mezclado en planta.

2.3.4.6 Fallas por cortante

Están típicamente asociadas a falta de resistencia al esfuerzo cortante en la base o sub base del pavimento y más raramente en la sub rasante. Consisten en surcos profundos, nítidos y bien marcados, cuyo ancho no excede mucho al de la llanta.

En este caso suele haber también elevación del material de carpeta a ambos lados del surco, pero la falla se distingue fácilmente de un simple desplazamiento de carpeta por la mayor profundidad afectada.

2.3.4.7 Consolidación del terreno de cimentación

La consolidación de terrenos de cimentación blandos puede producir distorsión del pavimento, independientemente de los espesores o de la condición estructural del mismo. Las deformaciones de la sección transversal pueden producir agrietamientos longitudinales. Cuando, por falta de resistencia en el terreno de cimentación, se compromete la estabilidad de los terraplenes, también se producen agrietamientos típicos con trayectoria circular, marcando lo que podrá llegar a ser la cabeza de la falla eventual; estas grietas perjudican, como es natural, al pavimento.

2.3.4.8 Agrietamiento longitudinal

Consiste en la aparición de grietas longitudinales de no gran abertura (en el orden de 0.5 centímetros) y en toda el área que corresponde a la de la circulación de las cargas más pesadas. Agrietamientos de este tipo son debidos a movimientos de las capas de pavimento que tienen lugar predominantemente en dirección horizontal; el fenómeno puede ocurrir en la base, en la sub base, o con cierta frecuencia, en la sub rasante.

Causas: Una causa corriente de agrietamiento de las juntas entre el pavimento y el hombro, se debe al cambio alternativo de húmedo a seco de la superficie bajo el hombro. Puede deberse a drenaje deficiente ocasionado por hombros más altos que el pavimento, por una elevación formada por la grama o el material que rellena la junta o por depresiones en el borde del pavimento.

Estos factores estancan el agua y permiten que se mantenga a lo largo de las juntas, filtrándose a través de ellas. Otros factores pueden ser el asentamiento del hombro, la retracción de la mezcla y los daños ocasionados a las juntas por los camiones que se montan sobre ellas.

Reparación: Cuando la causa es el agua, el primer paso consiste en mejorar el drenaje, eliminando la causa de su estancamiento. Luego se repara la grieta.

3. PAVIMENTO RÍGIDO

3.1 Diseño del Pavimento Rígido

Abarca el conocimiento de diferentes variables que intervienen directamente con el pavimento rígido, complementándose con un buen diseño de juntas, derivándose diversas metodologías, las cuales son:

- Teóricas: son las que presentan la estructura del pavimento en función del estudio elástico de sistemas multicapas, sometidos a cargas estáticas.
- Empíricas: se apartan de la mecánica y se limitan a la clasificación de suelos y tipos de pavimentos más usualmente experimentales.
- Semiempíricas o diseños mecanicistas – empíricos, combinan los resultados anteriores, llevándose a cabo ensayos en laboratorio o vías de servicio.

Como resultado de estas metodologías, se han desarrollado técnicas que permiten diseñar las estructuras del pavimento en forma práctica y racional, por medio de los nomogramas de diseño. Para el diseño de espesores de pavimentos rígidos, se describen dos tipos de métodos:

- Método AASHTO
- Método PCA

3.1.1 Método AASHTO

Éste método se basa en el uso de una ecuación empírica, desarrollada por la observación de algunos pavimentos de hormigón estudiados durante ensayos de la AASHTO sobre carreteras. Para este método, la fórmula de diseño a emplear, haciendo uso de los nomogramas, es la siguiente:

$$\text{Log}_{10}W_{82} = Z_r S_o + 7.35\text{Log}_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.48}}} + (4.22 - 0.32P_t) \times \text{Log}_{10}\left(\frac{M_r C_{dx} (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J \left(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c/k)^{0.25}}\right)}\right)$$

Donde:

W_{82} = Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas, a lo largo del período de diseño.

Z_r = Desviación normal estándar.

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

D = Espesor de pavimento de concreto, en milímetros.

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

P_t = Índice de serviciabilidad.

M_r = 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, sub base o sub rasante) en la que se apoya el pavimento de concreto.

3.1.1.1 Variables a considerar

3.1.1.1.1 Ejes simples equivalentes de 82 kN a lo largo del período de diseño

En este método se requiere la transformación a ejes simples equivalentes de 82 kN (8.0 toneladas métricas ó 18,000 lbs.) los ejes de diferentes pesos que circularán por el pavimento, durante su período de diseño.

Para el período de diseño, por el tipo de construcción que es, se necesita que este no sea menor a 20 años, considerando diferentes alternativas en el plazo que se decida, e incluso es recomendable que durante el período de análisis, se incluya por lo menos una rehabilitación.

3.1.1.1.1.1 Conforme el número de carriles en ambas direcciones

Para efectos de diseño, el tránsito a tomar en cuenta es el que utiliza el carril objeto de diseño, por lo que generalmente se admite que en cada dirección circula el 50% del tránsito total (del que viaja en las dos direcciones) y que dependiendo del lugar, puede variar entre 30% y 70%, así:

Tabla X. Porcentaje de camiones en el carril de diseño

No. de carriles en ambas direcciones	Porcentaje de camiones en el carril de diseño
2	50
4	45
6 ó más	40

3.1.1.1.1.2 Conforme el número de carriles en cada dirección

Sobre el carril de diseño se puede suponer que circulan los porcentajes de tránsito siguientes:

Tabla XI. Número de carriles en una dirección

No. de carriles en una dirección	Porcentaje de ejes simples equivalentes de 82 kN en el carril de diseño
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

3.1.1.1.2 Desviación normal estándar Z_r

Esta variable define que, para un conjunto de variables (espesor de las capas, características de los materiales, condiciones de drenaje, etc.) que intervienen en un pavimento, el tránsito que puede soportar el mismo a lo largo de un período de diseño, sigue una ley de distribución normal con una media M_t y una desviación típica S_o y por medio de la siguiente tabla con dicha distribución se obtiene el valor de Z_r en función de un nivel de confiabilidad R , de manera que exista una posibilidad de que $1-R/100$ del tránsito realmente soportado sea inferior a $Z_r \times S_o$.

Tabla XII. Valores de Z_r en función de la confiabilidad R

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

3.1.1.1.3 Error estándar combinado S_o

Este valor representa la desviación estándar conjunta, e incluye la desviación estándar de la ley de predicción del tránsito en el período de diseño con la desviación estándar de la ley de predicción del comportamiento del pavimento, es decir, el número de ejes que puede soportar un pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado P_t .

- Para pavimentos rígidos: 0.30 – 0.40
- En construcción nueva: 0.35
- En sobre capas: 0.40

Tabla XIII. Niveles de confiabilidad R en función del tipo de carretera

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	85 - 99.9	80 - 99.9
Troncales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	50 - 80

El producto de $Z_r \times S_o$ es un factor de seguridad que se aplica a la estimación del tránsito de una carretera. En la fórmula de diseño de la AASHTO se recomienda que el factor de seguridad esté en función del tránsito que circula sobre el carril de diseño.

Tabla XIV. Confiabilidad y factores de seguridad recomendados

Tránsito esperado en el carril de diseño en millones de ejes equivalentes	Confiabilidad R	Z_r	S_o	Factor de Seguridad F.S.
< 5	50	0.000	0.35	1.00
5 – 15	50 - 60	0.000 - 0.253	0.35	1.00 - 1.23
15 – 30	60 - 70	0.253 - 0.524	0.35	1.23 - 1.83

Continúa

30 – 50	70 - 75	0.524 - 0.674	0.34	1.51 - 1.70
50 – 70	75 - 80	0.674 - 0.841	0.32	1.64 - 1.86
70 – 90	80 -85	0.841 - 1.037	0.30	1.79 - 2.05

3.1.1.1.4 Variación del Índice de Serviciabilidad “ Δ PSI”

Al escoger el índice de serviciabilidad final P_t se hace una selección del valor más bajo que pueda ser admitido, antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo o una reconstrucción del pavimento. Debido a que el índice de serviciabilidad final de un pavimento, es el valor más bajo de deterioro a que puede llegar el mismo, se sugiere que para carreteras de primer orden (de mayor tránsito) éste valor sea de 2.5 y para carreteras menos importantes sea de 2.0. Para escoger el valor del índice de serviciabilidad inicial (P_o), es necesario considerar los métodos de construcción, ya que de eso depende la calidad del pavimento. En los ensayos de pavimentos de la AASHTO, P_o llegó a un valor de 4.5 para pavimentos de concreto y 4.2 para pavimentos de asfalto. La diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial (P_o) y el índice de serviciabilidad final (P_t) es Δ PSI = $P_o - P_t$.

3.1.1.1.5 Coeficiente de drenaje “ c_d ”

El valor del coeficiente de drenaje está dado por dos variables que son: a) la calidad del drenaje, que viene determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada de la estructura del pavimento y b) Exposición a la saturación, que es el porcentaje de tiempo durante el año en que un pavimento está expuesto a niveles de humedad bastante altos. Depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje, definiendo sus calidades:

Tabla XV. Calidad del drenaje

Calidad del drenaje	Tiempo en que tarda el agua en ser evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	el agua no evacua

Combinando todas las variables que intervienen para llegar a determinar el coeficiente C_d se llega a los siguientes valores:

Tabla XVI. Valores de coeficiente de drenaje “ C_d ”

Calidad del Drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	más del 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Mediano	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Malo	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy malo	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

3.1.1.1.6 Coeficiente de transmisión de carga (J)

Este factor se utiliza para tomar en cuenta la capacidad del pavimento de concreto de transmitir las cargas a través de los extremos de las losas (juntas o grietas). Su valor depende de varios factores, tales como: a) Tipo de pavimento (en masa reforzado en las juntas, de armadura continua, etc.); b) Tipo de borde u hombro (de asfalto o de concreto unida al pavimento principal). c) La colocación de elementos de transmisión de carga (pasadores en los pavimentos con juntas, acero en los armados continuos, etc.). En función de estos parámetros, se indican los valores del coeficiente J.

Tabla XVII. Valores de coeficiente de transmisión de carga (J)

Tipo de pavimento	Hombro			
	Elemento de transmisión de carga			
	Concreto asfáltico		Concreto hidráulico	
	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	_____

Se considera un pavimento rígido confinado, cuando los extremos de las losas tienen elementos de la misma rigidez que ella; por ejemplo, un hombro de concreto confina la parte principal de la carretera y el coeficiente de transmisión de carga tiende a ser menor, entonces la losa también será de menor espesor.

Un hombro de asfalto tiene una menor rigidez que la parte principal de la carretera y se considera semi - confinada, por lo que al ser mayor el coeficiente de transmisión de carga el espesor de la losa aumenta.

Dentro de cada intervalo de variación que se ve en la tabla, se recomienda utilizar el valor más alto cuando menor sea el módulo de reacción de al sub rasante k , también cuando sea elevado el coeficiente de dilatación térmica del concreto y mayores las variaciones de temperatura ambiente.

En el caso de carreteras de poco tránsito, en que el volumen de camiones sea reducido, se pueden utilizar los valores más bajos de J , ya que habrá menos pérdida del efecto de fricción entre los agregados.

3.1.1.1.7 Módulo de Elasticidad del concreto “ E_c ”

El Módulo de elasticidad del concreto (E_c), se puede determinar conforme al procedimiento descrito en la norma ASTM C-469 ó correlacionarlo con otras características del material, como lo es la resistencia a la compresión. En algunos códigos se indica que para cargas instantáneas, el valor del Módulo de Elasticidad (E_c) se puede calcular conforme las ecuaciones siguientes:

Tabla XVIII. Correlación entre la resistencia a la compresión y el Módulo de Elasticidad “E_c”

Tipo de agregado y origen	Módulo de Elasticidad E _c (Mpa)	Módulo de Elasticidad E _c (kg/cm ²)
Grueso - Ígneo	$E_c = 5,500 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 17,000 \times (f_c)^{1/2}$
Grueso - Metamórfico	$E_c = 4,700 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 15,000 \times (f_c)^{1/2}$
Grueso - Sedimentario	$E_c = 3,600 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 11,500 \times (f_c)^{1/2}$
Sin información	$E_c = 3,900 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 12,500 \times (f_c)^{1/2}$

En donde:

F'_c = Resistencia a compresión del concreto a los 28 días en MPa o kg/cm² para obtener E_c en MPa o kg/cm²

3.1.1.1.8 Factor de pérdida de soporte L_s

Este factor es el valor que se le da a la pérdida de soporte que pueden llegar a tener las losas de un pavimento de concreto, por efecto de la erosión en la sub base, por corrientes de agua ó por los asentamientos diferenciales de la sub rasante.

Este factor no aparece en forma directa en la fórmula de diseño para obtener el espesor de un pavimento de concreto; pero si está en forma indirecta a través de la reducción del Módulo de reacción efectivo de la superficie (sub rasante) en que se apoyan las losas.

Tabla XIX. Valores del factor de pérdida de soporte L_s por el tipo de sub base o base

Tipos de sub base o base	Factor de pérdida de soporte
Sub bases granulares tratadas con cemento (Mr: de 7,000 a 14,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Sub bases tratadas con cemento (Mr: de 3,500 a 7,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Bases asfálticas (Mr: de 2,500 a 7,000 Mpa)	0.00 a 1.00

Continúa

Sub bases estabilizadas con asfalto (Mr: de 300 a 2,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Estabilización con cal (Mr: de 150 a 1,000 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

En caso de que al utilizarse sub bases no erosionables, se llegara a producir en la sub rasante asentamientos diferenciales, por el hecho de la existencia de arcillas higroscópicas o por la excesiva expansión durante las épocas de heladas, deben adoptarse valores de L_s entre 2.0 y 3.0.

3.1.1.1.9 Módulo de Reacción k

El Módulo de reacción (k) de la superficie en que se apoya el pavimento de concreto o Módulo efectivo de la sub rasante, es el valor de la capacidad soporte del suelo, la cual depende del Módulo de Resiliencia de la sub rasante y sub base, así como el Módulo de Elasticidad de la sub base. Para determinar este, es factible la correlación con el uso de otros parámetros, tales como: CBR y valor R. Es recomendable que el Módulo de elasticidad de la sub base no sea mayor de 4 veces el valor de la sub rasante.

Debido a que el valor del Módulo de Resiliencia (Mr) de la sub rasante, cambia a lo largo del año debido a ciclos de enfriamiento y calentamiento, para determinar el valor efectivo del módulo de reacción de la sub rasante (k), es necesario calcularlo para cada mes del año.

3.1.2 Método PCA (*Portland Cement Association*)

Se aplica a diferentes tipos de pavimentos rígidos, tales como:

- Los pavimentos de concreto simple, se construyen sin acero de refuerzo y sin varillas de transferencia (dovelas) de carga en las juntas, pues la transferencia se logra a través del esfuerzo de corte proporcionado por los agregados situados en las caras agrietadas, que se forman por el corte de la junta entre losas contiguas; para que ésta transferencia sea efectiva, es necesario que la longitud de las losas sean cortas.
- Los pavimentos de concreto simple con varillas de transferencia de carga (dovelas), se construyen sin acero de refuerzo, pero en las juntas de contracción se colocan varillas lisas, que tienen la función de transmitir cargas a las otras losas; para este caso, es necesario que las losas también sean cortas, con el objeto de tener mejor control sobre los agrietamientos.
- Los pavimentos de concreto reforzado tienen acero de refuerzo dentro de la losa, así como varillas de transferencia de carga (dovelas) en las juntas de contracción.

Las separaciones en las juntas son mayores a las que se utilizan en pavimentos convencionales, por lo que es posible que se produzcan más fisuras transversales, las cuales se mantienen prácticamente cerradas debido al refuerzo de acero.

- Los pavimentos de refuerzo continuo, se construyen sin juntas de contracción; por tener una alta y continua cantidad de acero de refuerzo en dirección longitudinal, desarrollando fisuras transversales en intervalos cortos, pero debido al acero de refuerzo, producen un alto grado de transferencia de cargas en las caras de las fisuras.

3.1.2.1 Elementos básicos

En pavimentos de concreto simple, el espaciamiento entre juntas no debe exceder de 4.50 metros, para que las losas tengan buen comportamiento.

En pavimentos con dovelas, las losas no deben ser mayores de 6 metros y en pavimentos reforzados las losas no deben ser mayores de 12 metros, lo cual permite un buen comportamiento, pues espaciamientos mayores a estos producen problemas tanto en las juntas como en las fisuras transversales.

El procedimiento de diseño desarrollado por la PCA, establece varias condiciones, tales como:

- La transferencia de cargas, dependiendo del tipo de pavimento que se considere.
- El uso de hombros de concreto ó asfalto adheridos al pavimento, permite reducir los esfuerzos de flexión y deflexiones, producidos por las cargas de los vehículos en los bordes de las losas.

- Para reducir los esfuerzos que se producen al paso de las ruedas sobre las juntas, es necesario el uso de sub bases estabilizadas, ya que estas proporcionan superficies de soporte de mejor calidad y resistencia a la erosión a causa de las deflexiones de las losas de pavimento.
- Se adicionan dos criterios básicos en el diseño y son:
 - ✓ FATIGA. Sirve para mantener los esfuerzos que se producen dentro de los límites de seguridad, ya que el paso de cargas sobre las losas del pavimento, producen esfuerzos que se convierten en agrietamientos.
 - ✓ EROSIÓN. Sirve para limitar los efectos de deflexión que se producen en los bordes de las losas, juntas y esquinas del pavimento; también para tener control sobre la erosión que se produce en la sub base o sub rasante de los materiales que conforman los hombros.

- ✓ Este criterio es necesario, ya que evita fallas en el pavimento, como succión de finos de la capa de apoyo que producen a su vez desnivel entre losas y destrucción de hombros, siendo situaciones independientes de la fatiga.
- Los camiones con ejes tridem se consideran dentro del diseño, a pesar de que los sencillos y los tándem son los más utilizados en las carreteras; los ejes trídrem pueden llegar a producir más daño por efecto de erosión que por fatiga.

3.1.2.2 Factores de diseño

Para desarrollar el diseño de un pavimento rígido, es necesario conocer las condiciones del lugar para escoger el tipo de pavimento que se va a construir, así como las características de la sub base y tipo de hombros a utilizar.

3.1.2.2.1 Resistencia a la flexión del concreto (módulo de rotura, MR)

Este valor se utiliza en el diseño, bajo el criterio de la fatiga que sufren los materiales por el paso de las cargas impuestas por los vehículos pesados, que tienden a producir agrietamiento en el pavimento.

La deformación que se produce en el pavimento de concreto por efecto de las cargas, hace que las losas estén sometidas a esfuerzos de tensión y compresión. La relación existente entre las deformaciones debido a las cargas y los esfuerzos de compresión, es muy baja como para incidir en el diseño del espesor de la losa. La relación entre la tensión y la flexión son mayores, situación que afecta el espesor de la losa.

3.1.2.2 Capacidad soporte de la sub rasante o de la sub base (k)

Es el valor del Módulo de Reacción (k) de la capa de apoyo de un pavimento de concreto. Este valor se puede estimar por correlación con el CBR, ya que no es necesario tener un valor exacto de k, variaciones mayores de valor no afectan los espesores de diseño. Las sub bases son necesarias con el objeto de prevenir el efecto de succión, pero además incrementan la capacidad soporte del pavimento.

Tabla XX. Efectos de la sub base granular sobre los valores de k

Valor de k para sub rasante		Valor de k para sub 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
20	73	23	85	26	96	35	117	38	140
40	147	45	165	49	180	57	210	66	245
60	220	64	235	66	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

3.1.2.3 Período de diseño

Algunos diseñadores consideran que la vida útil de un pavimento de concreto termina cuando el primer recapeo es colocado. La vida de un pavimento de concreto varía de menos de 20 años, en proyectos en que se tenga una carga de tráfico mayor a la asumida en el diseño, materiales malos o defectos de construcción a más de 40 años en otros proyectos en los que no se presentaron los defectos anteriormente mencionados.

El término de período de diseño suele considerarse algunas veces como sinónimo de “período de análisis de tráfico”, debido a que el tráfico probablemente no puede ser predicho con mucha certeza para un período de diseño de 20 años, para el diseño de pavimentos.

Sin embargo, hay casos en los que está económicamente justificado el uso de un período de diseño mayor o menor, como por ejemplo un tramo carretero que va a ser utilizado solamente por pocos años. En el caso de las autopistas urbanas y rurales, muchos diseñadores adoptan un rango de 30 a 35 años.

Del período de diseño seleccionado depende el diseño del espesor, determinando cuantos años va a responder el pavimento de forma adecuada. La selección del período de diseño es a criterio del diseñador y en base a un análisis económico, del costo del pavimento y el servicio brindado mediante el período completo.

3.1.2.2.4 Tráfico y cargas de diseño

El número y peso de las cargas de ejes mayores esperados durante la vida de diseño, es el factor más importante en el diseño del espesor para pavimentos de concreto. Para el tráfico vehicular, se considera:

- TPD (Tráfico promedio diario en ambas direcciones todos los vehículos).
- TPDC (Tráfico promedio diario de camiones en ambas direcciones).
- Carga de eje de camiones.

El dato necesario para obtener el tráfico de diseño, consiste en asumir tasas de crecimiento anual que relacionen factores de proyección

Tabla XXI. Tasas anuales de crecimiento con sus correspondientes factores de proyección

Tasas de crecimiento anual de tráfico, %	Factores de proyección	
	20 años	40 años
1	1.1	1.2
1 ½	1.2	1.3
2	1.2	1.5

Continúa

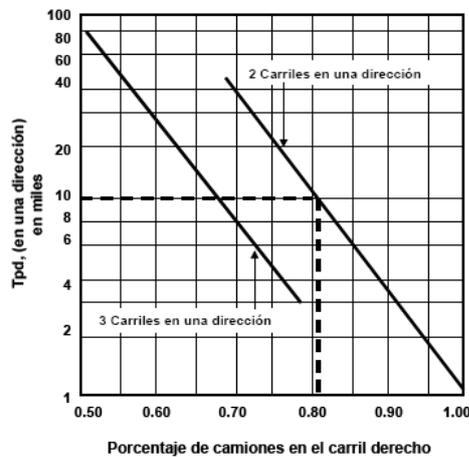
2 1/2	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3 1/2	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4 1/2	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5 1/2	1.7	2.9
6	1.8	3.2

El TPDC es un dato muy importante en el diseño de pavimentos, ya que incluye buses y camiones con 6 ruedas o más y excluye los vehículos que tienen hasta 4 ruedas.

Se recomienda, para propósitos de diseño, calcular el número total de vehículos pesados esperados durante el período de diseño.

Con frecuencia, se asume que las cargas y volúmenes de tráfico se distribuyen en partes iguales en las dos direcciones, pero esto no es completamente cierto, ya que puede suceder que la mayor parte de camiones viaje a plena carga en una dirección y regresen vacíos en la otra.

Figura 3. Porcentaje de camiones en el carril de diseño en una carretera de varios carriles.



3.1.2.2.4.1 Proyección

Un método para obtener el dato de volumen de tráfico (TPD de diseño), necesita el uso de razones anuales de crecimiento de tráfico y factores de proyección de tráfico.

En un problema de diseño, el factor de proyección es multiplicado por el ADT (tráfico promedio diario) presente para obtener el TPD de diseño representando el valor promedio para el período de diseño. En algunos procedimientos, éste es llamado TPDA (tráfico promedio diario anual). Los siguientes factores influyen la razón de crecimiento anual y las proyecciones de tráfico:

- Tráfico atraído o desviado – el incremento de sobre el tráfico existente a causa de mejoramiento de una carretera existente.
- Crecimiento normal del tráfico – el incremento debido al viaje de vehículos motorizados que no lo harían si el nuevo servicio no hubiera sido construido.
- Tráfico desarrollado – el incremento debido al cambio en la utilización de la tierra por causa de la construcción del nuevo servicio.

Estos efectos combinados pueden causar razones de crecimiento anual de cerca del 2% al 6%. Las secciones de planificación de los departamentos de carreteras interurbanas, tienen, usualmente, desconocimiento con respecto al crecimiento del tráfico y los factores de proyección. Donde hay algunas interrogantes con relación a la razón de crecimiento, puede ser sensato usar una razón bastante alta. Esto es cierto para rutas de intersección y en proyectos urbanos en donde una alta razón de crecimiento urbano puede causar una más alta expectativa de crecimiento de tráfico.

Sin embargo, el crecimiento de volumen de camiones puede ser menos que el de carros de pasajeros. Las razones altas de crecimiento no son aplicables en carreteras rurales de 2 pistas y en calles residenciales, donde la principal función es el uso de la tierra o dar servicio a las propiedades contiguas. Las causas de crecimiento pueden ser menores de 2% al año, o factores de proyección de 1.1 a 1.3.

Algunos ingenieros sugieren que el uso de razones de crecimiento de interés simple, puede ser apropiado, sin embargo, aplicando este criterio con períodos de diseño muy largos pueden predecirse tráficos futuros muy altos.

3.1.2.2.4.2 Capacidad

Es el número máximo de vehículos que pueden usar el pavimento sin irrazonable retraso.

Este método de estimar el volumen de tráfico, podrá ser verificado para proyectos específicos en donde el volumen de tráfico proyectado es alto; podrían ser necesarias más pistas de tráfico, si se desea un flujo razonable de tráfico. La capacidad práctica de un pavimento en servicio, está definida como el máximo número de vehículos por pista, por hora, que pueden pasar por un punto dado; bajo las condiciones predominantes de carretera y tráfico, sin irrazonables demoras o restricciones en la libertad del manejo. Las condiciones prevaecientes incluyen composición del tráfico, velocidad del vehículo, clima, alineación, perfil, número, área y ancho de pistas.

El término “capacidad práctica” es comúnmente usado en referencia a carreteras existentes, y el término “capacidad de diseño” es usado con propósitos de diseño.

En dónde el flujo del tráfico es ininterrumpido o sólo momentáneamente, la capacidad práctica y la capacidad de diseño son numéricamente iguales y tienen esencialmente el mismo significado; de acuerdo con lo establecido por AASHTO.

3.1.2.2.4.3 Tráfico promedio diario de camiones (TPDC)

En el procedimiento de diseño, es necesario el promedio diario del tráfico de camiones en ambas direcciones. Puede ser expresado como un porcentaje de TPDC o como un valor aparte. Incluye solamente camiones con seis llantas o más y no incluye paneles o pick-ups u otros vehículos de cuatro llantas.

Los porcentajes TPDC y otros datos esenciales de tráfico, pueden también obtenerse de estudios desarrollados por los departamentos de carreteras, en localizaciones especiales en el sistema de carreteras. Estas, llamadas estaciones medidoras de peso (básculas), tienen que ser cuidadosamente seleccionadas para dar información confiable de la composición del tráfico, peso de camiones y carga de ejes.

Los resultados de los estudios son tabulados de los cuales el porcentaje de TPDC puede ser determinado para las clases de carreteras que tiene un departamento. Este porcentaje TPDC podría ser apropiado para el diseño de un proyecto, en donde los factores que influyen el crecimiento y composición del tráfico, sean similares a los dados por la estación medidora de peso.

3.1.2.2.4.4 Distribución de camiones en cada dirección

En la mayoría de problemas de diseño, se asume que los pesos y volúmenes de los camiones circulando en cada dirección, son sensiblemente iguales (distribución 50 – 50), el diseño asume que el pavimento en cada dirección carga la mitad del total de TPDC. Esto puede no ser verdad en casos especiales, en donde algunos de los camiones pueden ir totalmente cargados en una dirección y regresar vacíos en la otra dirección. Si este es el caso se debe hacer un ajuste apropiado.

3.1.2.2.4.5 Distribución de carga de eje

El dato de distribución de cargas de eje del tráfico de camiones para calcular el número de ejes simples o *tandém* (*), da varios pesos esperados durante el período de diseño. Estos datos pueden ser determinados de una de las tres siguientes maneras:

- Estudios especiales de tráfico a establecer por distintos medidores de carga (básculas) para proyectos específicos.
- Datos de las estaciones medidoras de cargas de los departamentos de carreteras interurbanas, representan el tipo y peso de los camiones esperados por ser similares al proyecto bajo diseño.
- Cuando no se tienen datos de la distribución de carga de eje, se puede determinar por el método basado en categorías de datos representativos para diferentes tipos de utilización del pavimento.

Los camiones en una dirección estarán normalmente todos cargados a su capacidad de 54,000 libras en el eje triple más 7,000 libras en el eje simple. En Guatemala no se usa el eje *tridém*, pero se debe pensar en el futuro.

3.1.2.2.5 Factor de seguridad de carga

Las cargas de ejes determinadas en la sección anterior son multiplicadas por un factor de seguridad de carga (FSC). Los factores de seguridad de carga recomendados son:

- Para proyectos interurbanos y otros de multipistas, en donde hay un tráfico interrumpido y alto volumen de camiones, FSC = 1.2
- Para autopistas o calles arterias en donde hay un moderado volumen de tráfico de camiones, FSC = 1.2
- Para carreteras, calles residenciales y otras calles que soportan un volumen pequeño de tráfico de camiones, FSC = 1.0

Aparte de los factores de seguridad de carga, se adopta un grado de seguridad en el procedimiento de diseño para compensar ciertos casos, como camiones sobrecargados no previstos y variaciones normales en las propiedades de los materiales de construcción y en capas del espesor.

En los rangos de nivel de carga de 1.1 ó 1.2 dan una mayor tolerancia para la posibilidad de camiones sobrecargados no previstos y volúmenes y altos niveles de servicio del pavimento más bien para pavimentos de servicio pesado. En casos especiales, la utilización de un factor de seguridad de carga tan alto como 1.3, puede estar justificado para mantener un nivel de servicio más alto que el normal, a través del período de diseño. Un ejemplo sería una autopista muy transitada que no tenga otra alternativa para el tráfico.

3.1.2.3 Diseño de espesores

Existen formatos para el desarrollo del diseño del pavimento rígido, para los cuales se necesita el empleo de datos como:

- Tipo de hombros y juntas.
- Resistencia a la flexión del concreto (Módulo de Rotura).
- Módulo de reacción de la sub rasante (k).
- Factor de seguridad de carga (F_{sc}).
- Distribución de cargas por eje.
- Número de repeticiones esperadas de las diversas cargas por eje, en el carril de diseño, durante el período de diseño.

3.1.2.4 Diseño de juntas

El objetivo principal es el control de la figuración y agrietamiento natural, que sufre el concreto durante el proceso constructivo y de uso. Tiene las siguientes funciones:

- Controla el agrietamiento transversal y longitudinal.
- Divide el pavimento en secciones, para el proceso constructivo.
- Permite el movimiento y alabeo de las losas, por efecto de las cargas de tránsito.
- Permite transferencia de cargas entre losas.

El sistema de juntas se diseña teniendo en cuenta: las siguientes consideraciones:

- Condiciones ambientales.
- Espesor de la losa.
- Sistema de transferencia de carga.
- Tránsito.
- Características de los materiales.
- Tipo de sub base.

- Características del material sellante.
- Diseño del hombro.

Existen diversos tipos de juntas, entre las más comunes:

- Juntas transversales de construcción.
- Juntas transversales de expansión.
- Juntas transversales de contracción.
- Juntas longitudinales de contracción.
- Juntas longitudinales de construcción.

3.1.2.4.1 Juntas transversales de construcción

Conocidas también como juntas principales, es necesario que esté dotada de hierros para cocerla, evitando con ellos los movimientos relativos y eliminando la posibilidad de que se realicen fisuras en la losa adyacente.

El método más común para finalizar las labores de construcción es rematando la obra contra una formaleta de madera que genera una cara lisa, por lo cual es necesario dotar esta junta de pasadores de carga. Así en el resto del pavimento la transferencia de cargas se realiza a través de la trabazón de agregados, y por ende la formaleta tiene que estar dotada de agujeros que permitan insertar las dovelas.

La formaleta se deja en su sitio hasta el momento de reiniciar las obras, cuando se remueve. También se puede hacer una junta de construcción cortando el concreto, en cuyo caso se extiende el concreto pasando por el sitio en que debe quedar la junta, y luego mediante el uso de sierras, se corta y se remueve el concreto que esté más allá del sitio de la junta de construcción.

Para alcanzar un buen resultado con el corte del concreto, es necesario que las últimas tandas de concreto desarrollen más rápida la resistencia inicial. Al igual que con las juntas de construcción con formaleta, es necesario poner dovelas, siendo necesario perforar agujeros para instalarlas.

Las juntas transversales de construcción no necesitan el corte inicial, solo es necesario el corte secundario para conformar la caja en la que se aloja el material de sello.

3.1.2.4.2 Juntas transversales de expansión

En las juntas transversales de expansión, a uno de los extremos de las dovelas, se les monta una capsula de 50 milímetros de longitud, que permita absorber los movimientos de expansión de las losas; dicha capsula se debe dotar de un sistema que impida que se caiga o se salga de la dovela, durante la colocación.

3.1.2.4.2.1 Juntas con dovelas

Las condiciones que se requieren para las dovelas, en las juntas de expansión, en cuanto a alineamiento y lubricación se refiere, son las mismas que las solicitadas en las juntas transversales de contracción. Debido a que las juntas de expansión son más anchas que las de contracción, a la canastilla en la que se van a fijar las dovelas de estas juntas, se le dota de un material de sello preformado y compresible, con una altura igual a la losa de concreto.

3.1.2.4.2.2 Juntas sin dovelas

La característica de las juntas de expansión sin dovelas, es que el espesor de la losa se incrementa para reducir los esfuerzos de borde.

El incremento del espesor es del orden de un 20% y la transición se desarrolla suavemente, en una longitud de 6 a 10 veces el espesor de la losa.

3.1.2.4.3 Juntas transversales de contracción

Son las que se generan al final del día, o cuando se suspende la colocación del concreto. Estas juntas se deben localizar y construir en el lugar planeado, siempre que sea necesario. Se harán coincidir las juntas de construcción con una de contracción, si no se hará en el tercio medio de la placa. Siempre se deben construir perpendicularmente al centro de la vía.

3.1.2.4.4 Juntas longitudinales de contracción

Cuando el pavimento se construye con un ancho de dos o más carriles, las juntas longitudinales se cortan de manera similar a las juntas transversales de contracción.

Como en el momento del corte no es tan crítico, se deben cortar rápidamente si la sub base es estabilizada, apenas se corten las juntas transversales. En cuanto a las barras de anclaje, los equipos de formaletas deslizantes tienen dispositivos para insertarlas.

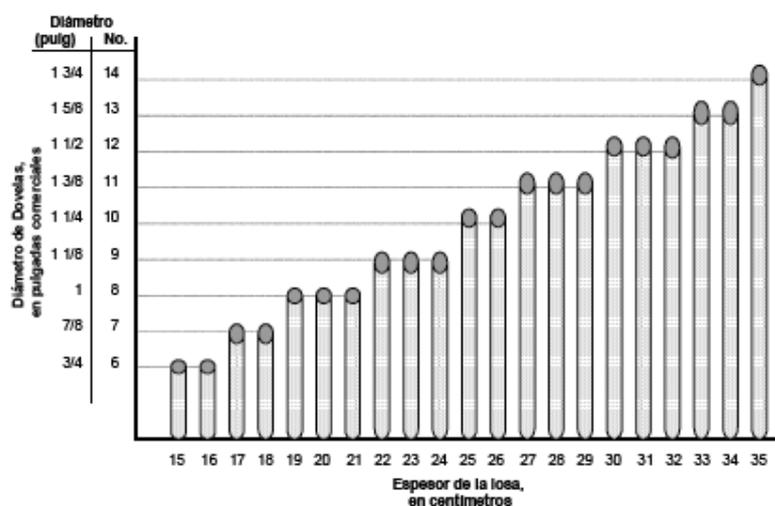
Por el poco movimiento que tienen estas juntas, no se necesita de una caja para el sello, basta hacer un corte de 3 a 6 milímetros de ancho, con una profundidad igual a la tercera parte del espesor de la losa. Sin embargo, si se pide la caja para el sello, ésta se puede hacer con un equipo multidisco, que corta a la profundidad y anchos deseados.

3.1.2.4.5 Juntas longitudinales de construcción

En este tipo de juntas hay dos aspectos a tomar en cuenta: la inserción de las barras de anclaje y el sellado de las juntas. Respecto a la inserción de las barras de anclaje, se puede hacer introduciendo, en el concreto fresco, las barras dobladas en un ángulo de 90°, perforando agujeros en las losas e introduciendo las barras en ellos y asegurarlas con un mortero epóxico, para que puedan cumplir con su función, que es anclar las losas.

Cuando se opta por insertar las barras dobladas en un ángulo de 90°, es preferible usar acero de 40,000 PSI al de 60,000 ya que toleran mejor las deformaciones. Las juntas longitudinales de construcción necesitan una caja para el sello, esta debe ser muy ancha, para poder acomodar las variaciones longitudinales, en el borde de las losas, generadas por el proceso constructivo; pero el corte y el sellado son similares al de las juntas longitudinales de contracción.

Figura 4. Detalle de diámetros comerciales de dovelas respecto al espesor de la losa



3.1.2.5 Selladores de juntas

Utilizados con el propósito de minimizar la filtración de agua superficial dentro de las juntas y las capas subyacentes, así como la entrada de materiales incompresibles, que pueden ocasionar desportillamientos y daños mayores. Este proceso consiste en el aserrado de la losa, entre 2 y 4 horas después de su colocación, en los diámetros que se especifiquen; posteriormente se coloca el cordón de respaldo y sobre el mismo el material sellador. Los materiales de relleno y selladores para juntas deben ajustarse a las normas AASHTO.

Tabla XXII. Materiales más comunes para el sellado de juntas

Tipo de Sellador	Especificación
Selladores aplicados en caliente	
Asfalto polimérico	AASHTO M-173
Sellador polimérico	AASHTO M-301
Sellador elastomérico	AASHTO M-282
Sellos premoldeados	
Sellos de compresión	AASHTO M-220
Material de relleno	
Material de relleno premoldeado de fibra	AASHTO M-213
Material de relleno hule - espuma	AASHTO M-213
Material de relleno bituminoso	AASHTO M-33

3.2 Ejecución del Pavimento Rígido

3.2.1 Construcción

Antes de iniciar la construcción de la losa ya sea reforzada o sin refuerzo, es necesario realizar ciertos trabajos previos, tales como:

- Construcción de bordillo.

- Instalaciones subterráneas tales como drenajes, electricidad, teléfonos, tuberías de agua, etc.
- Movimiento de tierras.

Realizados estos trabajos, se afina y compacta la sub rasante, mediante motoniveladora y compactadota. En la mayoría de los casos, la base es necesaria y la clase de materiales a emplearse depende del CBR de la sub rasante, que consiste en regar el material selecto por medio de una motoniveladora, dejándolo a la altura necesaria, extendiendo el trabajo por lo menos más allá de cada orilla del pavimento de concreto.

3.2.1.1 Materiales de construcción aptos

Se debe contar con información precisa de la localización de bancos de materiales y la información necesaria acerca de los materiales aprobados para la construcción de pavimentos de concreto.

La disponibilidad y el costo de los materiales deben ser analizados por el ingeniero proyectista, antes del licitarlo. Si se ha de proponer el uso de materiales alternativos en lugar de los especificados, el contratista necesitará asegurarse de que se cumplan los requisitos de ensayos de la especificación.

Los requisitos de ensayos para los agregados del concreto, pueden tener períodos extensos de tiempo de demora y podrían surgir conflictos de programación si los materiales no se estipulan previamente.

3.2.1.1.1 Evaluación de agregados locales

Según la norma ASTM C 33, todos los agregados deben cumplir:

- El tamaño máximo más grande que se ajusta a los requisitos para la colocación del concreto, producirá el concreto de menor costo con la menor tendencia a desarrollar fisuras, debido a efectos térmicos o a retracción autógena, plástica o por desecación.
- El tamaño máximo no debe exceder de $\frac{1}{4}$ del espesor del pavimento o los 6.4 cm (2 $\frac{1}{2}$ "); lo que sea menor.
- En aquellas áreas donde se sabe que las grietas por fallas en la durabilidad en los pavimentos constituyen un problema, debería usarse un tamaño menor.
- Los agregados no deben contener porcentajes mayores que lo especificado de los materiales nocivos, enumerados en la ASTM C 33.

La mayoría de piedras asociadas con grietas por fallas en la durabilidad, son de origen sedimentario. Conociendo el historial de desempeño de un agregado propuesto y dado que el pavimento será sometido a diversos ciclos de congelación durante una temporada, considerándose los siguientes ensayos:

- ASTM C 666: Este método ensaya la durabilidad del concreto sometido a ciclos de congelación y descongelación, en condiciones que probablemente saturan el concreto. Las modificaciones para el objetivo de ensayar agregados para detectar grietas por falla en la durabilidad. Incluyen aumentar el número de ciclos a 350 y calcular el índice de durabilidad a partir de la expansión de las muestras.
- Ensayo de índice de porosidad de Iowa: Se sella el agregado en el recipiente del medidor de aire ASTM C 231, se agrega agua hasta un determinado nivel en el tubo transparente, en la parte superior del recipiente; luego se aplica la presión de aire, para hacer ingresar el agua en los poros del agregado.

La disminución en el volumen se denomina índice de porosidad, un índice de porosidad alto indica un agregado no duradero.

3.2.1.1.2 Disponibilidad y certificación de materiales cementantes

Los cementos deben ajustarse a las siguientes normas ASTM:

- ASTM C 150 (cemento Pórtland)
- ASTM C 595 (cemento mezclado)
- ASTM C 1157 (cemento hidráulico)

La norma ASTM C 150 especifica cinco tipos de cemento:

- Tipo I, el más fácil de conseguir, se usa cuando no se requieren las propiedades esenciales de los demás tipos.
- Tipo II se destina a uso general, en particular cuando se requiere resistencia moderada a los sulfatos o calor moderado de hidratación. Se conocen también algunos cementos que reúnen los requisitos de ambos tipos y se denominan Tipo I/II.
- Tipo III se usa para obtener alta resistencia temprana.
- Tipo IV se usa cuando se requiere bajo calor de hidratación.
- Tipo V se usa para obtener alta resistencia a los sulfatos.

La ASTM C 150 también especifica requisitos químicos opcionales, como límites en el contenido máximo de álcalis, y requisitos físicos opcionales, como el calor de hidratación. La norma ASTM C 595 especifica los cementos mezclados de la siguiente manera:

- Cemento Tipo IS, contiene un 25 a 70% de escoria de alto horno.

- Cementos Tipos IP y P, contienen entre un 15 y 40% de puzolana. El cemento Tipo P se usa cuando no se requieren resistencias más altas en edades tempranas.
- Cemento Tipo I (PM) contiene menos del 15% de puzolana.
- Cemento Tipo I (SM) contiene menos del 25% de escoria.
- Cemento Tipo S contiene al menos un 70% de escoria, y no produciría las resistencias requeridas para pavimentos a menos que se combine con cemento Pórtland.

La norma ASTM C 1157, es una norma de desempeño, que incluye seis tipos de cemento Pórtland y cemento mezclado:

- El Tipo GU se destina para uso general.
- El Tipo HE se usa si se desea alta resistencia en edad temprana.
- El Tipo MS se usa si se desea resistencia moderada a los sulfatos.
- El Tipo HS se usa si se desea alta resistencia a los sulfatos.
- El Tipo MH se usa para obtener calor moderado de hidratación.
- El Tipo LH se usa para obtener bajo calor de hidratación.

Existen materiales de cemento complementarios, los cuales ofrecen el potencial de lograr un mejor desempeño del concreto a un menor costo, brindando también beneficios a un menor costo, como pueden ser:

- Control de expansiones producidas por reacción *sílice - álcalis*.
- Resistencia a los sulfatos.
- Menos calor de hidratación.

3.2.1.1.2.1 Puzolanas

Las cenizas volátiles y las puzolanas naturales deben cumplir los requisitos de la norma ASTM C 618. Sin embargo, se debe tener cuidado al implementar esta norma, ya que es bastante amplia.

La ceniza volátil Clase F, es la opción preferida para controlar la reactividad sílice-álcalis y, además, brinda resistencia a los sulfatos. Los puntos clave del uso de puzolanas son:

- Las dosis típicas para la ceniza volátil Clase F generalmente serían del 15 al 25% por masa de materiales cementicios. Se debe evaluar en las fuentes las tasas típicas de uso.
- En tiempo fresco, el concreto con ceniza volátil Clase F, probablemente no gane resistencia lo suficientemente rápido como para permitir el aserrado de juntas antes de formarse las fisuras de retracción.
- Algunas cenizas volátiles Clase C se desempeñan muy bien, mientras que otras han resultado problemáticas. Las fuentes deben evaluarse en forma independiente.
- Si la ceniza volátil se ha de usar para controlar las expansiones producidas por la reactividad sílice-álcalis, cuanto más bajo sea el contenido de CaO, más efectiva será ésta. Lo ideal es que el contenido de CaO no exceda el 8%. Los requisitos de dosificación y eficacia de la ceniza volátil deben verificarse mediante ensayos.
- Las cenizas volátiles Clase C con altos contenidos de Al_2O_3 pueden ocasionar problemas con el endurecimiento prematuro, en especial en tiempo caluroso.
- Las puzolanas naturales se consiguen como componentes del cemento Tipo IP o como aditivos.

Pueden resultar eficaces para controlar las expansiones producidas por la reacción sílice-álcalis y para reducir el calor de hidratación.

3.2.1.1.2.2 Escorias

Las escorias granuladas de alto horno molidas fino (GGBFS) deben reunir los requisitos de la norma ASTM C 989. Los siguientes grados se basan en su índice de actividad.

- Grado 80: es el menos reactivo.
- Grado 100: es moderadamente reactivo.
- Grado 120: es el más reactivo, pero la diferencia se obtiene principalmente con un molido más fino.

Las dosis típicas de escoria serían del 25 al 50% de los materiales cementicios. Es necesario observar que la resistencia del concreto en edades tempranas (hasta 28 días) puede presentar una tendencia a ser menor cuando se usan combinaciones escoria-cemento, especialmente en bajas temperaturas o con altos porcentajes de escoria.

Las propiedades deseadas del concreto deben establecerse considerando las resistencias tempranas, temperaturas de curado y propiedades de escoria, el cemento y otros materiales del concreto.

3.2.1.1.3 Disponibilidad y certificación de aditivos y compuestos de curado

3.2.1.1.3.1 Aditivos

Los aditivos químicos son ingredientes que se usan comúnmente en concretos de pavimentación y su uso ya está establecido. Se usan para obtener o mejorar las propiedades específicas del concreto. Es importante observar los siguientes usos y prácticas relacionados con los aditivos químicos:

- Para concretos con múltiples aditivos, se deben comprar todos los aditivos al mismo fabricante. Los grandes fabricantes ensayan sus propios aditivos para detectar incompatibilidades y otras interacciones y pueden brindar útiles consejos para evitar reacciones no deseadas.
- No todos los aditivos funcionan bien en todas las aplicaciones.
- Se recomienda al contratista solicitar el asesoramiento del fabricante, sobre el modo de aplicación y uso de aditivos. Los requisitos para la elaboración, los procedimientos de mezclado y las dosis recomendadas, deben solicitarse al fabricante. Las dosis exactas para el diseño de la mezcla de concreto, en particular, deben determinarse mediante el uso de pastones de prueba.
- La temperatura de colocación afecta las dosis requeridas de aditivos químicos.
- Los aditivos nunca se usan para compensar las mezclas marginales de concreto.
- Los aditivos químicos deben reunir los requisitos de las normas ASTM C 260 o ASTM C 494. La norma ASTM C 260 especifica los requisitos para los aditivos para aire ocluido. Los tipos de aditivos especificados por la ASTM C 494 incluyen:

- ✓ Tipo A, aditivos reductores de agua.
 - ✓ Tipo B, aditivos retardantes.
 - ✓ Tipo C, aditivos acelerantes.
 - ✓ Tipo D, aditivos reductores de agua y retardantes.
 - ✓ Tipo E, aditivos reductores de agua y acelerantes.
 - ✓ Tipo F, aditivos reductores de agua, de alto rango.
 - ✓ Tipo G, aditivos reductores de agua, de alto rango y retardantes.
- Los aditivos deben añadirse al concreto por separado. No deben incorporarse directamente sobre el agregado seco o en el cemento seco, ya que pueden ser absorbidos y no estar disponibles para mezclarse fácilmente con el concreto.
 - Consultar con el fabricante para obtener información sobre posibles interacciones entre los aditivos.
 - Algunos reductores de agua pueden retardar el fraguado o la ganancia en resistencia, cuando se utilizan en dosis mayores.

3.2.1.1.3.1.1 Aditivos para aire ocluido

Arrastran un sistema de burbujas de aire finamente divididas en la pasta de cemento. Constituyen una proyección esencial para cualquier concreto que esté expuesto a la congelación, ya que brindan salidas para que el agua congelable se expanda y así no altere la estructura interna del concreto. Pueden usarse para mejorar la trabajabilidad del concreto reduciendo la demanda de agua, la exudación y la segregación.

3.2.1.1.3.1.2 Los aditivos acelerantes

Se clasifican en Tipo C y Tipo E según la ASTM C 494. Aceleran el fraguado; normalmente suelen usarse únicamente en tiempo frío o para reparaciones, cuando la reducción de una o dos horas, en el tiempo de fraguado; usándose cuando se requiere un aumento de resistencia temprana. Los aditivos acelerantes afectan principalmente el tiempo de fraguado, la evolución de calor y el desarrollo de resistencia.

Entre los medios alternativos para obtener desarrollo de resistencia temprana se encuentran:

- Uso de cemento Tipo III
- Mayores contenidos de cemento
- Calentamiento del agua o los agregados
- Mejoramiento del curado y la protección
- Alguna combinación de los puntos anteriores.

3.2.1.1.3.1.3 Los aditivos retardantes

Demoran los tiempos de fraguado iniciales y finales; sin embargo, no reducen la velocidad de pérdida de asentamiento; afectan la velocidad de ganancia de resistencia en 1 ó 2 días, o hasta en 7 días, según sea la dosis. Pueden usarse en tiempo caluroso, cuando los tiempos prolongados de acarreo son inevitables o para prevenir la formación de juntas frías.

Los cambios en la temperatura, pueden requerir ajustes en la dosis del aditivo para mantener el tiempo de fraguado deseado. En tiempo caluroso la dosis puede aumentarse, hasta el punto donde ocurre un retardo excesivo.

3.2.1.1.3.1.4 Aditivos reductores de agua

Según las normas establecidas (ASTM C 494 – Tipos A, D y E), estos aditivos pueden usarse para:

- Reducir la relación agua-cemento en un determinado grado de trabajabilidad.
- Aumentar la trabajabilidad para un determinado contenido de agua.
- Reducir los contenidos de agua y cemento correspondientes a una determinada trabajabilidad.

En dosis más altas, algunos aditivos reductores de agua Tipo A actúan como Tipo D (reductores de agua y retardantes). El exceso en el uso de aditivos reductores de agua pueden originar un retardo excesivo. La velocidad de pérdida de asentamiento puede aumentarse cuando se usan aditivos reductores de agua. Algunos de estos mejoran la eficacia de los aditivos para aire ocluido, de manera tal que una dosis menor logra el contenido de aire requerido. Los reductores de agua de alto rango y no se usan en concretos para pavimentos.

3.2.1.1.3.2 Compuestos de curado

Los compuestos de curado (compuestos líquidos formadores de membrana), deben ajustarse a los requisitos de las normas ASTM 309 y ASTM C 1315; según corresponda. Los compuestos de curado deben tener las siguientes propiedades:

- Mantener la humedad relativa de la superficie de concreto por encima del 80%, durante 7 días.

- Ser uniformes y mantenerse fácilmente en una solución mezclada completamente.
- No deben combarse, escurrirse ni acumularse en las estrías.
- No deben formar una película dura para soportar el tránsito temprano de construcción.

3.2.2 Especificación de los requisitos del plan de gestión y control de calidad por parte del contratista

3.2.2.1 Definiciones básicas de del plan de gestión de calidad y del control de calidad por parte del contratista

Para la buena construcción de un proyecto, es necesario pre-establecer los resultados que debieran estar en rangos admisibles de construcción, permitiendo conocer si dicho proyecto cumple con normas establecidas. Es por ello, que se desglosa a continuación las consideraciones generales para una construcción de calidad a que se debe de llegar por parte del órgano ejecutor.

3.2.2.1.1 Aseguramiento de la calidad

Comprende todas las acciones necesarias para brindar un nivel razonable de confianza en que el producto final cumplirá con el propósito del organismo patrocinante, desde una perspectiva de mantenimiento y factibilidad de uso. Hace referencia a las funciones y responsabilidades del propietario.

El objetivo del programa del plan de gestión de calidad, es verificar que los resultados obtenidos con el plan de control de calidad por parte del contratista, sean verdaderamente representativos del material que se coloca y que el contratista esté haciendo bien las cosas.

3.2.2.1.2 Control de calidad

Llamado también control de proceso, generalmente hace referencia a las funciones y responsabilidades del contratista. Su objetivo, es proporcionar ensayos, monitoreos y presentación de informes, para documentar en forma adecuada que las tareas contratadas se estén efectuando, conforme a las especificaciones del proyecto y para permitirle hacer ajustes oportunos en el proceso de construcción.

3.2.2.1.3 Ensayos para aceptación

Son aquellos ensayos que se llevan a cabo para determinar el grado de cumplimiento con los requisitos contractuales y, por lo general, están vinculados con los ítems de pagos.

Cuando el contratista tiene a su cargo los ensayos para aceptación, se hace referencia al proceso como control de calidad por parte del contratista; a diferencia del caso en que los ensayos para aceptación se encuentren a cargo del propietario. Los puntos importantes relacionados con la construcción de calidad de pavimentos de concreto incluyen:

- Capacitación y certificación (generalmente certificación ACI) del personal a cargo de los ensayos.
- Certificación del laboratorio de ensayos (según la norma ASTM C 1077).
- Certificación de la planta.
- Certificación del operador de planta.
- Calibración de los equipos para ensayos.
- Uso de diagramas de control por parte de los contratistas.
- Desarrollo de un Plan de Gestión de Calidad.

- Capacidad del equipo de obra para tomar decisiones con celeridad ante los cambios en las condiciones del proyecto.
- Función del plan de gestión de calidad/Aceptación o verificación/Resolución de conflictos entre los resultados del control del plan de gestión de calidad y el control de calidad por parte del contratista.

3.2.2.2 Plan de gestión de calidad

Una de las actividades más importantes de un proyecto de construcción de pavimentos de concreto, es el desarrollo de un plan integral de control de calidad. Es necesario que se implemente y respete dicho plan durante todo el curso del proyecto en construcción. Los componentes de un Plan de control de calidad eficaz, son los siguientes:

1. Introducción
 - ✓ Descripción del proyecto
 - ✓ Información de contacto clave (contratista, propietario y representante del propietario)
 - ✓ Aspectos destacados de los planes y especificaciones del contrato
2. Objetivo del plan de gestión de calidad
3. Diagrama de la organización: delineación en forma clara del flujo de responsabilidad, en forma completa, hasta los más altos cargos directivos.
 - ✓ Funciones del plan de gestión de calidad
 - ✓ Personal del proyecto
4. Tareas y responsabilidades
 - ✓ Gerente de control de calidad

- ✓ Administrador del plan de gestión de calidad o Ensayos para Aceptación, según corresponda
 - ✓ Ingenieros del proyecto
 - ✓ Técnicos/Inspectores
5. Inspecciones (relacionadas con la pavimentación), incluyen ensayos requeridos y criterios de frecuencia y aceptación
 - ✓ Inspecciones de materiales
 - ✓ Inspecciones de excavaciones y terraplenes
 - ✓ Inspección de la pavimentación con concreto
 - ✓ Demolición del pavimento existente
 6. Cronogramas de prueba de control de calidad/Planes de ensayos
 - ✓ Envíos de informes
 7. Informes de errores
 8. Solución de problemas
 9. Cambios en el plan de gestión de calidad/ítems complementarios
 10. Formulario de acuerdo de colocación
 11. Apéndices (de ser necesario)

3.2.3 Preparación de la rasante

3.2.3.1 Introducción

La uniformidad y estabilidad de la sub rasante afectan tanto el desempeño prolongado del pavimento como al proceso constructivo.

La estabilidad de la sub rasante es necesaria para proveer el soporte adecuado de la sección de pavimento y una plataforma constructiva aceptable. El diseño del pavimento comienza con la identificación de su fundación.

La construcción comienza con la preparación de dicha fundación. Entre los elementos importantes de la preparación de la sub rasante se incluyen:

- Evaluación de la estabilidad de la sub rasante
- Modificación de la sub rasante para mejorar la estabilidad
- Evaluación de las tolerancias superficiales

3.2.3.2 Nivelación y compactación de la sub rasante

3.2.3.2.1 Actividades previas a la nivelación

La primera fase de la preparación de la sub rasante es su nivelación gruesa. Consiste en el corte de los puntos elevados y el relleno de las áreas bajas, para conseguir la cota de terminación deseada. Los puntos importantes a tener en cuenta son:

- El material de relleno se obtiene generalmente de las operaciones de corte (perfilado). Se debe utilizar el informe geotécnico para evaluar el uso posible de este material como relleno.
- Si el material in situ no alcanza, o sus propiedades son inadecuadas para un buen desempeño del pavimento, se deben identificar áreas de préstamo de donde extraer material de relleno apropiado.
- El contratista debe conocer las condiciones de la sub rasante local, en lo referente al nivelado previo y otras actividades constructivas.

La segunda fase de la nivelación consiste en el proceso de estaqueo (replanteo) de obra. Es una buena práctica que el ingeniero verifique en forma independiente la precisión de las estacas. Comúnmente se usan equipos de nivelación automática con posicionamiento global para nivelar.

Si se utilizan estos sistemas, se recomienda verificar periódicamente los resultados mediante métodos topográficos convencionales.

3.2.3.2.2 Extracción de materiales no aptos de la sub rasante

Los materiales tales como turba, sedimentos orgánicos, lodo y suelo con alto contenido orgánico están clasificados como no aptos. Con dichos materiales se pueden tomar las siguientes medidas:

- Extraerlos y reemplazarlos por suelo similar al de la sub rasante circundante.
- Extraerlos y reemplazarlos por material granular.
- Alterar sus propiedades mediante su compactación o estabilización.

3.2.3.2.3 Protección de la rasante

Durante las operaciones de nivelado, debe protegerse la rasante:

- Proporcionar un drenaje temporal: zanjas, drenes o cunetas necesarias para desviar el agua superficial. Si el agua aflora sobre la sub rasante, el material se ablandará y puede dañarse debido al tránsito de la obra.
- Implementar procedimientos para dirigir el tránsito sobre la rasante, asegurándose de que el tránsito se distribuya uniformemente sobre toda la rasante.

3.2.3.2.4 Operaciones de construcción de la rasante

La construcción de la rasante puede incluir la construcción de un terraplén:

- El terraplén se construye colocando material en capas sucesivas en todo el ancho de la sección transversal.
- La mayoría de las especificaciones incluyen un espesor máximo para el material suelto a colocarse por capa.
- Durante la construcción del terraplén, el equipo de acarreo debe moverse uniformemente sobre todo el ancho del mismo. Si el tránsito de éste se encuentra canalizado puede ocurrir una deformación permanente o una falla por esfuerzo de corte.
- En la construcción del terraplén, la construcción de capas debe comenzar en la parte más profunda del relleno. A medida que avanza la colocación de las capas, éstas deben construirse aproximadamente paralelas a la rasante terminada.
- En áreas donde se producen transiciones de la sub rasante, los materiales se mezclan mediante rastra de discos en el límite de la zona de transición. La mezcla de la sub rasante efectúa a lo largo de 30 metros de la zona de transición (15 m a cada lado de la transición). Como resultado, se reduce la posibilidad de asentamientos diferenciales o levantamientos, debido a la acción de las heladas.

3.2.3.2.5 Requisitos para la compactación

La compactación de la sub rasante es esencial para construir una plataforma de trabajo estable; deben cumplirse los siguientes requisitos:

- Para pavimentos transitados por vehículos pesados, es necesario utilizar el procedimiento Proctor Modificado (ASTM D 1557) para la determinación de la densidad máxima. El procedimiento Proctor Estándar (ASTM D 698) puede usarse para pavimentos destinados a vehículos livianos.

- Suelos cohesivos usados en secciones de relleno o terraplén: la totalidad del relleno debe compactarse al 90% de la densidad máxima.
- Suelos cohesivos en secciones de excavación o desmante: los 15 cm (6") superiores deben compactarse al 90% de la densidad máxima.
- Suelo no cohesivo usado en secciones de relleno o terraplén: los 15 cm (6") superiores se compactan al 100% de la densidad máxima, el resto del relleno al 95%.
- Suelo no cohesivo usado en secciones de excavación o desmante: los 15 centímetros (6") superiores compactados al 100% de la densidad máxima y los siguientes 45 centímetros (18") al 95%.

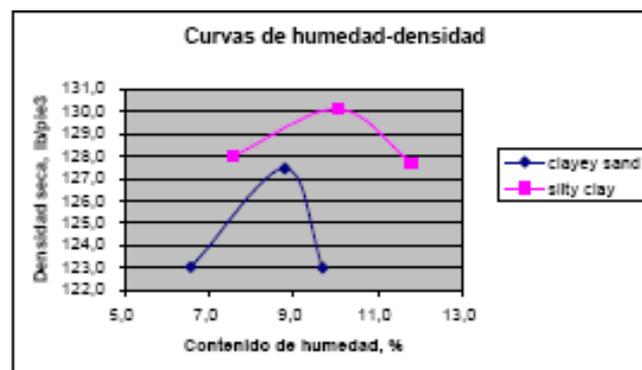
El control de la humedad es esencial para obtener una sub rasante estable, tomando en cuenta lo siguiente:

- Las especificaciones de compactación normalmente requieren que el contenido de humedad de la sub rasante esté dentro del $\pm 2\%$ de la humedad óptima antes de apisonar, para obtener la densidad requerida.
- Para los suelos expansivos el contenido de humedad debe estar entre 1 al 3% por encima del nivel óptimo antes de su compactación, con el fin de reducir el potencial de hinchamiento.
- Para suelos finos, que no muestran signos de hinchamiento, es mejor mantener la humedad entre el 1 y 2% por debajo del nivel óptimo.
- Los suelos cohesivos compactados con exceso de humedad, se pueden tornar inestables bajo el tránsito de obra, aun habiendo alcanzado la densidad especificada.

Las curvas de humedad-densidad de los suelos tipificados, pueden dar una idea de su desempeño en el campo. Al referirse a la compactación debe tomarse en cuenta:

- Con suelos cohesivos, es necesario usar rodillos pata de cabra; las uñas deben penetrar el 70% del espesor de la capa.
- Se debe usar la rastra de discos si se necesita controlar la humedad.
- Se pueden usar rodillos estáticos de cilindros de acero para aislar la superficie, luego de su compactación.
- Los rodillos de cilindros vibratorios se usan para suelos no cohesivos. Se debe usar la vibración con precaución si la napa freática se encuentra cerca de la superficie o si los suelos de la sub rasante están saturados.

Figura 5. Curvas de humedad – densidad típica, que muestran el efecto del contenido de humedad en la densidad



Para verificar la densidad del suelo compactado, se puede usar el procedimiento de ensayo de la densidad nuclear. Se deben calibrar los indicadores para los materiales locales. Si surgen problemas en la obtención de la densidad, se pueden usar las siguientes técnicas para solucionarlos:

- Realizar un ensayo humedad - densidad adicional, para asegurarse de que se esté usando el valor de densidad máxima correcto, en el control de la compactación en obra.
- Usar el cono de arena o la medición de volumen, para realizar los ensayos de densidad.

- Usar los métodos tradicionales para determinar el contenido de humedad.
- Examinar la sub rasante para determinar si existen capas sueltas debajo del área problemática.

El control de la densidad en obra debe ser a tiempo completo pues permite la observación del material en el momento en que se coloca. Si el material cambia, se usan ensayos Proctor para verificar la densidad máxima.

3.2.3.3 Estabilización de la sub rasante

Es necesario estabilizar las sub rasantes debido a diversas causas; las razones principales son:

- Mejorar los suelos de baja resistencia.
- Reducir el potencial de hinchamiento.
- Mejorar las condiciones constructivas.

Los estados de sub rasante no aptos pueden retrasar la obra, por lo que se deben tomar las medidas necesarias para tratar dichas áreas. Una sub rasante estabilizada ayuda a cumplir con los plazos de la obra. Puede ser de suma importancia en obras que requieren aperturas del pavimento al tránsito.

3.2.3.3.1 Estabilización con cal

La estabilización con cal se usa frecuentemente para estabilizar sub rasantes cohesivas (suelos arcillosos) con alto contenido de humedad. Se debe diseñar una mezcla a fin de determinar el contenido óptimo de cal. Para suelos arcillosos con un Índice Plástico (IP) mayor que 10, el rango de contenido de cal varía normalmente entre el 3% y el 5%.

El equipo necesario para llevar a cabo al estabilización con cal incluye un distribuidor para la cal o lechada de cal, equipo de mezclado y pulverizado, equipo de riego y rodillos. Cuando se prescribe cal hidráulica hidratada como agente estabilizador, las especificaciones pueden permitir el uso, ya sea de “colocación en seco” o “colocación como lechada”. Para la colocación en seco se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Se debe esparcir la cal en forma uniforme sobre la superficie de al sub rasante, mediante un camión equipado con una caja esparcidora.
- La cantidad de cal esparcida, basada en la fórmula de la mezcla en obra, debe ser la necesaria para efectuar la mezcla en la profundidad especificada.
- La colocación en seco se torna difícil en proyectos muy grandes. La condición del viento en dichas áreas normalmente deriva en una gran nube de polvo, debido al exceso de viento, puede requerirse mayor cantidad de cal.

Para la colocación en forma de lechada, se debe tener en cuenta:

- Es necesario mezclar la cal con agua, dentro de camiones, y distribuirla, ya sea como una suspensión acuosa delgada o como una lechada mediante un distribuidor.
- El camión distribuidor debe agitar constantemente la lechada, para mantener la mezcla uniforme.
- La cal se distribuye mediante sucesivas pasadas, hasta que se haya esparcido la cantidad suficiente.
- La cantidad de cal esparcida, basada sobre la fórmula de la mezcla en obra, debe ser la necesaria para efectuar la mezcla en la profundidad especificada.

Los procedimientos de mezclado in situ y compactación, ya sea para la colocación en seco o para la lechada, son similares.

Deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La mezcladora debe poder mezclar la totalidad de la profundidad de la sub rasante tratada o, de lo contrario, se debe estabilizar el material de ésta por capas.
- El material se debe mezclar inmediatamente después de la aplicación de la cal. El período entre la aplicación de la cal y el mezclado de la sub rasante no debe exceder de 6 horas.
- Se debe agregar agua a la sub rasante durante el mezclado, para proporcionar humedad superior a la humedad óptima del material y para asegurar la acción química de la cal sobre la sub rasante.
- El mezclado final puede seguir al mezclado preliminar, excepto en el caso de algunas arcillas pesadas, que requieren un curado por humedad de entre 24 y 48 horas antes de su mezclado final.
- Es importante que se compacte la mezcla dentro de los 30 minutos posteriores al mezclado final.
- El material necesita estar dentro del $\pm 2\%$ del contenido de humedad óptima previo a su compactación, por lo que puede ser necesario airearlo o regarlo.
- La mezcla suelo-cal necesita ser compactada entre el 93 y el 95% de la densidad máxima, determinada en el diseño de la misma. La densidad de campo deberá verificarse in situ, mediante un densímetro nuclear.
- Si no se alcanza el nivel de compactación especificado y la sub rasante muestra signos de movimiento durante la compactación, es posible que se trate de una capa de sub rasante débil debajo de la capa estabilizada.

Es necesaria efectuar ensayos de verificación para comprobar la eficacia de la estabilización hasta la profundidad requerida. También, determinar el contenido de cal con la mezcla no curada, de acuerdo con ASTM D 3155. Para esto se toma una muestra obtenida del centro de la capa modificada con cal. Si la selección tratada con cal es una capa estructural, debe curarse como mínimo durante 7 días, antes de que se agreguen otras capas o se permita cualquier clase de tránsito. El proceso de curado puede ser cualquiera de los siguientes:

- Curado por humedad: consiste en mantener húmeda la superficie mediante el riego con agua.
- Curado mediante membrana: consiste en la aplicación de una capa bituminosa sobre la sub rasante preparada.

3.2.3.3.2 Estabilización con cemento

El cemento se puede usar para estabilizar suelo de grano grueso o suelo con alto contenido de limo. En suelos arcillosos, la estabilización con cal suele ser más económica que con cemento. Para encontrar la cantidad de cemento a agregar para la estabilización, es necesario diseñar una mezcla en laboratorio.

El desempeño de la estabilización in situ, con cemento, es similar a los procedimientos de estabilización con cal. La uniformidad de la mezcla y el porcentaje correcto de aplicación, son los pasos clave para lograr una buena capa estabilizada con cemento. También es necesario curarla, comúnmente se utiliza el método de curado mediante membrana de emulsión asfáltica.

La estabilización con cemento también se puede realizar usando un molino de paletas o una planta de mezclado. Se prefieren estos cuando la sub rasante, estabilizada con cemento, debe cumplir la función de sub base o base.

3.2.3.4 Apisonado de prueba

Las especificaciones del proyecto pueden requerir un apisonado (rodillado) de prueba para verificar la preparación de la sub rasante.

Es una buena práctica implementar un apisonado de prueba, ya que permite identificar áreas blandas aisladas no detectadas durante el proceso de inspección de la superficie. Se deberá efectuar siempre y cuando el pavimento de hormigón se coloque sobre una base no estabilizada.

El apisonado de prueba consiste en el paso lento un vehículo pesado, montado sobre neumáticos sobre superficie preparada, mientras se observa a ésta en busca de deformaciones.

Para ello se puede usar un camión de doble eje totalmente cargado o una cargadora sobre neumáticos.

Para llevar a cabo el apisonado de prueba, pueden tomarse en cuenta los siguientes puntos:

- Ahuellamiento menor a 0.5 cm (1/4"): la sub rasante es aceptable.
- Ahuellamiento mayor a 0.5 cm (1/4") y menor a 4 cm (1.5"): la sub rasante necesita ser escarificada y recompactada.
- Ahuellamiento mayor a 4 cm (1.5"): se recomienda la extracción y reemplazo del suelo.
- Deformación mayor que 2.5 cm (1") con rebote: indica la presencia de una capa blanda cerca de la superficie. Deben sondearse estas áreas para determinar las condiciones subyacentes.

3.2.3.5 Recepción de la sub rasante

La sub rasante se aprueba en función de los siguientes criterios:

- Desviación de la superficie: generalmente 1.3 hasta 2.5 centímetros (1/2" hasta 1") (basada sobre una regla de 5 metros).
- Cota superficial: generalmente 1.5 a 3 centímetros.
- Para el caso de proyectos pequeños, las tolerancias de desviación superficial y altimétrica, pueden fijarse en 3 centímetros, especialmente cuando no se puede usar equipo de nivelación automático.

En el caso de materiales no estabilizados, se puede considerar escarificar, nivelar o rellenar áreas si se necesita ajustar la rasante. Con los materiales estabilizados, no es posible complementar el relleno mediante capas finas; por lo tanto en este último caso, la rasante debe construirse alta para luego cortarse hasta su cota final.

3.2.3.6 Protección de la rasante

Una vez aprobada la rasante, se debe implementar un plan de control del tránsito. La administración del tránsito debe ser obligatoria si la logística requiere el uso de la sub rasante por parte del equipo de obra. Todas las huellas y partes rugosas que se formen en una sub rasante terminada, deben alinearse y recompactarse antes de construir la sub base.

3.2.3.7 Condiciones climáticas adversas

Se deben implementar drenajes durante cada etapa de preparación de la sub rasante.

La rasante se debe mantener de forma tal que se proporcione una pendiente positiva para su drenaje. Cuando el contenido de humedad de la sub rasante sea superior a la humedad óptima, puede ser necesario pasar la rastra de discos y secar para reducirlo. Si se espera lluvia después de haber preparado la sub rasante para su compactación, se deberá sellar su superficie con apisonador (rodillo) neumático o de cilindros de acero. Si no se hace a tiempo, surgirán problemas debido al exceso de humedad en la sub rasante.

Si la sub rasante está expuesta a heladas, deberá escarificarse su superficie hasta una profundidad mínima de 15 centímetros (6") y luego recompactarse. Si la preparación de la sub rasante se interrumpió durante el invierno, deberá escarificarse la superficie expuesta hasta una profundidad mínima de 15 centímetros (6") y luego recompactarse antes de continuar con las tareas en la primavera siguiente.

3.2.4 Construcción de bases y sub bases

3.2.4.1 Introducción

La capa que se encuentra debajo de la superficie del pavimento es la base. El término sub base se usa para designar a las capas que están debajo de la base y por encima de la sub rasante.

3.2.4.2 Sub base

Los materiales para sub base suelen ser materiales granulares, que pueden ser naturales o triturados. Su estabilidad, en términos de valor soporte (CBR), varían entre 20 y 100. Estos materiales se usan como capas de protección de la sub rasante y proporcionando drenaje por encima de ellas.

Para la colocación de la sub base se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

- La colocación debe comenzar a lo largo del eje de la calzada o el punto más elevado, para mantener el drenaje en todo momento conforme se lleva a cabo la construcción.
- La colocación puede realizarse usando un equipo automatizado o una caja para piedras adosada a una explanadora.
- La relación humedad-densidad debe establecerse en laboratorio, mediante el ensayo Proctor estándar o modificado. En el caso de tenerse vehículos pesados, es recomendable utilizar el ensayo Proctor modificado.
- El control de la humedad es crucial para lograr la compactación. Lo mejor es mantener la humedad dentro del 1% del nivel óptimo. Para materiales de sub base de drenaje libre, debe considerarse un contenido bajo de humedad, para evitar la adición excesiva de agua a la sub rasante, durante la compactación del material de la sub base.
- El espesor de la capa debe ser 3 ó 4 veces el tamaño máximo del agregado. Si el espesor es similar al tamaño máximo del agregado, se verán afectas la granulometría y la lisura.
- Es importante evaluar la estabilidad de la sub rasante antes de comenzar a construir la sub base; debe repararse toda área blanda.
- Se debe implementar la administración del tránsito en el frente de construcción, para eliminar problemas potenciales.
- Se puede usar el densímetro nuclear, para monitorear su densidad.
- Los valores de la densidad se pueden verificar mediante ensayos puntuales sobre el contenido de humedad del material entregado.
- La tolerancia de planeidad para la sub base suele ser de 12 milímetros (1/2”), si se usa una regla de 5 metros (16 pies).

- ✓ Se recomienda el uso de cuchillas guiadas por láser o niveladoras automáticas, en proyectos de mayor envergadura.
- ✓ En el caso de obras donde no se justifique el empleo de equipo automatizado, puede ser necesario flexibilizar las tolerancias superficiales.
- Es necesario proteger la sub base una vez conformada.
 - ✓ Es necesario proporcionar drenaje para que el agua no se acumule sobre la superficie.
 - ✓ Si prevalecen las condiciones climáticas secas, debe recurrirse al riego.
- El apisonado puede efectuarse mediante rodillos vibratorios. Si la compactación se torna dificultosa, pueden emplearse rodillos neumáticos, ya que la acción de amasado de las ruedas contribuye con este proceso.

3.2.4.3 Base estabilizada mecánicamente

Estos materiales son similares a los de la sub base, pero generalmente son de mayor calidad, en cuanto a contenido de agregados triturados, material deletéreo y granulometría. Los elementos cruciales para su colocación son los mismos que los materiales de la sub base; considerando que:

- Debe revisarse el estrato subyacente (sub rasante o sub base) antes de colocar y esparcir el material de la base. Cualquier huella y área blanda o elástica (debidas a condiciones drenantes inapropiadas, acarreo de materiales o cualquier otra causa) debe ser corregida y compactada a la densidad especificada, antes de conformar la base.
- No se debe comenzar con la colocación de la base si la capa subyacente está húmeda, enlodada o congelada.

- Se deben suspender los trabajos en la base durante temperaturas congelantes o si el material de la base contiene material congelado.
- Para la compactación del material de base se pueden usar rodillos vibratorios, neumáticos o de cilindros estáticos.
- La tolerancia de planeidad, para capas de base, es generalmente de 10 milímetros (3/8") para una regla de 5 metros (16 pies). Generalmente se usan métodos de conformación automatizados, para mantener estas tolerancias ajustadas.

3.2.4.4 Bases estabilizadas químicamente

Los materiales que se implementan con mayor frecuencia incluyen el suelo de cemento, bases tratadas con cemento, econocreto (concreto económico) y bases tratadas con asfalto. Estos materiales proporcionan bases excelentes sobre una sub rasante o sub base preparada apropiadamente.

La rigidez de las capas de base estabilizada tiene un impacto sobre el desempeño de los pavimentos de concreto; afectan el curvado/alabeado de la losa y aumentan la restricción durante el período inicial de curado. En el caso del econocreto, la rigidez de la base puede ser muy alta. El resultado es un mayor potencial de agrietamiento aleatorio (errático), fisuración por reflejo o debida a bordes de losa del pavimento no soportados. Una base bien diseñada y construida aumentará la vida por fatiga y mejorará la constructibilidad del pavimento.

3.2.4.4.1 Base tratada con cemento

El suelo de cemento y la base tratada con cemento, son dos materiales diferentes que se pueden usar para la capa de base.

El suelo de cemento, generalmente es de una calidad ligeramente inferior ya que emplea material de la sub rasante o de relleno, mientras que la base tratada con cemento normalmente está compuesta por material procesado.

Para determinar el contenido óptimo de cemento, se usa una mezcla diseñada en laboratorio. En ámbitos con heladas, también se realiza un ensayo de congelación-deshielo. Este proceso insume entre 20 y 25 días, suponiendo que el agregado sea duradero.

Los materiales para las bases tratadas con cemento, se diseñan para una resistencia a la compresión a 7 días de 5,200 kPa (750 PSI). El material con este nivel de resistencia, normalmente pasa por un ensayo de congelación-deshielo y no es susceptible al agrietamiento por contracción.

De ser necesaria una resistencia mayor para aprobar el ensayo de congelación-deshielo, deben tomarse medidas eficaces para reducir la posibilidad de agrietamiento por contracción en la base. Los procedimientos importantes para el mezclado y la colocación incluyen:

- La base tratada con cemento se mezcla en una planta de mezclado central.
 - ✓ El agua y el cemento se introducen en una mezcladora a paletas, en cantidades apropiadas para alcanzar las proporciones de diseño de la mezcla.
 - ✓ La introducción del cemento se debe realizar en forma tal que no se agrume.
- La humedad óptima y las propiedades de la densidad de la mezcla se determinan por medio de los procedimientos de la ASTM D 558.

- El equipo de entrega del material y de colocación deben estar sincronizados, para permitir la compactación de la mezcla dentro de los 60 minutos de mezclado inicial.
- La granulometría y compactación finales, se deben completar dentro de las 2 horas del mezclado.
- Es importante monitorear la densidad, con un densímetro nuclear. Se recomienda fijar un objetivo del 97 al 98% de la densidad máxima.
- El contenido de humedad puede estar dentro del 2% de la óptima. Para condiciones de trabajo durante el verano, se recomienda un contenido de +2% del nivel óptimo. Para colocar el material normalmente se usan distribuidores mecánicos o aplanadoras con cuchillas automatizadas.
- Debe elaborarse un plan de colocación para minimizar la cantidad de juntas longitudinales y transversales.
- Al final del día, o cuando se interrumpe la colocación continua, durante más de 60 minutos, se construye una cabecera transversal.
La forma más fácil de formar una junta transversal es mediante el aserrado en todo el espesor.
- Las juntas longitudinales se forman aserrando el borde libre.
- La temperatura, a la hora de la colocación, debe exceder los 4°C (40°F). Debe suspenderse la colocación si se esperan temperaturas inferiores a los 2°C (35°F) dentro de las 24 horas de la colocación.
- El espesor compactado de una capa de base tratada con cemento, se limita normalmente a 20 centímetros (8"). Algunos equipos de compactación pueden compactar eficazmente capas de hasta 30 centímetros (12"). La eficacia del equipo debe coincidir con el espesor de la capa.
- Al combinar el rodillo vibratorio y el neumático, se producirán mejores resultados.

- Si para obtener el espesor total se requieren varias capas, la capa subyacente debe mantenerse húmeda hasta que se coloque la siguiente.
- El empleo de camiones regadores con barras laterales, es un método aceptable para conseguir el riego superficial.
- La tolerancia de planeidad de la capa terminada es normalmente de 10 mm (3/8”), cuando se prueba con una regla de 5 m.
 - ✓ El empleo de una niveladora automática es la mejor forma de lograr la tolerancia requerida.
 - ✓ Dado que la base tratada con cemento es un material rígido, no es práctico volver a nivelar después de la compactación; por lo tanto deben tomarse las precauciones para alcanzar la tolerancia especificada en el primer intento.
- La base tratada con cemento debe curarse. Para el sellado de curado suele usarse una emulsión asfáltica aplicada lo antes posible, después de la compactación final.. Debe protegerse el sellado durante 7 días o hasta que se alcance la resistencia necesaria para habilitar el tránsito.

3.2.4.4.2 Concreto económico (econocreto)

El econocreto o concreto económico, se compone de agregados y cemento, uniformemente combinados y mezclados con agua. Se le llama econocreto debido a que los materiales que lo componen son de calidad marginal. Las mezclas usan normalmente de 2 a 3 bolsas de cemento por metro cúbico (por yarda cúbica) de material. La mezcla resultante debe aprobar el ensayo de durabilidad y puede colocarse con el equipo de pavimentación con concreto. Los procesos usados para colocar econocreto son los mismos que para el concreto convencional.

Al referirse al econocreto, es muy importante la resistencia de su mezcla. Las limitaciones normales a la resistencia son las siguientes:

- Resistencia mínima a los 7 días: 5,200 kPa (750 PSI).
- Resistencia máxima a los 28 días: 8,300 kPa (1,200 PSI). La limitación de la resistencia a un valor de 8,300 kPa (1,200 PSI) reduce la posibilidad de fisuración por reflejo en el pavimento.

Una alternativa a la limitación de la resistencia a la compresión máxima, es diseñar juntas en la capa de econocreto. El diseño del patrón de juntas debe coincidir con el del pavimento, o se producirán fisuras por el reflejo. Debe poner especial atención al alinear las juntas, cuando se construye el pavimento de concreto.

Normalmente, se aplican dos manos de un compuesto con base de cera para tal fin. La doble aplicación reduce la posibilidad de adherencia entre el econocreto y el pavimento de concreto. Como resultado se obtiene la reducción del agrietamiento aleatorio en el pavimento.

Se permitirá el paso del tránsito sobre el econocreto, cuando éste haya alcanzado una resistencia a la compresión de 5,200 kPa (750 PSI).

3.2.4.4.3 Base tratada con asfalto

Una base tratada con asfalto consiste en agregados y material bituminoso, mezclados en una planta de mezclado central. Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El asfalto y los agregados usados en la mezcla asfáltica, deben cumplir con los requisitos especificados en el proyecto.

- La mezcla asfáltica debe realizarse conforme a la fórmula de la mezcla de obra especificada para el proyecto.
 - ✓ Se debe tomar una muestra de ésta, para su ensayo, a fin de comprobar la conformidad con la fórmula de la mezcla en obra.
- El espesor de una capa de base tratada con asfalto se limita normalmente a 10 y 15 cm (entre 4" y 5").
 - ✓ Algunos equipos de compactación son capaces de compactar estos materiales hasta una profundidad de 15 cm (6"). La compactación se verifica mediante la extracción de testigos (especímenes cilíndricos) y la comprobación de la densidad superior e inferior presente en ellos.
- La densidad posterior a la compactación puede verificarse con un densímetro nuclear.
- El espesor de la capa y la porosidad se obtienen a través de la extracción de testigos.
- Se debe interrumpir la colocación de la base asfáltica, cuando la temperatura se halla por debajo de los 4°C (40°F).
Si el asfalto se coloca durante tiempo frío, es importante que la compactación comience inmediatamente después de su colocación, manteniendo los rodillos cerca de la pavimentadora.

Las capas tratadas con asfalto afectan el desempeño temprano del pavimento.

En verano, la superficie de estas capas puede alcanzar los 60° C (140° F). El calor excesivo impacta tanto sobre el desarrollo de la resistencia como sobre el coeficiente de contracción (retracción) del concreto fresco.

Dichas capas deben blanquearse, usando una solución de agua y cal antes de la colocación del concreto, para reducir su temperatura superficial.

3.2.4.5 Capas drenantes

Algunos diseños de pavimento rígidos incorporan una capa drenante. Cuando se usa dicho método, el pavimento o la base se construye directamente sobre ésta. Las capas drenantes pueden ser estabilizadas o no estabilizadas.

Se usan capas drenantes estabilizadas con cemento o asfalto. La porosidad de la capa drenante, debe ser en función de las necesidades anticipadas de la rápida eliminación del agua. Se considera en su diseño, un equilibrio entre la necesidad de estabilidad y porosidad, teniendo más peso la porosidad. El espesor de la capa drenante suele ser entre 10 y 15 cm (4" y 6").

Las bases estabilizadas proporcionan una plataforma de pavimentación rígida y, por lo tanto, un soporte uniforme para el pavimento. También tienen el potencial de aumentar el alabeo, curvado y las fuerzas restrictivas de fricción de las losas de concreto. Esto acota las probabilidades de aserrar juntas y aumenta la posibilidad del agrietamiento aleatorio en el pavimento.

3.2.5 Preparación para la pavimentación con concreto

Antes de comenzar con la producción del pavimento, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Revisar todo el equipo que conforme el tren de pavimentación, para garantizar las condiciones operativas.

- Verificar la disponibilidad de la longitud aceptable de rasante, para su pavimentación con concreto.
- Verificar la disponibilidad de todos los informes de ensayos aprobados para todos los materiales.
- Verificar la disponibilidad del equipo de ensayos de respaldo.
- Verificar la disponibilidad de todas las herramientas para la colocación del concreto.
- Verificar el funcionamiento de las comunicaciones telefónicas con la planta.
- Verificar la disponibilidad de un equipo de riego, si es necesario.
- Monitorear regularmente la cuerda de guía.
- Verificar que la cabecera correspondiente al trabajo del día, esté preparada.
- Desarrollar un plan de gestión, para condiciones climáticas extremas.
- Revisar el pronóstico del clima, para cada jornada de pavimentación.
- Asegurarse de la disponibilidad de cantidad suficiente de cubierta plástica, en caso de lluvia repentina.

3.2.5.1 Aprobación de la rasante

La rasante se aprueba luego de haber colocado, cortado, nivelado y compactado la capa de base. Una base apropiada asegura que se alcance el espesor nominal de pavimento y que los perfiles y cotas, sean conformes a la documentación contractual. En cuanto a la rasante, se debe de revisar:

- Normalmente se exige el cumplimiento de las tolerancias altimétricas por cada capa del pavimento.
- Los puntos principales a considerar antes de la pavimentación son:
 - ✓ El efecto de la rasante sobre el volumen de concreto colocado: el impacto del costo del material si la rasante final está baja.

- ✓ El efecto de la rasante sobre la variabilidad de espesor del pavimento: si la rasante final es variable, afectará el espesor determinado con el muestreo por testigos. La variabilidad del espesor del pavimento debe minimizarse, ya que puede afectar el pago del espesor.
- ✓ Antes de pavimentar, es necesario retirar los residuos sueltos.
- Es muy importante realizar un control apropiado de la rasante ya que afecta el drenaje durante la construcción y la vida útil del pavimento.

3.2.5.2 Funcionamiento de la planta de concreto

El concreto es un producto manufacturado, cuya calidad y uniformidad dependen del control ejercido sobre su elaboración. La planta debe estar en buenas condiciones, operar de forma confiable y producir concreto aceptable, en forma uniforme entre un pastón y otro.

La segregación y el contenido variable de humedad de los agregados, afectan en gran medida la calidad y uniformidad del concreto. Generalmente se especifican la planta y el equipo para que cumplan la norma ASTM C 94 estándar sobre concreto amasado en planta. Los puntos clave, que se detallan en la ASTM C 94 son:

- Silos para agregados separados para cada tamaño de agregado grueso, con la capacidad de cortar con precisión el aporte de material.
- Controles para monitorear las cantidades de agregados, durante la carga de la tolva.
- Escalas con precisión del $\pm 0.2\%$ probadas dentro de cada cuarto del total de la escala. Se dispone de pesas de prueba estándar, adecuada para controlar la exactitud de las escalas.

- Agua agregada con una precisión del 1% del total de agua requerida para la mezcla.

Se debe optimizar el flujo de tránsito en la planta, considerando los siguientes elementos:

- La entrega de materias primas
- El despacho de concreto hacia la pavimentadora
- Las operaciones relacionadas con el Plan de Gestión de Calidad (QMP) y el control de calidad del contratista (CQC)
- La operación de los equipos para el manejo de los acopios de agregados
- Los requisitos de seguridad de la planta.

3.2.5.2.1 Manejos de los acopios de agregados

Se deben desarrollar e implementar los procedimientos para el manejo de los acopios. Deben tratar acerca de las mantas de almacenamiento para acopios, manteniendo los cubos de las cargadoras lejos del suelo, la descarga de camiones, las alturas máximas de los acopios, la carga de los silos, el muestreo de control de calidad, el riego de agua, el lavado de los agregados y sus humedades. Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones para el buen manejo de acopios de agregados:

- Es necesario manipular y almacenar los agregados de un modo tal que permita minimizar la segregación y la degradación, y prevenir la contaminación por sustancias deletéreas.

- Los acopios de agregado deben monitorearse estrechamente y deben mantenerse con un contenido de humedad. Esto es muy importante, especialmente en el caso de agregados usados en clima caluroso.
- Si la humedad de los agregados varía durante el día, deberá incrementarse la frecuencia de determinación de su contenido de humedad. Su variación aumenta cuando las palas cargadoras sacan agregados de un sector del acopio, o si su riego no es uniforme.
- Es necesario ajustar la cantidad de agua, en la mezcladora, de acuerdo con la humedad del agregado. En tiempo caluroso, se debe contemplar el uso de agua enfriada.
- Se debe limitar la altura desde la cual se deja caer el agregado al formar el acopio. Es necesario formar el acopio por capas de espesor uniforme. Al retirar agregados de un acopio (con una cargadora frontal), debe hacerse verticalmente desde abajo hacia arriba.
- Los acopios deben estar separados entre sí. Si no hay suficiente lugar como para mantener separadas las distintas granulometrías, se deberá usar una mampara divisoria.
- No debe permitirse el uso de aplanadoras en los acopios, ya que éstas rompen el agregado y segregan los tamaños de las partículas.
- El manejo apropiado de acopios, reduce la probabilidad de la contaminación de los agregados. Esta última ocurre cuando generalmente cuando los camiones que descargan el material, también acarrearán barro y lodo. También puede producirse la contaminación si los agregados no se descargan sobre cintas transportadoras, y en su lugar se acopian mediante cargadoras frontales.

La contaminación puede producirse cuando las cargadoras, al cargar los silos con agregados, raspan el fondo del acopio.

3.2.5.2 Ensayo de uniformidad el concreto

Se debe efectuar el ensayo de uniformidad del concreto, antes de comenzar la pavimentación, basándose en la norma ASTM C 94. Dichos ensayos también se usan para establecer los tiempos mínimos de mezclado. Los ensayos de uniformidad, comparan las diferencias entre las muestras de concreto tomadas aproximadamente al 15 y al 85% de la descarga del tambor. Estos ensayos incluyen:

- Densidad (peso unitario)
- Contenido de aire
- Asentamiento
- Contenido de agregado grueso
- Peso unitario del mortero libre de aire
- Resistencia a la compresión del concreto a los 7 días.

Las diferencias entre el concreto descargado al 15% y al 85%, deben ser menores que las diferencias máximas permitidas establecidas en la ASTM C 94, para cinco de cada seis ensayos. Los tiempos mínimos de mezclado para la producción, se establecen mediante los ensayos de uniformidad del concreto.

3.2.5.3 Acerca del equipo de pavimentación

Los procedimientos de control del equipo de pavimentación, son:

- Verificar la disponibilidad de las piezas necesarias del equipo. Deberá haber equipo adicional en el sitio, en caso de presentarse un desperfecto mecánico.
- Se debe asegurar que el equipo funcione correctamente.

- ✓ El equipamiento inspeccionado debe incluir los camiones de acarreo del concreto, los colocadores de concreto, los distribuidores, las pavimentadoras con moldes deslizantes, equipos de curado/texturizadores y equipos de aserrado.
- Inspeccionar las pavimentadoras de moldes deslizantes, para asegurar que se puede lograr una consolidación apropiada mediante vibración. Se debe revisar la frecuencia y amplitud de los vibradores, antes de comenzar a pavimentar. Los vibradores se deben colocar a una altura tal, que no interfieran con los armazones con pasadores precolocados.
- Se debe revisar el equipo de aplicación del curado, para asegurar una aplicación uniforme y apropiada del compuesto de curado.
- Las hojas de las sierras, para el aserrado de juntas, deben ser aptas para el tipo de agregado usado en la mezcla.

3.2.5.4 Acerca de la cuerda de guía

La precisión de cotas y las distancias de desplazamiento para los puntos de referencia de la rasante, son importantes para la lisura final de la superficie del pavimento.

Las cotas y distancias de desplazamiento antes descritas, proporcionan la base para el establecimiento de la cuerda de guía. Esta última se usa como referencia precisa para el control altimétrico y de alineación para el corte de la rasante, la colocación de la sub base/base y el tren de pavimentación con concreto. Cualquier error en la cuerda de guía se reflejará en el producto final.

En los alineamientos rectos, un intervalo máximo entre estacas de 7.5 m (25 pies), dará un buen producto final. Será necesario un intervalo menor en las curvas verticales, para producir pavimentos uniformes y las necesidades deben basarse en función del índice de cambio de curvatura.

3.2.6 Mezcla de concreto

3.2.6.1 Introducción

La calidad de un concreto se define normalmente en términos de trabajabilidad (docilidad), resistencia y durabilidad. Estos tres aspectos, de calidad del concreto, se deben optimizar para un proyecto dado.

3.2.6.1.1 Requisitos para una mezcla de concreto

Se establecen los requisitos para los agregados (grueso y fino), los materiales cementicios, los aditivos, el diseño de la mezcla y la aprobación del concreto. Generalmente se requiere de los siguientes atributos:

- Resistencia a la flexión mínima a los 28 días de 4 MPa ó 40 Kg./cm² (600 PSI).
- Contenido mínimo de cemento de alrededor de 300 Kg./m³.
- Relación agua-cemento (a/c) máxima de 0.50 (en áreas con ciclos intensos de congelación-deshielo, no debe superar 0.45. Para áreas severamente expuestas a los sulfatos, debe limitarse la relación a/c a 0.40).
- Asentamiento para concreto con moldes fijos laterales: 25 a 50 mm (1 a 2") y para concreto para moldes deslizantes: 13 a 38 mm (1/2 a 1 1/2").

- El contenido de aire se basa en la condición de exposición y el tamaño máximo de los agregados.
- Módulo de finura de los agregados finos entre 2.5 y 3.4.

3.2.6.1.2 Proceso de diseño de la mezcla en laboratorio

Ahora, se presentará un análisis sobre el procedimiento para establecer las proporciones de las mezclas de concreto, adaptado del procedimiento de diseño de mezclas de la Asociación del Cemento Pórtland de los EEUU, PCA.

- Obtener la información requerida para los materiales a emplear.
- Identificar los requisitos del proyecto para la relación máxima a/c, contenido de aire nominal, asentamiento, resistencia a los sulfatos y resistencia.
- Elegir el asentamiento; para pavimentos con moldes deslizables, debe estar comprendido entre 13 y 38 mm (1/2 a 1 1/2”) para minimizar el asentamiento de los bordes.
- Escoger el tamaño máximo del agregado. Usar el tamaño máximo de agregado disponible entre las opciones económicas y que pueda ser colocado y consolidado.
- Estimar el agua para a mezcla y el contenido de aire.
- Seleccionar la relación agua-materiales cementicios (a/c). Determinar la relación a/c necesaria para alcanzar los requisitos de resistencia y durabilidad. Para el concreto expuesto a la congelación, la relación a/c no debe exceder de 0.45.
- Calcular el contenido de materiales cementicios. Estimar las proporciones de los distintos materiales cementicios a usar de acuerdo con las propiedades deseadas.
- Estimar los contenidos de agregados grueso y fino.

- Se hace un ajuste de acuerdo a la condición de humedad del agregado.
- Realizar pastones (amasadas) de prueba. Éstos determinarán las proporciones exactas de las propiedades que se desea obtener, así como de las dosificaciones de aditivos requeridos. La dosificación de aditivos puede necesitar algún ajuste para alcanzar el contenido de aire y asentamiento requerido cuando se escala el pastón de laboratorio al pastón de carga completa en la obra.

3.2.6.2 Acerca del diseño de la mezcla de concreto

El mejor diseño de mezcla de concreto da como resultado un concreto con las siguientes características:

- Se mezcla, coloca, consolida y termina fácilmente bajo las condiciones de la obra.
- Adquiere la resistencia a la compresión o a la flexión requerida, en el tiempo deseado.
- Será durable en su ámbito de servicio. La preocupación respecto de la durabilidad a menudo supera las limitaciones impuestas por los requisitos de resistencia.

3.2.6.2.1 Trabajabilidad

Esta se define como la facilidad de colocación, consolidación y terminación del concreto recién colocado sin que se produzca segregación.

3.2.6.2.1.1 Trabajabilidad del concreto formado por moldes deslizantes

El proceso de diseño de una mezcla de concreto no se debe enfocar únicamente en lograr los requisitos de resistencia y asentamiento. Los factores relacionados con la trabajabilidad son los siguientes:

- La segregación durante el transporte y la colocación.
- La facilidad de consolidación, que se traducirá en una matriz de concreto bien distribuida.
- Bordes conformados mediante moldes deslizantes bien conformados con poco o ningún asentamiento.
- Mínima terminación manual requerida detrás de la pavimentadora, manipulando la superficie para lograr lisura y solidez.

La obtención de la trabajabilidad deseada para una mezcla dada, requiere la consideración de los siguientes elementos:

- Agregados: tamaño, granulometría, forma de la partícula, demanda de agua, variabilidad.
- Cemento: contenido de cemento, demanda de agua.
- Ceniza volátil (si se usa): efecto sobre el fraguado inicial, demanda de agua, efecto sobre la terminación.
- Cementos de escoria y escoria de alto horno granulada triturada fina (GGBFS): efecto sobre la terminación y el aserrado.
- Agua: demanda total de agua.
- Aditivos: el concreto con aire incorporado exhibe una mejor trabajabilidad, los reductores de agua disminuyen la demanda de agua mientras mejoran la trabajabilidad.

3.2.6.2.1.2 Resistencia

El requisito de resistencia puede fijarse en términos de resistencia a la flexión o a la compresión a las edades de 14, 28 ó 90 días.

Es necesario establecer la desviación normal para la resistencia, para proporcionar una orientación sobre los niveles de resistencia a alcanzar durante la fase de diseño de la mezcla. También es justo producir el concreto de manera uniforme entre un pastón y otro, para que la desviación normal del lote se mantenga lo más pequeña posible.

Para las colocaciones en tiempos fríos o calurosos, e calor de la hidratación, es un tema de mucho interés. Los pastones de prueba necesitan verificar que las mezclas propuestas alcanzarán las resistencias deseadas. Esto sería para colocaciones en tiempo frío y que no generarán calor excesivo cuando el concreto se coloque en tiempo caluroso.

Se necesita desarrollar los diseños de mezclas para las áreas de colocación manual (con moldes fijos). Estas mezclas tienen requisitos de trabajabilidad diferentes que las mezclas a colocar mecánicamente.

3.2.6.2.1.3 Resistencia a los sulfatos

Si los suelos o el agua del subsuelo contienen sulfatos, los materiales cementicios, deben ser lo suficientemente resistentes al ataque de los sulfatos y la relación agua/materiales cementicios deberá reducirse apropiadamente. Asimismo se debe considerar el empleo de puzolanas o escorias.

A los efectos de la resistencia a los sulfatos, la consideración principal es el contenido de C_3A en el cemento; sin embargo, un material cementante adicional, con altos contenidos de CaO y Al_2O_3 , se agregará al contenido de C_3A del sistema, haciéndolo más vulnerable ante el ataque de los sulfatos.

Algunas cenizas volátiles del tipo C, pueden reducir la resistencia del concreto al ataque de los sulfatos; sin embargo, si se incorpora la misma ceniza volátil tipo C al cemento combinado con yeso, en cantidad suficiente, puede proporcionar una excelente resistencia a los sulfatos.

3.2.6.2.1.4 Incorporación de aire

El concreto sometido a la congelación, debe contener un sistema bien distribuido de burbujas de aire atrapado finamente divididas.

Para protegerlo de los daños causados por las heladas. Se deben tener en cuenta los siguientes elementos:

- Deben hacerse pastones de prueba para determinar la dosificación correcta del aditivo, para las condiciones esperadas en el sitio de obra, incluida la temperatura.
- Los requisitos típicos de contenido de aire para pavimentos, oscilan entre el 5 y el 7%, según la exposición.
- El volumen de aire requerido para la protección contra las heladas, aumenta con la disminución en el tamaño de los agregados, debido al aumento correspondiente de cantidad de éstos últimos en la pasta de concreto.
- Un incremento en el contenido de aire se traduce en una disminución de la resistencia del concreto.

- Se deben ensayar los parámetros del sistema de burbujas de aire atrapado en el concreto endurecido, de acuerdo con ASTM C 457.
 - ✓ Es necesario un factor de espaciamiento de las burbujas de 0.20 mm (0.008”) o menor.
 - ✓ Para concretos que contienen materiales cementicios suplementarios, se requiere un factor de espaciamiento de 0.15 mm (0.006”) o menor.
- Se debe permitir asentar el concreto para el pastón de prueba, por un período representativo del tiempo de acarreo y luego medirlo al final de dicho período, para asegurarse de que el ensayo contempla la pérdida de aire. Cuando el concreto se despacha al sitio de colocación, en camiones que no se agitan, la pérdida de aire puede estar entre 1 y 2 puntos porcentuales.
- En un ambiente no congelante, si se ingresa aire con el solo propósito de mejorar la trabajabilidad, no corresponde aplicar los contenidos de aire mínimo requeridos para la protección contra las heladas.
- Las operaciones típicas de pavimentación, con moldes deslizantes, reducen el contenido de aire en un 1 a 2% durante la consolidación.

3.2.6.3 Materiales cementantes suplementarios y cementos combinados

El uso de materiales cementicios suplementarios, ya sea como componentes de cementos combinados o agregados en la mezcladora, puede mejorar sustancialmente las propiedades del concreto. Los siguientes, son puntos clave, referidos al empleo de materiales cementantes y cementos combinados:

- La ceniza volátil tipo C y la escoria contienen suficiente calcio para poseer algunas propiedades cementantes por sí mismas.
- La ceniza volátil clase F y las puzolanas naturales reaccionan con el agua y el hidróxido del calcio de la hidratación del cemento Pórtland, para formar hidrato de silicato de calcio.
- La reactividad de los materiales cementicios y el grado de aumento de la resistencia del concreto que los contiene, pueden variar claramente según su composición química, mineralógica y de su finura.
- La ceniza volátil puramente puzolánica clase F y las puzolanas naturales, tienden a producir menor calor de hidratación y menores resistencias a edades tempranas, que el cemento Pórtland.
- La ceniza volátil clase C puede producir calor de hidratación menor o mayor, y menor o mayor resistencia a edad temprana que el cemento Pórtland.
- La escoria generalmente disminuye el calor de hidratación y la resistencia a edad temprana.
- Los materiales cementicios suplementarios apropiados, pueden proporcionar los siguientes beneficios:
 - ✓ Reducen la tendencia a la fisuración por temperatura, dado que disminuyen el calor de hidratación.
 - ✓ Aumentan la resistencia (particularmente a edades avanzadas).
 - ✓ Reducen la permeabilidad y la difusividad.
 - ✓ Controlan las expansiones debidas a la reactividad álcalis-sílice (ASR) y aumentan la resistencia al ataque por parte de los sulfatos.
- Algunos materiales cementicios pueden ser mejores que otros para una aplicación determinada y otros pueden ser totalmente inapropiados.

- Las puzolanas naturales pueden brindar un excelente desempeño, parecido a las cenizas volátiles clase C.
- Si el agregado seleccionado es susceptible a la ASR, una ceniza volátil clase F puede ser la mejor forma de controlarla a igualdad de condiciones. La combinación de agregado, cemento y ceniza volátil debe ensayarse para determinar la cantidad de ceniza volátil necesaria.
- Se considera a la ceniza volátil clase F como el material cementante suplementario más eficaz para controlar el calor de hidratación, la ASR y la resistencia al ataque de los sulfatos.
- Es necesario ensayar cada combinación de materiales cementicios, agregados y aditivos, debido a que algunos materiales cementicios suplementarios sólo empeoran la situación en lugar de mejorarla.
- Los cementos combinados que contienen ceniza volátil clase F, arcilla calcinada (expandida) y/o humo de sílice, también se pueden usar para controlar el calor de hidratación, y la resistencia al ataque de los sulfatos.
- En caso de que el cemento combinado disponible no cumpla con los requisitos para el control de la reacción álcalis-sílice o la resistencia a los sulfatos, se deberá agregar material cementante suplementario adicional del mismo tenor o diferente, según sea necesario.
- Las mezclas ternarias, que contienen tres materiales cementicios, pueden ofrecer la mejor opción en algunas aplicaciones.

3.2.6.4 Incompatibilidad entre materiales

Algunos concretos exhiben características indeseables, debido a la incompatibilidad entre los distintos materiales que los componen, siendo:

- Rápida pérdida de la trabajabilidad (endurecimiento temprano)

- Fraguado retardado
- Fisuración a edad temprana debida a la contracción autógena y de secado del concreto
- Falta de un sistema apropiado de burbujas de aire atrapado

Estos problemas afectan la productividad de la obra y el desempeño a largo plazo del concreto. A medida que las mezclas de concreto, con el uso de materiales cementicios suplementarios y las combinaciones de los aditivos químicos, se vuelven cada vez más complejas, la probabilidad de incompatibilidad entre los materiales cementicios y los aditivos, aumenta de acuerdo a la cantidad de ingredientes que se agregan a la mezcla. Para minimizar el problema de incompatibilidad, se debe tomar en cuenta:

- Todos los aditivos utilizados en el proyecto, deben provenir del mismo fabricante para asegurar su compatibilidad. Se recomienda no exceder las dosis recomendadas.
- Debe tenerse seguridad de que todos los materiales cementicios cumplan con las especificaciones del proyecto y/o los requisitos de las normas ASTM correspondientes.

Asimismo, se recomienda contar con diseños de mezcla para tiempo frío y caluroso en zonas de amplitud térmica estacional significativa.

3.2.6.5 Requisitos para los agregados

3.2.6.5.1 Granulometría de los agregados

Las mezclas de concreto producidas con una combinación de agregados bien gradados tienden a:

- Reducir la necesidad de agua
- Proporcionar y mantener una trabajabilidad adecuada
- Requerir una terminación mínima
- Consolidarse sin segregarse
- Mejorar la resistencia y el desempeño prolongado

Las mezclas de concreto producidas por medio de una combinación de agregados de granulometría deficiente tienden a:

- Segregarse fácilmente.
- Contener mayores cantidades de finos.
- Requerir mayor cantidad de agua.
- Incrementar la susceptibilidad de agrietamiento.
- Limitar el desempeño prolongado.

La granulometría de la fracción de agregados finos también es importante: los finos demasiado pequeños dificultan la extrusión y la terminación, además de aumentar la tendencia a la exudación (sangrado); un exceso de finos aumenta la demanda de agua por parte del concreto y la dosis requerida de aditivo incorporador de aire (aireante).

La granulometría combinada de los agregados se usa para calcular los factores de grosor y de trabajabilidad, de la siguiente manera:

$$\text{Factor de grosor} = 100 \left(\frac{\% \text{ retenido tamiz } 9,5\text{mm } (3/8")}{\% \text{ retenido tamiz } 2,36\text{mm } (\#8)} \right)$$

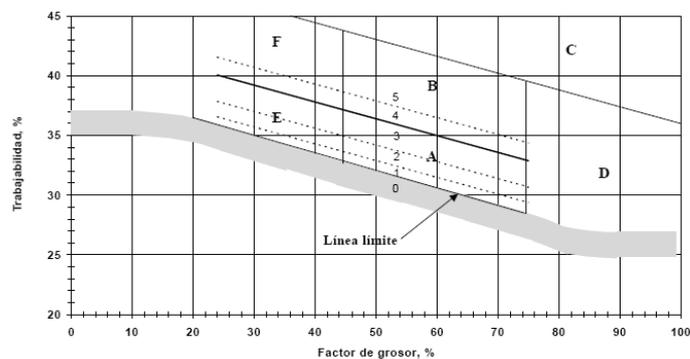
$$\text{Factor de trabajabilidad} = \% \text{ pasa tamiz } 2,36\text{mm } (\#8)$$

Es necesario aumentar el factor de trabajabilidad en un 2,5% para cada incremento de 43kg (94 lbs) de material cementante por encima de los 335 kg/m³ (564 lbs/yd³).

El factor de trabajabilidad se grafica en función del factor de grosor, tal como se muestra en la figura 6 y se evalúa de la siguiente manera:

1. Las combinaciones de agregados con un punto del medio hacia arriba del cuadro A y desde la parte inferior hacia el medio del cuadro B producirán mezclas aptas para la pavimentación con moldes deslizables. Sin embargo, los agregados, basados en su textura y forma, que caen dentro de otras zonas del gráfico, también pueden ser aceptables para la pavimentación con moldes deslizables.
2. Las combinaciones de agregados que caen dentro del tercio izquierdo del cuadro A producirán mezclas aptas para la pavimentación con moldes fijos.
3. Las combinaciones de agregados que caen dentro de la zona media del cuadro B producirán mezclas aptas para áreas con colocación manual del pavimento.
4. Las combinaciones de agregados que se muestran cerca del límite inferior pueden tender a contener una cantidad excesiva de agregado grueso.

Figura 6. Factor de trabajabilidad versus factor de grosor para combinación de agregados



5. Las combinaciones de agregados con un punto por debajo de la línea límite inferior producirán mezclas rocosas con inadecuada cantidad de mortero.
6. Las combinaciones de agregados por encima de la línea límite superior (área C) producirán mezclas arenosas con altas cantidades de finos que requieren mayores contenidos de agua y conllevan la posibilidad de disgregarse.
7. Las combinaciones de agregados cerca de la parte superior del cuadro B tenderán a tomar las características de las del área C.
8. Las combinaciones de agregados con factores de grosor mayor que 75 (cuadro D) producirán mezclas de granulometría deficiente, con trabajabilidad inadecuada y un alto potencial de segregación.
9. Las combinaciones de agregados con un punto dentro del cuadro E o F, se relacionan, respectivamente, con el cuadro A o B para tamaños de agregados menores a los 19 milímetros (3/4"). Cuando se usa el gráfico grosor/trabajabilidad, se supone que las partículas tienen forma redondeada cúbica. Estos tipos de formas de agregados normalmente mejoran las características de trabajabilidad y terminación. Por el contrario, los agregados o chatos y elongados limitan dichas características.

3.2.6.5.2 El caso de los agregados de escorias

Los agregados de escoria de hierro correctamente envejecida o de alto horno tienen un buen desempeño. Sin embargo, es muy importante controlar el contenido de humedad cuando se usa este tipo de agregados. Los problemas potenciales incluyen variaciones en la trabajabilidad y la consolidación. Si no se maneja bien la humedad del agregado de escoria, el concreto colocado puede presentar "nidos de abejas" y bordes de conformación deficiente.

Las escorias provenientes de molinos de acero de hornos de solera no deben emplearse como agregados para el concreto o para el econocreto/concreto económico, dada la naturaleza expansiva de los agregados de escoria de acero.

3.2.6.5.3 El caso de los agregados de concreto reciclado

El concreto reciclado, o concreto triturado, es una fuente factible de agregados siempre y cuando cumpla con los requisitos específicos de proyecto para los agregados. El concreto reciclado posee, generalmente, una mayor absorción que los agregados vírgenes y posiblemente necesite más agua para alcanzar la misma trabajabilidad y asentamiento que la de un concreto con agregados vírgenes. Un problema potencial que se presenta con el uso del agregado reciclado es que la variabilidad de las propiedades del concreto viejo puede afectar las propiedades del nuevo.

3.2.6.6 Ajustes en obra del diseño de mezcla de concreto

Durante el período constructivo puede presentarse escasez o desabastecimiento de cemento u otros ingredientes del concreto. Si es necesario cambiar el tipo, la fuente o la marca del material cementante, los aditivos o la fuente de los agregados, se deberán realizar pastones de prueba para verificar que se mantienen las condiciones requeridas. Serán necesarios ciertos ajustes menores en las proporciones de la mezcla de concreto debido a cambios climáticos, y para mantener la trabajabilidad y el contenido de aire especificados. Si se aumenta el contenido de aire o si se agrega agua por sobre la relación a/c de diseño, puede disminuir la resistencia del concreto.

Los ajustes en las dosis de aditivos son aceptables siempre y cuando las dosis máximas no excedan los valores máximos recomendadas por el fabricante. La dosis del aditivo incorporador de aire, requerida para inyectar un volumen dado de aire, variará con la temperatura del concreto. Si la dosis necesaria fue determinada en laboratorio a los 20 °C (70 °F), puede disminuirse en aproximadamente un 30% para temperaturas de colocación entre 4 y 10 °C (40 y 50 °F) y aumentar en alrededor de un 30% para temperaturas entre 40 y 45 °C (100y 110 °F).

Si resulta necesario desarrollar un nuevo diseño de mezcla debido a los cambios en los materiales del concreto, se debe permitir que el contratista pavimento una vez que los ensayos de rotura a edad temprana indiquen que la nueva mezcla proporcionará la resistencia especificada a la edad especificada. Es conveniente que el contratista use temporalmente una mezcla de mayor resistencia hasta que se disponga de los resultados de resistencia de la nueva mezcla.

Nótese que la resistencia del concreto no es el único criterio que debe cumplir la mezcla nueva. Es necesario poder mezclar, colocar, consolidar y terminar el concreto en las condiciones de trabajo. Es necesario verificar los tiempos de fraguado. Si se espera que la construcción del pavimento se prolongue durante más de una estación o época del año, es conveniente contar con más de un diseño de mezcla.

3.2.7 Colocación, terminación, texturizado y curado del concreto

3.2.7.1 Introducción

La pavimentación mecánica se usa para el pavimento principal, las pistas de rodaje de conexión y curvas de enlace amplias. Las áreas hechas a mano son aquellas demasiado pequeñas para usar la maquinaria. Para la pavimentación con máquinas se usan dos tipos de pavimentadoras: pesadas y livianas. Las máquinas pesadas son las pavimentadoras con moldes deslizables. Las máquinas más livianas incluyen las pavimentadoras de tablero de puente, con moldes laterales y sinfín vibratorio o rodillos de cilindro.

3.2.7.2 Factores críticos para la pavimentación con concreto

Se deben de considerar ciertos aspectos que afectan a una pavimentación como obra civil, los mismos se proponen de la siguiente forma:

1. Una buena rasante para pavimentar: cortada y pavimentada de acuerdo con las especificaciones.
2. Manejo de la cuerda de guía: monitoree y mantenga la cuerda de guía en intervalos regulares.
3. El suministro continuo de concreto a la pavimentadora.
4. Trabajabilidad uniforme del concreto.
5. Equipo de pavimentación bien mantenido.
6. Operación correcta del equipo de pavimentación.
7. Densidad del concreto: el nivel justo de vibración para consolidar el concreto y proporcionar la suficiente cantidad de finos para una terminación compacta.
8. Una cuadrilla habilidosa y dedicada.

3.2.7.3 Entrega del concreto en el sitio

Antes y durante la entrega de concreto, se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Debe inspeccionarse la rasante para su aprobación antes de depositar concreto sobre la misma. Se retira cualquier residuo suelto y se repara cualquier daño en la base.
2. Se deben verificar las cotas de la cuerda de guía.
3. El concreto se debe depositar en la base dentro en el tiempo estimado tras la adición del agua. Cuando se lo coloca, se debe disponer de tiempo suficiente para su consolidación, enrasado y terminación antes del fraguado inicial.
4. Cuando se avanza con las pavimentadoras con moldes deslizantes por sobre las cabeceras, se recomienda usar un concreto con mayor asentamiento, para facilitar las tareas de consolidación manual y terminación.
5. Se recomienda el uso de camiones mezcladores, factor que generalmente permite una colocación más uniforme y minimiza la segregación.
6. Una entrega uniforme del concreto posibilita minimizar las paradas y rearranques constantes de la pavimentadora.

Si se paran las tareas de pavimentación para esperar la recepción de concreto desde la planta, deberán usarse más camiones o será necesario reducir la velocidad de la pavimentadora.

3.2.7.4 Colocación del concreto

Las prácticas aceptables de colocación del concreto incluyen los siguientes aspectos:

1. Es necesario depositar el concreto cerca y uniformemente frente a la pavimentadora o distribuidor frontal, procurando minimizar la alteración de la base, del acero empotrado, los pasadores y los moldes laterales.
2. Es necesario colocarlo de forma tal que ninguno de los costados de la faja de pavimentación quede sobrecargado de material.
3. En áreas conformadas, se debe colocar el concreto lo más cerca posible a su posición final, para minimizar la posibilidad de segregación.
4. El concreto se vuelca sobre la rasante frente a la pavimentadora o sobre colocadores a cinta transportadora y distribuidores de carga lateral.
 - a. Si se le vuelca sobre la rasante, controle la velocidad de descarga regulando la apertura de la puerta trasera del camión.
 - b. No se recomienda emplear una pala cargadora frontal para distribuir el concreto frente a la pavimentadora.
5. La ventaja del volcado directamente frente a pavimentadoras o distribuidores es que permite mantener fácilmente la cantidad de carga de concreto frente al sinfín de la máquina.
6. Las desventajas de la descarga directa son:
 - a. Los camiones que atracan en reversa frente a la pavimentadora pueden alterarla base granulada.
 - b. Es necesario colocar los armazones con pasadores justo frente a la pavimentadora, hecho que no permite verificar, por falta de tiempo, el alineamiento de los pasadores o su fijación segura a la base. Es necesario tener en cuenta la seguridad de los trabajadores que se desempeñan entre la pavimentadora que avanza hacia adelante y la cola de los volquetes en reversa.
 - c. Se requiere la presencia de un inspector de tiempo completo para verificar la colocación y alineación de los armazones con pasadores.
 - d. Se debe interrumpir al menos una de las cuerdas de guía para permitir la entrada y salida de los camiones del área de pavimentación.

7. Cuando se usa un colocador a cinta transportadora:
 - a. Oscilar la cinta hacia adelante y hacia atrás para mantener una carga uniforme de concreto frente a la pavimentadora.
 - b. Si la pavimentadora tiene poco concreto, se debe llevar el colocador hacia atrás para proveer más material en las distintas zonas según sea necesario.
8. Cuando se usa un distribuidor, no se debe adelantar a más de 7,5 m (25 pies) por delante de la pavimentadora y de este modo se puede regular la cantidad de carga de concreto en esta máquina.
9. El operador de la pavimentadora debe controlar el nivel de concreto en el plato, de carga elevando o bajando la hoja de enrasado en la medida de lo necesario.

3.2.7.5 Colocación del acero empotrado y las barras de unión

Es necesario soportar mediante separadores (silletas) las barras o mallas de acero empotradas usadas normalmente en áreas de curvas de enlace y otros paneles con forma singular. Éstos deben colocarse lo suficientemente cerca para que soporten el acero sin que se combe. Las barras de unión usadas como armadura empotrada y posicionadas alrededor de las penetraciones deben soportarse por medio de separadores dentro de las tolerancias para la cota especificada. Las mallas de alambre soldadas deben ser planas y cumplir con las cotas dentro de las tolerancias.

Como es común que se consolide suplementariamente con vibradores de inmersión alrededor de las mallas, los separadores deben soportar el peso de los trabajadores durante las tareas de consolidación del concreto.

Previo a la colocación del concreto, los inspectores deben verificar y aprobar el diámetro de las barras de acero, la presencia de recubrimientos de epóxico, la ausencia de descascaramientos en el epóxico, la ubicación, cota y despeje del acero (respecto de otras barras o pasadores/barras de unión en juntas) y la distancia entre separadores.

Se pueden emplear insertadores de barras de unión auto - recargables montados sobre pavimentadoras con moldes deslizantes a lo largo de juntas longitudinales de contracción aserradas cuando se pavimentan varias fajas. Los inyectores empujan las barras de refuerzo dentro del concreto fresco y vibran a éste último por sobre las barras. Se usan distanciómetros para disparar la inserción de las barras de unión con un espaciamiento determinado. Se debe vigilar el posicionamiento longitudinal de las barras para asegurar que se mantenga la distancia mínima especificada respecto de las juntas transversales.

Se puede verificar la profundidad del acero empotrado a través de la exposición de las barras en el concreto fresco o la extracción de testigos sobre los extremos de barra, el uso de un medidor de recubrimiento de armadura magnético o la implementación de un radar penetrante de la superficie (GPR) como ensayo no destructivo.

3.2.7.6 Consolidación del concreto

El uso correcto de los vibradores internos, es importante para consolidar adecuadamente el concreto sin afectar adversamente su resistencia y durabilidad. A continuación se resumen puntos importantes relacionados con la consolidación del concreto:

1. Las pavimentadoras con moldes deslizantes consolidan el concreto en el plato de carga usando vibradores montados en serie.
2. En las pavimentadoras más grandes, los vibradores se accionan hidráulicamente. En las más pequeñas, se pueden emplear vibradores eléctricos o hidráulicos.
3. Una consolidación inadecuada se traduce en una menor resistencia del concreto y la formación de “nidos de abeja”. La vibración inadecuada puede deberse a:
 - a. Un vibrador que funciona mal o no funciona
 - b. Exceso en la velocidad de la pavimentadora
 - c. Una mezcla de concreto con mala trabajabilidad.
4. La sobre consolidación puede originar problemas en la durabilidad congelación-deshielo si el sistema de burbujas de aire atrapado es alterado en forma adversa. La sobre consolidación puede deberse a:
 - a. Una frecuencia excesiva del vibrador
 - b. La reducción de la velocidad de avance de la pavimentadora sin ajustar la frecuencia del vibrador
 - c. Propiedades de mala trabajabilidad de la mezcla de concreto.
5. Los vibradores se posicionan generalmente a no más de 10 cm (4”) debajo de la superficie de pavimento terminada. El ajuste de los vibradores en una posición demasiado baja origina la acumulación de aire debajo del cabezal del plato de carga, lo que conduce a delaminaciones y a la formación de burbujas en la superficie del pavimento.
6. Los vibradores se colocan generalmente en una inclinación de entre 5 y 10 grados. A medida que avanza la pavimentadora, los vibradores en ángulo consolidan el concreto.

7. La distancia entre vibradores es una función del radio de acción. El radio de acción y la inyección de energía vibratoria en el concreto son una función de la velocidad de la pavimentadora, la fuerza del rotor de los vibradores y la frecuencia (fijadas por el maquinista).
8. Antes de comenzar cada día de trabajo, se deben verificar sin carga las frecuencias y amplitudes de los vibradores. Grandes diferencias entre los vibradores indican que los mismos están funcionando mal.

Es necesario examinar los testigos extraídos de la faja de prueba o de las etapas iniciales de pavimentación para asegurarse una consolidación aceptable en las variables de pavimentación dadas (profundidad de los vibradores, ángulo de ataque, frecuencia bajo carga, espaciado, cabezal del plato de carga y velocidad de avance). Se deben examinar los testigos extraídos entre y en las trayectorias de los vibradores en busca de:

- Evidencias de segregación de los agregados en las rutas de los vibradores
- Excesiva cantidad de aire incorporado
- Diferencias en la densidad del concreto endurecido.

Las grandes cavidades de aire incorporado (formación de “nidos de abeja”) y la segregación de agregados, se pueden eliminar al modificar:

- La frecuencia de los vibradores
- La velocidad de avance de la pavimentadora
- La profundidad de los vibradores
- La distancia entre vibradores

Los bordes verticales producidos por moldes deslizantes no deben exhibir una cantidad excesiva de burbujas de aire atrapado. Posiblemente sea necesario posicionar vibradores suplementarios cerca de los bordes verticales en las pavimentadoras con moldes deslizantes y de moldes fijos, para asegurar una consolidación adecuada.

Existen sistemas de vibrado inteligente que monitorean continuamente sus frecuencias durante las tareas de pavimentación. Se recomienda el uso de este tipo de sistema, dado que permite la verificación continua de la uniformidad en las frecuencias.

Una frecuencia vibratoria en el orden de 6.000 a 8.000 vibraciones por minuto (bajo carga), normalmente se traducirá en una consolidación aceptable para una mezcla correctamente diseñada.

Las mezclas de concreto que emplean control de la granulometría requieren menor frecuencia vibratoria. La respuesta de la mezcla de concreto a la vibración debe evaluarse el primer día de pavimentación o después de la construcción de la faja de prueba.

3.2.7.7 Terminación del concreto

La terminación del concreto es un paso crucial del proceso de pavimentación. Es la terminación manual que se aplica normalmente para obtener una superficie lisa, necesaria para corregir cualquier irregularidad detrás de la pavimentadora. Los esfuerzos de terminación del concreto se deben mantener en un nivel mínimo. Idealmente, la mezcla de concreto correcta dará como resultado una terminación superficial aceptable detrás de la pavimentadora.

Algunos puntos importantes en cuanto a la terminación concreto son:

1. La necesidad de la terminación del concreto se minimiza mediante:
 - a. La selección de una mezcla de concreto con trabajabilidad.
 - b. La operación apropiada del equipo de pavimentación.
2. La terminación manual excesiva traerá el agua a la superficie y puede afectar la lisura superficial y la durabilidad del concreto.
3. Los problemas que surgen al cerrar la superficie detrás de la pavimentadora indican:
 - a. Un volumen demasiado pequeño en el plato de carga y/o que el concreto está fraguando en el plato de carga.
 - b. Volumen de agregados finos respecto de los gruesos o volumen de pasta demasiados bajos.
 - c. Que el ángulo de la placa de terminación necesita ajuste.
 - d. Exceso de velocidad de la pavimentadora.
 - e. Que los vibradores necesitan un ajuste.
4. Si se usa agua para ayudar a la terminación es necesario pulverizarla, no rociarla, sobre la superficie y no debe ser incorporada a la misma mediante llanas.

3.2.7.8 Texturizado del concreto

Los pavimentos de concreto deben tener una textura superficial que proporcionará el nivel deseado de resistencia al deslizamiento. Las funciones principales de la textura superficial consisten en proporcionar:

1. Vías de escape para el agua debajo de los neumáticos de los vehículos.
2. Un grado de aspereza a la superficie, necesaria para que los neumáticos rompan la película residual luego de que escurra el agua masiva.

El texturizado del concreto es la técnica empleada con más frecuencia para dotar al pavimento de una superficie altamente resistente al deslizamiento. Sin embargo, no impedirá el hidroplaneo. Se aplica mientras el concreto aún se encuentra en estado plástico. Los métodos para el texturizado incluyen:

1. Terminación con cepillo o escoba

- a. Aplicada apenas haya desaparecido el brillo del agua (agua exudada).
- b. Aplicada en forma transversal al eje del pavimento.
- c. Las estrías deben ser uniformes en su apariencia y tener alrededor de 1,5 milímetros (1/16") de profundidad.
- d. La superficie texturizada no debe exhibir gotas ni ser excesivamente rugosa.

2. Terminación con rastra de arpillera o carpeta de césped sintético.

- a. El tipo de arpillera debe pesar más de 500g/m² (15 oz/yd²).
- b. El borde de la arpillera que se arrastra necesita estar cargado con una pesada carga de mortero para producir el estriado longitudinal deseado sobre la superficie.
- c. Las estrías deben ser uniformes en su apariencia y tener alrededor de 1,5 milímetros (1/16") de profundidad.

3. Peinado con alambres (alambres rígidos de acero)

- a. Usados para proporcionar una textura más profunda en el concreto fresco.
- b. Los alambres de acero tienen alrededor de 10 cm (4") de largo, 0,8 mm (0,03") de alto y 2 mm (0,08") de ancho.
- c. Las huellas continuas tienen aproximadamente 3 mm x 3 mm (1/8" por 1/8") y están espaciadas 13 mm (1/2 ") entre centros.
- d. No es necesaria la terminación con cepillo, escoba o arpillera previa al peinado con alambres.
- e. El peinado con alambres no sustituye al estriado (ranurado). No mejora el drenaje superficial.

4. Rayado con alambres (bandas flexibles de acero)

- a. Usadas para proporcionar una textura profunda en el concreto fresco.
- b. Las bandas flexibles de acero tienen 13 cm (5") de largo, aproximadamente 6 mm ($\frac{1}{4}$ ") de ancho y están separadas 13 mm ($\frac{1}{2}$ ") entre sí.
- c. No es necesaria la terminación con cepillo, escoba o arpillera previa al rayado con alambres.
- d. El rayado con alambres no sustituye al estriado (ranurado). No mejora el drenaje superficial.

3.2.7.9 Estriado del concreto

La conformación de estrías en el concreto blando o el corte de ranuras en el concreto endurecido son técnicas probadas y eficaces para minimizar la posibilidad de hidro planeo durante tiempo lluvioso. Los factores a considerar para determinar la necesidad del estriado incluyen:

1. El historial de accidentes e incidentes relacionados con el hidropneumático en las carreteras.
2. La frecuencia de las tormentas (frecuencia e intensidad de las lluvias).
3. Las características de textura de la superficie del concreto y la naturaleza de pulido de los agregados del concreto.

Las estrías tienen aproximadamente 6 mm x 6 mm ($\frac{1}{8}$ " por $\frac{1}{8}$ ") y están espaciadas 38 mm ($\frac{1}{2}$ ") entre centros. Las estrías no se continúan por sobre las juntas y se las interrumpe a una distancia de 15 cm (6") de ellas. Los métodos de estriado incluyen:

1. Estriado mediante aserrado.
 - ✓ Este método proporciona estrías bien conformadas y una profundidad uniforme de las mismas.
 - ✓ La superficie estriada es más durable ya que las caras estriadas aportan agregado grueso a la matriz del concreto.
2. Se deben tomar precauciones al aserrar estrías adyacentes a las luminarias empotradas en el pavimento.
3. Estriado del pavimento blando con placa ranurada.
 - ✓ La vibración permite la redistribución del agregado sobre la superficie del concreto.
 - ✓ Este método proporciona estrías bien conformadas.
4. Estriado del pavimento blando con rodillo estriado.
 - ✓ Este método no proporciona estrías bien conformadas.
 - ✓ La profundidad del estriado puede ser irregular.

3.2.7.10 Curado del concreto

El curado es el mantenimiento de la humedad adecuada y los regímenes de temperatura del concreto recién colocado por un período de tiempo inmediatamente posterior a su terminación. El curado incorrecto puede causar graves detrimentos en las propiedades del concreto a corto plazo (fisuración por retracción plástica) y a largo plazo (superficie menos durable, alabeo excesivo del concreto endurecido). Dado lo anterior, se debe considerar:

1. Los tiempos de aplicación del curado son cruciales, especialmente durante tiempo caluroso. Es necesario aplicar el curado tan pronto como desaparezca el agua sobre la superficie del concreto luego de su terminación y texturizado. Puede que no se forme agua cuando usa ceniza volátil o escoria.

2. Cuando se emplean compuestos aplicados por pulverizado, la cantidad y uniformidad de la cobertura son factores cruciales.
 - a. Aplicar el curado pulverizado con equipo montado sobre la estructura autopropulsada, y que abarque todo el ancho de la faja pavimentada.
 - b. Limitar el pulverizado manual en sólo a las áreas pavimentadas manualmente.
 - c. Cuando se usan compuestos de curados con pigmentación blanca, su aplicación uniforme puede examinarse visualmente pero es necesario verificar la proporción a través de la medición del volumen usado para un área dada y su posterior comparación con los requisitos especificados o recomendados por el fabricante.
 - d. Es necesario aplicar el curado a las caras expuestas del concreto tras la colocación mediante moldes deslizantes o el retiro de los moldes.
 - e. Es necesario aplicar el curado a las superficies de las juntas inmediatamente después de aserrarlas y limpiarlas.
3. Si se ha de usar curado por vía húmeda, debe mantenerse mojada la totalidad de la superficie del concreto durante todo el período de curado (generalmente 7 días) o durante la aplicación del compuesto de curado.

3.3 Mantenimiento para el Pavimento Rígido

Para el mantenimiento de este tipo de pavimento, pueden enumerarse:

- Reparaciones de profundidad parcial
- Reparaciones de profundidad total

3.3.1 Reparaciones de profundidad parcial

3.3.1.1 Necesidad

Se realizan debido a la presencia de descascaramientos en las juntas del pavimento o en medio de las losas.

Estos descascaramientos suelen aparecer a lo largo de las juntas y grietas longitudinales, aunque son más comunes en las discontinuidades transversales. Éstos, en medio de la losa son debido al refuerzo de acero que se encuentra en la superficie de la misma.

Los descascaramientos producen una superficie áspera y provocan un aceleramiento en el deterioro del pavimento. Generalmente son fallas localizadas, requiriendo así procedimientos de reparación localizados. También son producidos por la penetración de materiales incompresibles dentro de las juntas y grietas transversales no selladas; dándose este fenómeno mientras las juntas se abren debido a las bajas temperaturas.

Al incrementarse la temperatura, evitarán la que las losas se expandan, impidiendo que las juntas se cierren. El resultado de esto es la inducción de tensiones compresivas a lo largo de las paredes de las juntas, ocasionando la rotura del concreto. El descascaramiento puede producirse en la parte superior o inferior de la junta.

También es común el uso de perfiles, puestos durante el vaciado en la parte inferior de la losa con el fin de debilitar la sección del pavimento e inducir las juntas, o de barras de traspaso cuando quedan desalineadas generan los descascaramientos de las juntas transversales.

3.3.1.2 Investigación preliminar

Antes de comenzar las reparaciones, preferiblemente con menos de 60 días de anticipación a los trabajos, debe realizarse una investigación de campo, con el fin de definir los límites de las áreas que se van a reparar y llevar esa información a los planos del tramo.

Es posible que la extensión real de los trabajos sea más prolongada que la indicada en los planos; esto debido a que el descascaramiento es progresivo. Esto implica también que se requiera una cantidad mayor de reparación que la estimada inicialmente en los planos.

3.3.1.3 Bordes de la reparación

Como se mencionó anteriormente, previo a iniciar los trabajos, es necesario realizar una investigación detallada para estimar los límites reales de las zonas a reparar.

Esto se hace recorriendo toda la vía, definiendo las áreas en las cuales el descascaramiento es inminente, utilizando la técnica de resonancia, que consiste en golpear la superficie del concreto con una varilla de acero o martillo de carpintero, o arrastrando una cadena a lo largo de la superficie.

Al efectuar este procedimiento un sonido metálico y seco indicará que el concreto se halla en buen estado, mientras que un sonido apagado o hueco indicará las zonas afectadas.

Con el fin de asegurar la remoción del concreto en mal estado, los límites del área a reparar se deben extender más allá de las áreas deterioradas entre 80 y 100 milímetros. Los límites de las áreas a reparar se deben pintar definiendo áreas cuadradas o rectangulares ya que las áreas irregulares pueden causar el desarrollo de grietas en el concreto utilizado en la reparación.

Cuando se presenten áreas que necesiten arreglo y están a menos de 600 milímetros de distancia, se recomienda que se integren en un área, con el fin de reducir costos y proporcionar una apariencia más agradable.

3.3.1.4 Remoción

El concreto descascarado o deteriorado se puede remover por aserrado o cincelado, o por un proceso de fresado.

3.3.1.4.1 Aserrado y cincelado

Para remover el concreto descascarado mediante el aserrado y cincelado, se debe efectuar un corte con una sierra alrededor del perímetro del área a reparar. Esto proporcionará una pared vertical en los bordes de la reparación y dará la profundidad suficiente para otorgar integridad al bache. El corte de la sierra debe tener una profundidad mínima de 40 milímetros.

Es frecuente hacer cortes adicionales, con la sierra, dentro del área de reparación, para facilitar la remoción por cincelado.

La superficie del bache se debe remover en una profundidad mínima de 40 milímetros con herramientas neumáticas ligeras hasta que quede expuesto el concreto sano.

En donde los baches sean grandes, la mayor parte de su área también se puede fresar usando una máquina de fresado en frío de tamaño pequeño. Sin embargo, la remoción final hasta los límites del corte de sierra requerirá del uso de herramientas neumáticas ligeras.

Es muy importante usar herramientas del tamaño adecuado. El uso de un martillo neumático demasiado grande causará daños y fracturas en el concreto más allá de la profundidad realmente necesaria para llegar al material en buen estado. Se recomienda no usar martillos neumáticos pesados; el tamaño máximo permitido de martillo neumático para ser usado en el cincelado de las reparaciones de profundidad parcial, es de 15 kilos.

3.3.1.4.2 Fresado

La remoción de concreto descascarado mediante el fresado en frío es especialmente efectiva cuando la reparación se extiende a todo el ancho del carril o a la mayor parte de él. Las máquinas de fresado deben estar equipadas con un aparato para detenerse a una profundidad preestablecida con el objeto de evitar remociones excesivas y un posible daño a las barras de acero, si las hubiere. Después de hacer el fresado, el fondo del área de la reparación se debe inspeccionar por resonancia, para asegurar que todo el material en mal estado se haya removido. Cualquier material restante en mal estado se debe soltar con cincel; tomando en cuenta que se necesite reparar todo el espesor.

Puede ser perpendicular o paralelo al eje del pavimento, el primero se recomienda cuando se van a reparar descascaramientos a lo largo de toda una junta. Para descascaramientos pequeños, cualquier dirección en que se realice el fresado es buena.

Cuando se realiza el fresado las paredes no quedan verticales y según experiencias anteriores, se ha indicado que el concreto delgado, o en forma de cuña a lo largo del perímetro de la reparación, tiene tendencia a desprenderse. Esto también ocurre cuando se usa un martillo neumático para formar los límites del bache y los bordes no quedan parejos.

3.3.1.5 Limitaciones

Si el concreto está en mal estado se extiende en toda la profundidad de la losa o en más de un tercio de su espesor. Las reparaciones de profundidad parcial no deben continuar en este sitio y se debe marcar el área y hacer allí una reparación de todo el espesor del pavimento.

También se deben considerar las reparaciones de profundidad total cuando el concreto se daña en más de 1/3 de la profundidad de la losa durante el cincelado o si se encuentran barras de transferencia de cargas durante el proceso de remoción. Por ningún motivo el material de reparación de profundidad parcial se debe apoyar en las barras de traspaso u otro refuerzo importante.

3.3.1.6 Limpieza

Las caras expuestas del concreto se deben limpiar con un chorro de arena a presión para dejarlas libres de partículas sueltas, aceite, polvo, restos de concreto asfáltico y otros contaminantes antes de proceder a la reparación.

Los anteriores procedimientos dejará una superficie áspera y limpia que ayudará a proporcionar una buena adherencia.

El equipo de aire a presión se debe revisar para que no desprenda aceite, debido a que el aceite rociado con el aire contaminará las paredes del bache e impedirá la adherencia y el buen comportamiento de la reparación.

Después de la limpieza, con aire a presión, de la superficie del bache, ésta queda lista para la colocación del material.

3.3.1.7 Preparación de juntas

Las reparaciones de profundidad parcial adyacentes a las juntas transversales o a las longitudinales, como también a las bermas, requieren preparativos de construcción especiales.

3.3.1.7.1 Juntas longitudinales

Al efectuar una reparación de profundidad parcial contra una junta longitudinal, el concreto de la reparación no se debe adherir al concreto del carril adyacente. Si se produce la adherencia, el alabeo, o el movimiento diferencial, de las losas puede causar descascamientos en el bache.

La eliminación de la adherencia se puede lograr ya sea mediante un inserto compresible en la junta o colocando una tira delgada de polietileno o un fieltro de techo impregnado con asfalto a lo largo de la junta, antes de colocar el material del bache.

3.3.1.7.2 Juntas transversales y grietas

Los baches adyacentes a las juntas o grietas activas que penetran en toda la profundidad de la losa, requieren del uso de un inserto compresible, u otro medio para romper la adherencia, para volver a formar la junta o grieta. Los materiales más utilizados para este propósito son la espuma de estireno, la madera aglomerada impregnada con asfalto o tiras de polietileno.

Los inhibidores de adherencia formarán una pared uniforme contra la cual la junta se puede sellar adecuadamente y también aislará el bache de la losa adyacente. Se puede necesitar de un inhibidor plegable para reparar las grietas a lo largo de huecos que existan.

Debe tenerse cuidado en la colocación del material del bache, pues de hacerse contra la losa adyacente puede producirse un apoyo puntual, la fuerza expansiva de la losa adyacente se ejercerá contra el material del bache en lugar de hacerlo contra la pared total de la junta.

Lo anterior puede causar fallas por desprendimientos de agregados o por esfuerzos de compresión puntuales. Para evitar el apoyo puntual, se debe insertar un material compresible en la junta existente antes de que se coloque cualquier material dentro del bache.

El material compresible se debe meter en la junta existente por debajo de la profundidad de reparación. Se recomienda que la inserción del material compresible se extienda lateralmente por lo menos 80 milímetros, más allá de los límites preparados del bache.

3.3.1.7.3 Junta con la berma

Al efectuar una reparación de profundidad parcial a lo largo de la junta del carril con la berma, el borde del bache se debe moldear. Para esto será necesaria la colocación de una pieza delgada de madera aglomerada o de polietileno, a lo largo del borde de la losa, pareja con la superficie y ligeramente más abajo que la profundidad del bache. Si se permite que el material de reparación penetre en la berma, se pueden restringir los movimientos longitudinales, ocasionando daños a la reparación o a la berma.

3.3.1.8 Materiales para la reparación

3.3.1.8.1 Mezclas de concreto de alta resistencia inicial

El concreto de alta resistencia inicial, se hace normalmente con cemento tipo III, y se especifica que desarrolle resistencias que sobrepasen los 21 MPa en menos de 24 horas.

Esto se hace cuando se quiere dar la reparación al servicio rápido, y se debe especificar un adherente epóxico. El concreto no se debe colocar hasta que el epóxico se ponga viscoso.

3.3.1.8.2 Mezclas de concreto de fraguado normal

El concreto de fraguado normal se puede usar cuando el material del bache se puede proteger del tráfico por 24 horas o más. El mortero de arena – cemento usado para la adherencia del bache, debe estar compuesto de: una parte de cemento Pórtland por una parte de arena por volumen, con suficiente agua para producir un mortero con consistencia cremosa.

El concreto se debe colocar en el bache antes de que se seque el mortero; si se seca el mortero antes de colocar el concreto de reparación, se retira por medio de un chorro de arena.

Los baches que usen concreto de fraguado normal, no se deben colocar cuando la temperatura ambiente sea inferior a 5° C. Con temperaturas inferiores a los 13° C puede que se necesite un período de curado más prolongado.

3.3.1.8.3 Materiales de resistencia rápida patentados

Cuando se seleccionen materiales patentados de fraguado rápido, para hacer el bache, es importante que se usen de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Esto incluye la adherencia, la colocación, el curado y el tiempo requerido antes de dar al servicio las reparaciones.

Es de mucha importancia cumplir con los rangos de temperatura recomendados para la aplicación. Algunos de estos materiales son muy sensibles a la temperatura y a los procedimientos constructivos.

3.3.1.8.4 Morteros de resina epóxica y concreto epóxico

Los diseños de mezclas de mortero epóxico y concreto epóxico se deben evaluar en el laboratorio, antes de su uso a gran escala. El catalizador de la resina epóxica se debe acondicionar antes del mezclado. Los componentes epóxicos mezclan cumpliendo con las recomendaciones del fabricante.

El material se debe mezclar en un equipo adecuado hasta que quede homogéneo. Para evitar pérdidas del material, es importante que se mezclen tandas con la cantidad de material que se va a usar en una hora. Si el material mezclado comienza a desarrollar un calor excesivo, se debe descartar.

3.3.1.9 Colocación del material

3.3.1.9.1 Colocación del adherente

Cuando se necesite un agente adhesivo (primera capa o lechada de cemento), el material se debe aplicar en una capa delgada y pareja. Los mejores resultados se obtienen cuando el material se frota sobre la superficie con una brocha de cerda dura. El material debe cubrir toda el área, incluyendo las paredes del bache y debe superponerse a la superficie del pavimento para asegurar una adherencia adecuada.

3.3.1.9.2 Mezclado

En la mayoría de las reparaciones de profundidad parcial, el volumen es muy pequeño. Por lo tanto, los materiales para la reparación se deben mezclar en el sitio; de esta manera se reduce el desperdicio de material mejorando incluso su calidad.

Cuando se requiere de un adherente o de una lechada, el material se debe mezclar en pequeñas tandas, de manera que el desecho no sea excesivo. El tiempo de contacto entre el cemento y el agua, en la lechada, no debe exceder de los 90 minutos.

3.3.1.9.3 Consolidación

La mezcla para el bache se debe colocar y vibrar para su consolidación, con el objeto de eliminar cualquier vacío en el contacto del bache y el concreto existente, esto mejorará la adherencia entre ambas superficies y aumentará la resistencia al corte. Se deben usar vibradores pequeños de inmersión para consolidar el concreto, no se recomiendan vibradores de más de 25 milímetros de diámetro.

Durante la vibración, el área de la reparación debe estar un poco sobrellenada para compensar la consolidación. El vibrador se mueve con lentitud por el área del bache para asegurar una consolidación completa. El vibrador no se debe usar para mover el material del bache, debido a que la experiencia ha demostrado que esto ocasiona segregación en la mezcla. En reparaciones pequeñas, las herramientas de mano serán suficientes para trabajar el material de la reparación y obtener una consolidación adecuada.

3.3.1.9.4 Acabado

El material de la reparación debe tener un acabado cuidadoso con respecto a la sección transversal del pavimento existente. El proceso de acabado recomendado es el de emparejar desde el centro del bache hacia fuera. Esto proporcionará interfaces más parejas con el concreto existente y desarrollará una buena resistencia de adhesión.

3.3.1.9.5 Texturizado

Después del acabado, el bache se debe texturizar adecuadamente para aproximarse al del pavimento existente, produciendo una apariencia más uniforme.

3.3.1.9.6 Cortes con sierra

El mortero sobrante del acabado se puede usar para rellenar los cortes de la sierra que se extiendan más allá del perímetro del bache en las esquinas de éste. El mortero ayudará a evitar la penetración de humedad que puede debilitar la adherencia.

3.3.1.9.7 Sellado

Un procedimiento importante a menudo ignorado en la colocación de reparaciones de profundidad parcial es el sellado de la interfase del bache con la losa. Este procedimiento se emplea en donde se usa material de reparación con base en cemento, e involucra el pintado con una lechada de cemento con agua de 1:1 a lo largo del perímetro del bache.

La lechada formará una barrera contra la humedad sobre la interfase y contribuirá a impedir el deterioro del bache.

3.3.1.9.8 Curado

Los procedimientos de curado en las reparaciones de profundidad parcial son muy importantes, debido a la gran superficie de estas pequeñas reparaciones comparadas con el volumen del material de la reparación.

Esta relación conduce a una gran pérdida de humedad, diferente de la mayoría de los otros usos del concreto. Es probable que los malos procedimientos de curado generen grietas por contracción y el deterioro de la reparación. En general, los procedimientos usados para las reparaciones de profundidad total pueden ser considerados para las reparaciones de profundidad parcial.

Un procedimiento adecuado es el de aplicar un compuesto de curado en los momentos en que el agua de exudación se ha evaporado de la superficie en reparación.

En donde se requiera de una apertura temprana al tránsito, puede resultar beneficiosa la colocación de esteras de aislamiento sobre las reparaciones. Esto mantendrá el calor proveniente de la hidratación y promoverá una mayor ganancia de resistencia para los materiales con base en cemento.

3.3.1.10 Resellado de juntas

Después de que el bache ha adquirido la suficiente resistencia, se puede sellar la junta. El sellado se debe realizar de acuerdo con las recomendaciones tradicionales para este fin. Es importante que las paredes de la junta estén limpias y secas, para lograr un buen comportamiento del material de sello. Son esenciales el aserrado para proporcionar el factor forma adecuado de la junta y el chorro de arena, removiendo la suciedad y restos del aserrado de las paredes de la junta.

El sellado de la junta es muy importante, debido a que contribuirá a evitar que la humedad y los materiales incompresibles puedan causar un daño.

3.3.1.11 Comportamiento en terreno

Cuando se aplican adecuadamente y se construyen con cuidado, las reparaciones de profundidad parcial pueden resultar muy efectivas en cuanto a costo, para el descascaramiento y el deterioro superficial.

De acuerdo con estudios realizados, tanto las mezclas estándar como las mezclas de concreto de alta resistencia inicial, han proporcionado un comportamiento satisfactorio a largo plazo, cuando su uso ha sido el adecuado.

3.3.2 Reparaciones de profundidad total

3.3.2.1 Investigación preliminar

Cuando se decide reparar un pavimento, se debe hacer una investigación de campo y una recopilación de la información que exista sobre la construcción del pavimento. Dicha investigación debe detallar las condiciones en que se encuentra el mismo, incluyendo el agrietamiento de las losas, descascaramiento de las juntas y bombeo. Las áreas que cumplan con los criterios para la reparación, deben ser marcadas.

Las losas, requieren de reparaciones de profundidad total, con el objeto de restaurar la integridad estructural del pavimento. Las grietas activas y las juntas deterioradas, son los problemas más comunes que se dan.

Las principales causas de agrietamiento de las losas son la repetición de cargas pesadas, los esfuerzos térmicos y la pérdida de soporte. El deterioro de las juntas se presenta por las tensiones de compresión excesivas que se generan por la presencia de partículas incompresibles en las juntas.

La pérdida de transferencia de carga debido al excesivo bombeo o al golpeteo de las barras de transferencia de cargas, también pueden producir el deterioro de las juntas. Es esencial que la evaluación preliminar del estado del pavimento o la investigación detallada, se haga pocos días antes de iniciar los trabajos, para determinar con exactitud las áreas que requieren ser reparadas.

3.3.2.2 Marcado de las áreas de remoción

Previo a iniciar cualquier trabajo, se deben definir las áreas que requieren reparación. La ubicación de los lugares que deberán ser removidos se debe marcar con pintura en la superficie del pavimento. Todos los baches deben tener como mínimo las siguientes dimensiones: ancho igual al ancho de un carril en la dirección transversal y de 1.80 a 3.00 metros en la dirección longitudinal.

3.3.2.3 Aislamiento del área a remover

Antes de retirar el concreto deteriorado, el área que se va a remover se debe aislar del concreto adyacente, del carril y de la berma; pues minimizará el daño al material circundante durante las operaciones de remoción.

3.3.2.3.1 Aislamiento del carril y de la berma adyacente

Una sierra con puntas de carburo, o un equipo equivalente, se puede usar para realizar un corte sobre la berma hasta alcanzar los 100 milímetros de ancho, a lo largo del área deteriorada. Esto proporcionará espacio para la colocación de una formaleta para la cara del arreglo con la berma. Un corte limpio, en este sitio, facilitará la remoción del concreto izándolo, minimizando el daño a la berma.

En el caso de tenerse una berma de concreto, la junta longitudinal entre el carril exterior y la berma se debe aserrar usando una hoja de diamante o equivalente. El corte se debe hacer en todo el espesor de la losa y debe cortar las barras de amarre existentes. En esta situación la cara de la berma será usada como formaleta para la colocación del concreto de reparación.

La junta longitudinal, en el centro del pavimento, se debe cortar en todo el espesor de la losa, a lo largo de la junta existente. La profundidad del corte debe asegurar el corte de las barras de amarre existentes.

3.3.2.3.2 Aislamiento transversal

La cantidad y profundidad de los cortes con sierra requeridos en cada límite transversal del área a reparar, variará según el método de remoción seleccionado y del tipo de pared de la junta deseada. Existen dos maneras diferentes de efectuar la remoción y también dos tipos de juntas disponibles.

Tabla XXIII. Métodos de remoción

Método de remoción	Cara de la junta
lizado	Suave
lizado	Áspera
Demolición	Suave
Demolición	Áspera

En general, el aislamiento transversal del área de la reparación del pavimento existente se logra mediante el aserrado a profundidad total, dejando bordes verticales limpios. En época de calor, el equipo para el corte se puede trabar cuando se está cortando en el sentido transversal, en estos casos se recomienda trabajar en la noche, cuando las temperaturas son más bajas y el concreto está contraído.

Otra solución consiste en usar una sierra con puntas de carburo para proporcionar un corte de relajación dentro del área a reparar antes del aserrado de los bordes.

Es recomendable que el corte de la sierra esté a más de 150 milímetros de los límites del área propuesta, debido al daño y a las micro grietas que este tipo de sierra puede producir en el concreto adyacente. Para evitar un daño apreciable a la base, la cuchilla no debe penetrar en ella más de 10 milímetros.

3.3.2.4 Remoción de la losa por izado

Siempre que sea posible se recomienda que el concreto se retire izándolo, esto requiere que, después de que el área de remoción sea aislada con los cortes de la sierra en todo el espesor del pavimento, el concreto deteriorado se iza verticalmente desde su posición en el pavimento. Para hacer esto, se efectúan perforaciones que traspasen la losa desde la parte superior y se ponen ganchos que permitan izar los pedazos de losa, con la ayuda de cadenas que se sujetan a un equipo pesado, como una grúa, luego la losa se iza verticalmente.

En algunos casos, el material que está siendo izado se puede romper, produciendo daños o descascamientos en la parte superior de las losas adyacentes. Cuando esto sucede, se puede requerir de un corte de sierra secundario, con el objeto de evitar un daño mayor.

La remoción del concreto por izado minimizará al daño al concreto circundante y a la base. Las paredes de las juntas transversales serán lisas y no requerirán de mayor trabajo antes de las perforaciones con taladro para la instalación de los dispositivos de transferencia de carga (dovelas).

En general, izando el concreto se pueden retirar más losas y colocar más concreto por hombre/hora que cuando se quiebra el concreto, debido a que se necesita menos mano de obra.

3.3.2.5 Remoción de la losa demoliéndola

La experiencia ha demostrado que éste método puede dañar significativamente la base y, en consecuencia, se necesita una reparación más grande de la base que la que se hace cuando se izan las losas. Sin embargo, es de reconocer que en muchos casos, el concreto puede estar tan deteriorado que el izado no se práctico. En estos casos se puede demoler el concreto, del área que se va a remover, utilizando un martillo neumático, un martillo de caída libre o un ariete hidráulico, retirando luego el material mediante el uso de una retroexcavadora o de herramientas manuales.

Se deben tener consideraciones especiales para el corte del concreto con sierra cuando el pavimento se va a demoler con un ariete hidráulico o con un martillo de caída libre.

3.3.2.5.1 Demoledoras de pavimentos

La demolición de pavimentos por medio de arietes hidráulicos o martillos de caída libre, puede dañar en forma significativa el concreto circundante si no se cumple con las recomendaciones para el aserrado.

Estas indicaciones proporcionan un amortiguador para absorber el impacto proveniente del equipo utilizado para quebrar el pavimento que, generalmente, dañará el concreto circundante.

Se deben hacer cortes de sierra de profundidad total en los bordes, en ubicaciones predeterminadas; además se deben hacer cortes secundarios, de toda la profundidad dentro del área que se va a remover, en forma paralela y aproximadamente a una distancia de 300 milímetros de cada uno de los cortes periféricos. Esto incluye la junta longitudinal existente.

La demolición del concreto debe comenzar en la región central del área de remoción, dentro de los cortes de sierra interiores. Después de triturar el concreto de la zona interior, la altura de caída o la energía de impacto del martillo se deben reducir.

La magnitud de la reducción dependerá de la resistencia del concreto y de la presencia de refuerzos. El martillo se puede usar luego para desprender, con golpes suaves, la región exterior de la losa adyacente, sin causar daño al concreto circundante. Cuando se detectan daños en las losas o en los pedazos de losa remanente, se puede requerir de otro corte con sierra de todo el espesor más allá del área dañada y efectuar un nuevo intento de quiebre, después de otra reducción en la fuerza del impacto del martillo.

Luego de completar la demolición del área a reponer, se puede usar una retroexcavadora o herramientas manuales, para retirar los trozos de concreto.

3.3.2.5.2 Martillos neumáticos

Cuando se usan martillos neumáticos se requiere de un solo corte de sierra por borde. La demolición se debe hacer comenzando desde el centro del área de remoción y continuando hacia los bordes. A medida que el trabajo se acerca a los cortes de sierra de los bordes, se debe usar un martillo neumático más liviano (máximo de 15 kg.) para no dañar el concreto circundante.

Este método de demolición exige un uso intensivo de mano de obra y, generalmente, es más lento que cualquiera de los otros métodos descritos.

3.3.2.6 Preparación del área de reparación

Si se determina que durante la remoción del concreto se ha deteriorado significativamente la base, ésta se debe limpiar y recompactar, retirando cualquier material suelto. A

Cualquier zona de la base en la que se presente material blando, se debe retirar y sustituir con material adecuado. La base, en el área de la reparación, se debe compactar para cumplir con las especificaciones. Cualquier problema de drenaje localizado se debe reparar.

Es importante no desequilibrar el área de la base, excepto cuando sea absolutamente inevitable.

3.3.2.6.1 Transferencia de carga

Sin importar el equipo que se use para la remoción, o la existencia de una pared con superficie áspera para que se dé la transferencia de cargas a través de los agregados, es esencial que las juntas transversales del área reparada, se refuercen con barras de transferencia de cargas, cuando se trate de vías con alto nivel de tránsito. Esto ayuda a asegurar un comportamiento adecuado en términos de transferencia de carga.

El uso de las barras de transferencia se exceptúa en los cortes que se hacen en las brechas para los servicios públicos y en los baches en los pavimentos de bajo volumen de tránsito, por ejemplo en las vías residenciales.

3.3.2.6.1.1 Pavimentos para tránsito pesado

Para los pavimentos con elevado volumen de tráfico de camiones, los estudios han demostrado claramente que las reparaciones hechas sin dovelas se escalonan o asientan, por lo cual se recomienda que se usen en esas circunstancias.

Las dovelas con un diámetro de 31 mm y de 450 mm de largo, han sido los medios más efectivos para desarrollar transferencia de carga a través de las juntas en las áreas reparadas. Sin embargo, con malas prácticas de construcción en el pasado, sumado a una cantidad y tamaño inadecuada de las dovelas, se ha llegado a un rápido escalonamiento de las juntas de las reparaciones y a un mal comportamiento de éstas. El diseño e instalación de las dovelas es un aspecto muy crítico para el éxito de una reparación de profundidad total.

Para anclar las dovelas se hacen perforaciones con taladros en la pared aserrada de la losa existente. Se proponen taladros agrupados, con el objeto de evitar las desviaciones y desalineamientos durante el proceso de perforación.

Mantener la alineación adecuada, en el plano horizontal y vertical, es muy importante para permitir los movimientos libres de expansión y contracción de las áreas reparadas. Los taladros agrupados también aumentarán la productividad, ya que varias perforaciones se pueden hacer al mismo tiempo. Puede ser necesario usar taladros de mano en donde las localizaciones de los agujeros necesitan de un pequeño ajuste. Sin embargo, por lo general, los taladros de mano deben evitarse, debido a la posibilidad de que se presenten desalineamientos de las perforaciones.

A pesar de la diversidad de reparaciones que se han realizado usando diferente número de dovelas en cada junta, la información obtenida sobre el comportamiento de las reparaciones no son concluyentes para establecer criterios de diseño. Sin embargo, se recomienda que se usen por lo menos cuatro o cinco dovelas en las zonas en que han de pasar las llantas de los vehículos.

A medida que una rueda pasa sobre la junta, se producen tensiones de flexión en cada dovela. Cuando se usan menos de cuatro dovelas, o el diámetro de la barra es inadecuado, las tensiones de flexión llegan a ser tan altas que se producirá la ampliación de los agujeros en donde se encuentran las dovelas y luego el concreto se puede quebrar.

El tamaño y la cantidad de dovelas se deben estimar en base al espesor de la losa, tipo de base y de sub rasante, condiciones de drenaje y tráfico esperado. El diámetro recomendado para las dovelas, es de 30 milímetros como mínimo y de 38 milímetros como máximo.

Las dovelas no se deben insertar en agujeros sucios y sin reparar. Cuando los agujeros han sido taladrados, se debe emplear aire comprimido, para remover el polvo y los desechos. Después de limpiar los agujeros y antes de la inserción de las dovelas se debe hacer, en la parte posterior del agujero, una aplicación de pintura epóxica o de un mortero que no se contraiga.

Es importante que el material se introduzca hasta el fondo del agujero, de manera que se fuerce hacia delante durante la inserción de las dovelas. Esto asegurará que el material de anclaje cubra la dovela a todo lo largo.

Otro modo para asegurar que el material epóxico o el mortero rodeen completamente la dovela, es la de girarla por lo menos una vuelta completa en la inserción. Se recomienda un disco de retención de mortero, de plástico, para mantener el material dentro del agujero durante la inserción de la dovela. El disco es efectivo para asegurar que la barra de refuerzo está completamente rodeada por el mortero o el material epóxico de anclaje, debido a que el material no puede salir por la parte frontal del agujero. Cuando se usa, el disco ayuda a encajar la dovela, evitando el desarrollo de deformaciones del agujero.

Cuando la reparación involucra la restauración de juntas, se debe tener un cuidado especial para asegurar el alineamiento adecuado de las barras de refuerzo en la pared de la junta para permitir los movimientos de la losa. Después de insertar las dovelas, se procede a vaciar el concreto.

3.3.2.6.1.2 Pavimentos de poco tráfico y cortes para brechas

En pavimentos para bajos volúmenes de tráfico y con poca presencia de camiones pesados, como es el caso de las áreas residenciales y calles locales, se puede prescindir de las dovelas en las reparaciones de profundidad total, sin que se comprometa el comportamiento de la reparación. Sin embargo, cuando se reparan éstas zonas se deben seguir ciertos lineamientos.

A menudo se requiere de la remoción de profundidad total en las vías locales para la instalación o reparación de redes de servicio público.

Es importante que las delimitaciones de las áreas que es necesario intervenir, se planeen cuidadosamente y en estos casos no se aplica el requisito de que el ancho de la reparación debe ser igual al ancho del carril.

El tamaño de la reparación estará determinado por el trabajo que se requiera hacer debajo del pavimento. Se recomienda que el área removida del concreto se extienda por lo menos 200 milímetros más allá de la excavación planificada, esencialmente para generar un borde limpio en la sub rasante existente.

La función de este borde consiste en asegurar que la sub rasante bajo el concreto existente no se altere, en el caso de que eso suceda, se necesitará hacer un relleno en el vacío bajo el pavimento existente, lo que, eventualmente, podría conducir a la pérdida de soporte y a un problema de bombeo en la junta de la reparación.

La junta de la reparación no se debe construir a una distancia menor que 500 milímetros de una junta existente, es preferible usar éstas.

La profundidad de los cortes de la sierra, para hacer los bordes, no debe ser de profundidad total. Más bien, el corte de sierra se debe extender hasta la profundidad de la futura caja sellada de la junta o máximo $1/3$ del espesor nominal de la losa. Se requerirá de la técnica de doble hoja de aserrado, para izar las losas de éstas áreas.

Un corte de sierra sencillo también se puede hacer en los bordes del área en la que se va a remover el concreto con martillo neumático. Sin embargo, a medida que el astillado se aproxima al corte de sierra del borde, se debe usar un martillo neumático más liviano para evitar el daño al concreto circundante. Al aserrar la losa en forma parcial y golpear con martillo neumáticos livianos, las paredes de las juntas del bache deben quedar ásperas e irregulares proporcionando el máximo de trabazón del agregado para la transferencia de carga.

Es muy importante que el astillado por debajo del corte de sierra, se extienda en forma casi vertical y nunca se socave la pared existente de la junta, si esto ocurre, la transferencia de carga será mala y el potencial para el asentamiento de la reparación aumenta enormemente.

Es importante que se tenga una preparación y compactación adecuada del relleno de la excavación, bajo el área de reparación, con el objeto de evitar futuros asentamientos. Esto puede eliminar la posibilidad de rellenar con la tierra retirada durante la excavación inicial, especialmente si es un suelo de grano fino. Un agregado seleccionado de relleno o un suelo tratado con cemento facilitará una compactación adecuada.

Existen materiales fluidos que pueden proporcionar un relleno sin la necesidad de la compactación. Estos materiales generalmente se mezclan en una planta de mezclas y están hechos de agregados (arena), cemento, ceniza volante y agua. Se usa muy poco cemento, de manera que la resistencia a compresión típica del material a los 28 días, esté entre 0.35 y 0.7 MPa.

La ventaja de éste material es que fluye con facilidad para rellenar el área excavada, proporciona la suficiente resistencia para evitar el asentamiento y puede ser retirado con facilidad usando equipo estándar, si se requiere de una nueva excavación en el área.

Se debe tener cuidado en caso de rellenar con materiales fluidos, para evitar que el relleno fluido pueda levantar y alterar el alineamiento de las redes de servicios.

Debe de usarse un relleno en dos fases en donde fase crea una capa de profundidad parcial de relleno fluido bajo las redes de servicios.

3.3.2.7 Vaciado del concreto

En la mayoría de los casos, cuando la apertura al tráfico del pavimento es un aspecto crítico, el concreto se debe vaciar tan pronto como sea posible después de que las dovelas estén instaladas y la sub base preparada. Bajo estas condiciones, es necesario usar concreto de alta resistencia temprana.

Para dicho fin, es común que se haga un diseño de mezcla especial que emplee un cemento tipo 3 o cloruro de calcio como acelerante, para lograr un concreto de alta resistencia inicial. Se debe mantener una baja relación agua-cemento. También están disponibles diversos materiales de fórmula patentada que proporcionan una ganancia de resistencia temprana y pueden permitir una pronta apertura al tráfico,

La apertura al tráfico se debe definir con base en la resistencia que tenga el concreto. En algunas partes se permite una apertura rápida, entre 4 y 8 horas después de vaciado el concreto. Los diseños de mezclas típicos para los concretos de alta resistencia, requieren de una resistencia a compresión de 21 MPa en 24 horas.

Para obtener el mejor resultado en una reparación, es muy importante la colocación, incluyendo la vibración para la consolidación y el acabado adecuado del concreto.

Las superficies de las reparaciones se deben terminar con un codal de 3 m o con una regla vibratoria, para dar los mismos niveles de la superficie existente. Según experiencias anteriores, se ha demostrado que las mejores reparaciones han sido aquellas en las que el acabado se hace usando una regla vibratoria paralela a la línea central del pavimento.

El texturizado debe ser también similar al del pavimento circundante, con el objeto de lograr que los vehículos circulen de la misma manera que en el pavimento existente.

Cuando se ha concluido con el vaciado y el texturizado del concreto, se debe proceder a aplicar un compuesto de curado pigmentado. El compuesto de curado debe cubrir todo el concreto nuevo, para evitar la pérdida de humedad.

Cuando hay que abrir rápidamente, el pavimento reparado, al tráfico, se pueden poner cubiertas de aislamiento encima de ellos durante el curado, las cuales aumentan la temperatura del concreto, acelerando la ganancia de resistencia; de esta manera se acortará el período previo a la apertura del tráfico. El uso de cubiertas de aislamiento dependerá del material y del clima.

3.3.2.8 Sellado de juntas

El último trabajo para concluir con una buena reparación de pavimentos de concreto en todo su espesor, consiste en hacer la caja para alojar el material del sello en las juntas, tanto longitudinales como transversales. Se ha demostrado que las cajas de las juntas adecuadamente formadas, o aserradas, disminuyen en forma considerable la cantidad de descascamientos en las juntas de las reparaciones.

Es muy importante sellar las juntas longitudinales, para reducir la posibilidad de introducción de materiales incompresibles y de agua. Se recomienda que la profundidad de la caja tenga 50 milímetros como mínimo, para evitar puntos de concentración de esfuerzos en la parte superior de la superficie.

El ancho y la profundidad de la caja (factor de forma), se deben diseñar teniendo en cuenta la separación de las juntas y el tipo de sello.

En la junta longitudinal se debe insertar una lámina incompresible, como podría ser una lámina de fibra, con el objeto de prevenir la adherencia de los concretos de la reparación con los circundantes y así evitar posibles descascamientos.

3.3.2.9 Comportamiento en el campo

El propósito de las reparaciones de profundidad total, es la reconstrucción de áreas deterioradas y la restauración de la integridad completa del pavimento. Para lograr su máxima eficiencia, una reparación de profundidad total debe tener una duración tan larga como la de las losas a su alrededor. Cuando los baches se diseñan y construyen bien, pueden devolver la integridad al pavimento y a la vez proporcionar una buena superficie de rodadura.

Se conocen diversos factores que afectan el comportamiento de las reparaciones a profundidad total como lo son:

- Dimensiones de la reparación.
- Método de remoción.
- Condiciones de drenaje.
- Diseño de la transferencia de carga (cantidad y tamaño de las dovelas).
- Materiales que están en la reparación (dovelas, mortero o epóxico, concreto, sellante).
- Tráfico.
- Condiciones de construcción y control de calidad.

Para asegurar un buen comportamiento de las reparaciones, se deben tener en cuenta los factores anteriores, además de buscar condiciones de construcción adecuadas, un control de calidad apropiado e incluso un excelente diseño.

3.3.3 Fallas

Las fallas, en los pavimentos rígidos, se deben principalmente a dos causas; la primera se debe a las deficiencias de la propia losa debido, por un lado, al concreto utilizado, haciendo referencia a los materiales y agregados; por otro lado se tienen los defectos estructurales de la losa, como podrían ser la mala colocación, insuficiente dotación de elementos de transmisión de carga, insuficiente resistencia ante las restricciones de fricción impuestas a los movimientos de la losa por la sub base, alabeo de las losas o mal comportamiento de las juntas de contracción o expansión.

Otra causa de falla, en los pavimentos rígidos, se refiere al inadecuado comportamiento estructural del conjunto de losa, sub base, sub rasante y aún terracería y terreno de cimentación. De este tipo son las fallas por bombeo, la distorsión general, la ruptura de esquinas o bordes, por falta del apoyo necesario y otras del mismo estilo.

Frecuentemente las fallas obedecen a una combinación de causas, antes que a una sola, de manera que los problemas de diagnóstico y corrección se hacen complicados. El uso de agregados inapropiados, no duraderos, se traduce en la aparición de grietas que comienzan por ser capilares, muy próximas y que se desarrollan con trayectorias semicirculares en torno a juntas o a los bordes de las losas; el fenómeno es progresivo y suele terminar con la desintegración total de la losa.

Otras causas de falla, que intervienen en la desintegración del concreto son su fabricación con mezclas con alto contenido de humedad, el uso de agregados con alto contenido de finos o los problemas comentados anteriormente. Durante el período de curado, los concretos sufren a veces agrietamientos excesivos por contracción; las grietas típicas de éste estilo son cortas y distribuidas al azar sobre la superficie de la losa, tanto en dirección longitudinal como en la transversal.

Los agrietamientos causados por trabajo defectuoso de los pasa-juntas son debidos casi siempre a que estos elementos quedan mal lubricados y no permiten el movimiento para el que fueron diseñados.

El mal funcionamiento de juntas es otra causa de problemas, ya sea por la falta de éstas o el espaciamiento inadecuado en un trecho importante del pavimento. Naturalmente el concreto crea, por agrietamiento, sus propias juntas de contracción y expansión, surgiendo las mismas a espaciamientos irregulares, que generalmente no corresponde a una verdadera deficiencia estructural, en el sentido de que las grietas formadas liberan los esfuerzos y trabajan, en principio, como verdaderas juntas; este comportamiento puede no ser tan satisfactorio a largo plazo, pues las grietas naturales carecen de todo tratamiento o de los rellenos plásticos apropiados, de manera que en ellas el concreto se va disgregando, pulverizando y ejerciendo una acción auto-abrasiva que puede llegar a agrandar las grietas más allá de lo conveniente, pudiendo llegar a presentarse en ellas, fenómenos de bombeo.

Naturalmente la insuficiencia de espesor de las losas, conduce a su agrietamiento bajo la acción del tránsito. De los fenómenos en que se ve envuelto el material de la sub base, ya se ha mencionado el bombeo, que es el más importante.

Conduce a la destrucción de las losas, sobre todo en zonas de esquina. En las losas de borde pueden desarrollarse agrietamientos más o menos paralelos al mismo, cuando el material de los hombros genera importantes restricciones al movimiento de las losas por fricción, lo que es común cuando dicho material es arenoso.

Los movimientos del terreno de cimentación o de espesores importantes del material de terracería compresible, conducen al agrietamiento de las losas cuando los asentamientos diferenciales son importantes en trechos cortos y ocurren con rapidez. De todas maneras, la experiencia indica que la flexibilidad de los pavimentos rígidos ante estos problemas es bastante mayor de lo que generalmente se piensa.

También es relativamente común que las grietas, que por esta causa se puedan llegar a producir, no lleguen a plantear graves deficiencias en el funcionamiento del pavimento, especialmente si se van sellando apropiadamente, a medida que se producen.

3.3.3.1 Grietas por adición de aguas

Los integrantes de las cuadrillas de tendido y acabado acostumbran adicionar agua a la superficie del concreto, para facilitar su acabado. Si el concreto no permite buen acabado, debe dosificarse su dosificación.

3.3.3.2 Abultamientos por mal acabado

Para el perfecto acabado del pavimento, de manera que su superficie quede plana, sin abultamientos, debe contarse con la herramienta adecuada para lograr una superficie completamente plana.

Este defecto puede apreciarse colocando una regla sobre la superficie y midiendo las irregularidades, o en la noche, con la luz de un vehículo, proyectar las sombras de esos abultamientos.

3.3.3.3 Superficie antiderrapante

El pavimento de concreto debe tener una superficie antiderrapante. Al terminar su superficie debe escobillarse adecuada y oportunamente para provocar esos pequeños surcos antiderrapantes.

3.3.3.4 Sangrado

Cuando el concreto está mal dosificado, por inadecuada relación agregados – lechada, o mala relación grava – arena, o por cemento muy grueso, al acabar la superficie del pavimento, se acumula exceso de agua o lechada muy pobre, la cual se desprende del pavimento al usarlo los vehículos, dejando áreas de grava expuesta. Esto, que es molesto a la vista, tiene consecuencias de poca resistencia del pavimento, por lo que al presentarse, de inmediato debe corregirse la dosificación o cambiar el cemento.

3.3.3.5 Deficiente curado

El concreto alcanza el 80% de su resistencia durante la primera semana de edad. Este es el período altamente crítico, en el cual el concreto no debe secarse o perder el agua que necesita el cemento para hidratarse. En esta semana el concreto debe protegerse del agua o con una cubierta húmeda o aplicándole una membrana que impida la evaporación del agua. Nunca se exagerará demasiado sobre la necesidad de curar el concreto cuando menos los primeros 8 a 10 días.

Basta mencionar que la omisión de éste curado provoca la pérdida de hasta el 50% de la resistencia potencial del concreto. Hay grados de defecto de curado, que harán que el concreto no pierda ese porcentaje, pero cualquier falta de él disminuye la resistencia posible del concreto.

3.3.3.6 Compactación inadecuada del concreto

El concreto atrapa mucho aire microscópico y al colocarlo en su lugar, debe eliminarse ese aire, que provocaría huecos o pequeñas cavernas, fuente de inicio de fallas estructurales. Por eso se acostumbra vibrar el concreto para eliminar ese aire atrapado, que no debe confundirse con el aire incluido, que sí beneficia al concreto.

Una vez extendido el concreto, se pasa una regla vibratoria, que en losas delgadas tiene un espesor máximo de 18 centímetros, la función de ésta es compactar y expulsar el aire atrapado en ese espesor. Las orillas de las losas se deben vibrar aparte usando un vibrador de chicote.

El defecto de falla de compactación sólo se puede observar sacando corazones del concreto endurecido; este defecto causa disminución de la resistencia del pavimento.

3.3.3.7 Desportillamiento de losas

Los integrantes de las cuadrillas de pavimentación, por descuido e irresponsabilidad, al quitar las cimbras de las losas, desprenden concreto de las orillas que no vuelve a adherirse al resto de la losa, provocando un defecto que puede iniciar la fractura de la misma, por el agua o materiales que la penetran.

3.3.3.8 Grietas plásticas

Son las que aparecen en la superficie del concreto, a unas horas de terminado el pavimento, cuando el cemento está en la etapa de fraguado final y el concreto esta relativamente plástico. Son grietas de poca longitud, poca profundidad y angostas capilares. Se producen porque la superficie del concreto se seca por falta de protección a la evaporación. El curado oportuno evita la formación de esas grietas, aunque en tiempo de vientos fuertes, se necesita mayor cuidado que el simple curado. Las grietas no tienen importancia para el comportamiento estructural del pavimento. Generalmente se sellan y cierran con el efecto del tránsito, quedando sólo la apariencia desagradable de su huella; son grietas de fallas funcionales leves.

3.3.3.9 Grietas duras o estructurales

De estas grietas, que se producen cuando el concreto está duro o resistente, se pueden distinguir las siguientes:

3.3.3.10 Grietas duras por contracción del concreto

Se producen cuando al enfriarse y secarse el concreto, se contrae y no tiene suficiente resistencia para sostener estos esfuerzos de tensión, agrietándose la losa, tanto longitudinal como transversalmente. Como por lo general se construye una junta longitudinal al tiempo del colado, queda en sentido transversal, que si no se ha introducido a tiempo una junta o provocando un debilitamiento de la sección transversal, la losa se corta totalmente, a unos 4 metros de distancia de una junta previa o de otra grieta. En esta grieta, como se explicó, no interviene el efecto de las cargas de los vehículos y, el daño posterior del pavimento, no es fácil de predecir.

3.3.3.11 Grietas duras por deficiencia estructural de la losa

Corresponden a un mal diseño, con un espesor menor del conveniente, una resistencia baja, ya sea por suponer una resistencia inferior a la adecuada, o por elaborar un concreto con menor resistencia de la necesaria.

Estas grietas son provocadas por el efecto del tránsito sobre un pavimento sub diseñado. La única manera de salvar un pavimento así, es reforzarlo colocándole otra losa encima o una gruesa carpeta asfáltica de 7 centímetros de espesor.

3.3.3.12 Grietas duras por bombeo de la sub rasante

En tiempo de lluvias, en suelos finos muy saturados, el intenso tránsito de vehículos pesados, hace un efecto de bombeo con la losa y el suelo saturado, eyectando ese líquido con suelo fino a través de grietas y juntas mal selladas, socavando el apoyo de la losa, provocando la grieta por fractura de ella. Para evitar esta falla, se ha recurrido al empleo de una capa sub base de suelo granular, que no se bombea con el tránsito.

El uso de sub bases de suelo-cemento se ha generalizado tanto que, en algunas partes, ya es obligatorio, no sólo para evitar el bombeo, sino que para proporcionar mayor resistencia a la sub rasante, y el módulo de reacción determinado sobre esta sub base de suelo-cemento, es mucho más elevado que el de la sub rasante.

Para corregir tal defecto, se han hecho intentos de inyectar mortero adecuado a la socavación provocada, desde luego a un alto costo.

3.3.3.13 Grietas duras por deficiente compactación de la terracería

Incluyendo la sub rasante; esta falla, increíble que se pueda presentar, es provocada por la irresponsabilidad de los ingenieros y encargados de la construcción de las terracerías, en terraplenes y sobretodo en aquellos lugares en donde se excava la terracería para construir un colector y en seguida, sin la debida compactación, se inicia la pavimentación de alguna calle o avenida. Todas estas grietas dañan considerablemente el pavimento.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

4.1 Introducción

En este capítulo, se realizará un análisis comparativo de costos entre los proyectos:

- Construcción ruta RN-13 tramo Génova - caballo blanco
- Ampliación CA-9-Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia

Los cuales se encuentran en ejecución actualmente. Para llevar a cabo el estudio comparativo de costos entre el pavimento flexible y el pavimento rígido, se tomaron en cuenta únicamente los costos de ejecución de los proyectos mencionados anteriormente.

Es así como se analizará la realización de los proyectos, con cada pavimento determinado; obteniéndose el costo total de ejecución de cada proyecto y por consiguiente, concluyendo con la mejor alternativa.

4.2 Especificaciones

4.2.1 Proyecto Construcción ruta RN-13 tramo Génova - Caballo Blanco

- Longitud del proyecto : 19 kilómetros
- Diseño en base a la sección típica E (modificada)

- Ancho total de 7 metros
 - ✓ En el caso del pavimento flexible
 - Ancho de terracería de 8.50 metros.
 - Bombeo de 3%
 - Reacondicionamiento de sub rasante : se reacondicionará la sub rasante existente, escarificando 0.20 centímetros según el libro azul.
 - Espesor de capa sub base de 0.20 metros, según diseño y especificaciones del libro azul.
 - Espesor de capa de base de 0.20 metros, según diseño y especificaciones del libro.
 - Capa de rodadura de concreto asfáltico en caliente, según diseño y especificaciones de la DGC, 10 centímetros de espesor, en un ancho total de 7 metros.
 - ESAL (ejes equivalentes a 18,000 lbs) = 689,000
 - ✓ En el caso del pavimento rígido
 - Ancho de terracería de 8.50 metros.
 - Bombeo de 2%
 - Reacondicionamiento de sub rasante : se estabilizara la sub rasante existente con cal, con un porcentaje del 6% en peso de la parte de arcilla, escarificando 0.15 centímetros.
 - Espesor de capa de base de 0.15 metros triturada según diseño y especificaciones del libro azul, con un porcentaje de finos no mayor de 6.0% que pasa el tamiz 200, protegida con una capa de imprimación de MC-70 con densidad de riego de 0.30gl/m²

- Capa de rodadura de concreto hidráulico con resistencia a flexo - tracción de 45 kg/cm² con 80% de nivel de confianza a 28 días, con 15 centímetros de espesor, en un ancho total de 7.00 metros.
 - ESAL (ejes equivalentes a 18,000 lbs) = 1,721,320
 - Juntas de contracción : losas cortas de 1.75 X 1.75 metros.
- ✓ Para ambos pavimentos se trabajaron los siguientes parámetros:
- Período de diseño de 15 años
 - Confiabilidad = 85%
 - Serviciabilidad inicial = 4.2
 - Serviciabilidad final = 2.5

4.2.2 Proyecto Ampliación CA – 9 - Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia

- Longitud del proyecto : 10 kilómetros
- Diseño en base a la sección típica A
- Dos pistas de 7.20 metros cada una
 - ✓ En el caso del pavimento flexible
 - Sub base : 20 centímetros
 - Base : 20 centímetros
 - Capa de concreto asfáltico en caliente : 16 centímetros
 - ✓ En el caso del pavimento rígido
 - Sub base : 20 centímetros
 - Base : 20 centímetros
 - Capa de concreto hidráulico : 20 centímetros
 - Juntas de contracción : losas cortas de 1.80 X 1.80 metros.

4.3 Renglones de costos unitarios

4.3.1 Integración de costos unitarios para el Pavimento Flexible

La integración de costos para un Pavimento Flexible, se resume de la siguiente manera:

Tabla XXIV. R. 1 Reacondicionamiento de la sub rasante

Rendimiento	1500	m ² /día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Patrol	8,00	Q395,00	Q6.320,00
1	Rodo vibratorio	8,00	Q250,00	Q2.000,00
1	Camión cisterna de 2000 Gls.	8,00	Q140,00	Q1.120,00
			TOTAL	Q9.440,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Operadores de patrol	8,00	Q30,00	Q480,00
1	Operador de rodo	8,00	Q24,00	Q192,00
1	Operador de cisterna	8,00	Q23,00	Q184,00
4	Peones	8,00	Q8,00	Q256,00
1	Topógrafo	8,00	Q20,00	Q160,00
4	Cadeneros	8,00	Q13,00	Q416,00
			TOTAL	Q1.688,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q84,40
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
			TOTAL	Q0,00
Total costo directo				Q1.772,40
Costos indirectos (49%)				Q868,48
Equipo:				Q9.440,00
Total Parcial:				Q12.080,88
IVA			12,00%	Q1.449,71
Total por día:				Q13.530,58
TOTAL POR			m ²	Q9,02

Tabla XXV. R. 2 Capa de sub base

Rendimiento:	280	m ³ /día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Patrol	8,00	Q395,00	Q6.320,00
1	Rodo vibratorio	8,00	Q250,00	Q2.000,00
1	Camión cisterna de 2000 Gls	8,00	Q140,00	Q1.120,00
3	Camión de volteo	8,00	Q140,00	Q3.360,00
			TOTAL	Q12.800,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Operador de patrol	8,00	Q30,00	Q480,00
1	Operador de rodo	8,00	Q24,00	Q192,00
1	Operador de cisterna	8,00	Q23,00	Q184,00
4	Peones	8,00	Q8,00	Q256,00
1	Topógrafo	8,00	Q20,00	Q160,00
2	Cadeneros	8,00	Q13,00	Q208,00
1	Laboratorista	8,00	Q20,00	Q160,00
1	Ayudante de laboratorista .	8,00	Q14,00	Q112,00
			TOTAL	Q1.752,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q87,60
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
280	Mat. de sub base	m ³	25,00	Q7.000,00
			TOTAL	Q7.000,00
Total costo directo				Q8.839,60
Costos indirectos (49%)				Q4.331,40
Equipo:				Q12.800,00
Total Parcial:				Q25.971,00
IVA			12,00%	Q3.116,52
Total por día:				Q29.087,52
TOTAL POR			m ³	Q103,88

Tabla XXVI. R. 3 Capa de base granular

Rendimiento:	280	m ³ /día		
Fecha:	Oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Patrol	8,00	Q395,00	Q6.320,00
1	Rodo Vibratorio	8,00	Q250,00	Q2.000,00
1	Camión cisterna de 2000 Gls	8,00	Q140,00	Q1.120,00
3	Camión de volteo	8,00	Q140,00	Q3.360,00
			TOTAL	Q12.800,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Operadores de patrol	8,00	Q30,00	Q480,00
1	Operador de rodo	8,00	Q24,00	Q192,00
1	Operador de cisterna	8,00	Q23,00	Q184,00
4	Peón	8,00	Q8,00	Q256,00
1	Topógrafo	8,00	Q20,00	Q160,00
2	Cadenero	8,00	Q13,00	Q208,00
1	Laboratorista	8,00	Q20,00	Q160,00
1	Ayudante de laboratorista.	8,00	Q14,00	Q112,00
			TOTAL	Q1.752,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q87,60
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
280	Mat. de base	m ³	Q125,00	Q35.000,00
			TOTAL	Q35.000,00
Total costo directo				Q36.839,60
Costos indirectos (49%)				Q18.051,40
Equipo:				Q12.800,00
Total Parcial:				Q67.691,00
IVA			12,00%	Q8.122,92
Total por día:				Q75.813,92
TOTAL POR			m³	Q270,76

Tabla XXVII. R. 4 Riego de imprimación

Rendimiento:	420	Gls./día
Fecha:	oct-07	

EQUIPO

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Camión regador de asfalto	8,00	Q200,00	Q1.600,00
1	Camión de volteo	8,00	Q140,00	Q1.120,00
			TOTAL	Q2.720,00

MANO DE OBRA

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operador de camión regador	8,00	Q30,00	Q240,00
2	Ayudantes camión regador	8,00	Q24,00	Q384,00
1	Laboratorista	8,00	Q20,00	Q160,00
1	Operador camión de volteo	8,00	Q22,00	Q176,00
4	Ayudante camión de volteo	8,00	Q20,00	Q640,00
			TOTAL	Q1.600,00

HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)		Q80,00
--	--	---------------

MATERIALES

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
420	RC	gls.	Q14,00	Q5.880,00
4,2	Secante	m ³	Q50,00	Q210,00
			TOTAL	Q6.090,00

Total costo directo		Q7.770,00
Costos indirectos (49%)		Q3.807,30
Equipo:		Q2.720,00
Total Parcial:		Q14.297,30
IVA	12,00%	Q1.715,68
Total por día:		Q16.012,98
TOTAL POR	gls.	Q38,13

Tabla XXVIII. R. 5 Riego de liga

Rendimiento:	252	gls/día
Fecha:	oct-07	

EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Camión regador de asfalto	8,00	Q200,00	Q1.600,00
			TOTAL	Q1.600,00

MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operador de camión regador	8,00	Q30,00	Q240,00
2	Cadenero	8,00	Q13,00	Q208,00
			TOTAL	Q448,00

HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q22,40
--	--	--	--	---------------

MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
252	Emulsión	gls.	Q14,00	Q3.528,00
			TOTAL	Q3.528,00

Total costo directo		Q3.998,40
Costos indirectos (49%)		Q1.959,22
Equipo:		Q1.600,00
Total Parcial:		Q7.557,62
IVA	12,00%	Q906,91
Total por día:		Q8.464,53
TOTAL POR	gls.	Q33,59

Tabla XXIX. R. 6 Concreto asfáltico en caliente

Rendimiento:	504	ton/día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Extendedora (finisher)	8,00	Q600,00	Q4.800,00
4	Camión de volteo	8,00	Q140,00	Q4.480,00
1	Rodo liso	8,00	Q140,00	Q1.120,00
			TOTAL	Q10.400,00

MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operador extendedora	8,00	Q27,00	Q216,00
2	Ayudante de extendedora	8,00	Q16,00	Q256,00
4	Operador camión de volteo	8,00	Q22,00	Q704,00
8	Peón	8,00	Q8,00	Q512,00
1	Operador de rodo	8,00	Q24,00	Q192,00
1	Topógrafo	8,00	Q20,00	Q160,00
2	Cadenero	8,00	Q13,00	Q208,00
1	laboratorista	8,00	Q20,00	Q160,00
1	Ayudante de laboratorista.	8,00	Q14,00	Q112,00
			TOTAL	Q2.520,00

HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				126,00
--	--	--	--	---------------

MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
504	Concreto asfáltico	ton	Q200,00	Q100.800,00
			TOTAL	Q100.800,00

Total costo directo		Q103.446,00
Costos indirectos (49%)		Q50.688,54
Equipo:		Q10.400,00
Total Parcial:		Q164.534,54
IVA	12,00%	Q19.744,14
Total por día:		Q184.278,68
TOTAL POR	ton	Q365,63

Tabla XXX. R. 7 Cemento asfáltico para concreto asfáltico AC-20

Rendimiento:	3024	Gls./día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Camión regador de asfalto	8,00	Q200,00	Q1.600,00
			TOTAL	Q1.600,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operador de camión regador	8,00	Q30,00	Q240,00
			TOTAL	Q240,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q12,00
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
3024	MC 70	Gls.	Q15,00	Q45.360,00
			TOTAL	Q45.360,00
Total costo directo				Q45.612,00
Costos indirectos (49%)				Q22.349,88
Equipo:				Q1.600,00
Total Parcial:				Q69.561,88
IVA			12,00%	Q8.347,43
Total por día:				Q77.909,31
TOTAL POR			gls.	Q25,76

4.3.2 Integración de costos para un Pavimento Rígido

La integración de costos para un Pavimento Rígido, se resume de la siguiente manera:

Tabla XXXI. R. 8 Estabilización con cal

Rendimiento:	1400	m ² /día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Patrol	8,00	Q395,00	Q3.160,00
1	Camión cisterna de 2000 Gls.	8,00	Q140,00	Q1.120,00
1	Rodo vibratorio	8,00	Q250,00	Q2.000,00
			TOTAL	Q6.280,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operadores de patrol	8,00	Q30,00	Q240,00
1	Operador de cisterna	8,00	Q23,00	Q184,00
1	Operador de rodo	8,00	Q24,00	Q192,00
4	Peón	8,00	Q8,00	Q256,00
			TOTAL	Q872,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q43,60
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
			TOTAL	Q0,00
Total costo directo				Q915,60
Costos indirectos (49%)				Q448,64
Equipo:				Q6.280,00
Total Parcial:				Q7.644,24
IVA			12,00%	Q917,31
Total por día:				Q8.561,55
TOTAL POR			m²	Q6,12

Tabla XXXII. R. 9 Cal

Rendimiento:	7900	kg./día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HOA.	SUB-TOTAL
1	Camión para acarreo	3,00	Q130,00	Q39,00
			TOTAL	Q390,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operador de camión acarreo	3,00	Q22,00	Q66,00
4	Peón	3,00	Q8,00	Q96,00
			TOTAL	162,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q8,10
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
7900	Cal	kg.	Q1,40	Q11.060,00
			TOTAL	Q11.060,00
Total costo directo				Q11.230,10
Costos indirectos (49%)				Q5.502,75
Equipo:				Q390,00
Total Parcial:				Q17.122,85
IVA			12,00%	Q2.054,74
Total por día:				Q19.177,59
TOTAL POR		kg.		Q2,43

Tabla XXXIII. R. 10 Capa de base granular

Rendimiento:	280	m ³ /día
Fecha:	oct-07	

EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Patrol	8,00	Q395,00	Q6.320,00
1	Rodo vibratorio	8,00	Q250,00	Q2.000,00
1	Camión cisterna de 2000 Gls	8,00	Q140,00	Q1.120,00
3	Camión de volteo	8,00	Q140,00	Q3.360,00
TOTAL				Q12.800,00

MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Operador de patrol	8,00	Q30,00	Q480,00
1	Operador de rodo	8,00	Q24,00	Q192,00
1	Operador de cisterna	8,00	Q23,00	Q184,00
4	Peón	8,00	Q8,00	Q256,00
1	Topógrafo	8,00	Q20,00	Q160,00
2	Cadenero	8,00	Q13,00	Q208,00
1	Laboratorista	8,00	Q20,00	Q160,00
1	Ayudante de laboratorista.	8,00	Q14,00	Q112,00
TOTAL				Q1.752,00

HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)	Q87,60
--	---------------

MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
280	Mat. de base	m ³	Q125,00	Q35.000,00
TOTAL				Q35.000,00

Total costo directo		Q36.839,60
Costos indirectos (49%)		Q18.051,40
Equipo:		Q12.800,00
Total Parcial:		Q67.691,00
IVA	12,00%	Q8.122,92
Total por día:		Q75.813,92
TOTAL POR	m³	Q270,76

Tabla XXXIV. R. 11 Hechura de mezcla (concreto 4000 PSI)

Rendimiento:	420	m ³ /día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Planta central	8,00	Q500,00	Q4.000,00
1	Cargador	8,00	Q340,00	Q2.720,00
1	Equipo de laboratorio	8,00	Q20,00	Q160,00
			TOTAL	Q6.880,00

MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Encargado de planta	8,00	Q40,00	Q320,00
1	Operador de planta central	8,00	Q29,00	Q232,00
1	Ayudante de planta	8,00	Q16,00	Q128,00
1	Laboratorista	8,00	Q20,00	Q160,00
2	Ayudante de laboratorista	8,00	Q14,00	Q224,00
1	Operador de cargador	8,00	Q25,00	Q200,00
			TOTAL	Q1.264,00

HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q63,20
--	--	--	--	---------------

MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
11	Cemento	saco	Q45,00	Q495,00
0,84	Ag. Grueso	m ³	Q170,00	Q142,80
0,42	Ag. Fino	m ³	Q140,00	Q58,80
0,25	Aditivos	gls.	Q210,00	Q52,50
			TOTAL	Q314.622,00

Total costo directo		Q315.949,20
Costos indirectos (49%)		Q154.815,11
Equipo:		Q6.880,00
Total Parcial:		Q477.644,31
IVA	12,00%	Q57.317,32
Total por día:		Q534.961,62
TOTAL POR	m³	Q1.273,72

Tabla XXXV. R. 12 Colocación

Rendimiento:	420	m ³ /día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Extendora (finisher)	8,00	Q600,00	Q4.800,00
5	Camión de volteo	8,00	Q140,00	Q5.600,00
1	Bothcat	8,00	Q170	Q1.360,00
			TOTAL	11.760,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operador de extendora	8,00	Q27,00	Q216,00
3	Ayudante de extendora	8,00	Q16,00	Q384,00
5	Operador camión de volteo	8,00	Q22,00	Q880,00
1	Operador bothcat	8,00	Q23,00	Q184,00
6	Ayudante (alisado)	8,00	Q9,00	Q432,00
			TOTAL	Q2.096,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q104,80
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
			TOTAL	Q0,00
Total costo directo				Q2.200,80
Costos indirectos (49%)				Q1.078,39
Equipo:				Q11.760,00
Total Parcial:				Q15.039,19
IVA			12,00%	Q1.804,70
Total por día:				Q16.843,90
TOTAL POR			m³	Q40,10

Tabla XXXVI. R. 13 Texturizado

Rendimiento:	2800	m ² /día
Fecha:	oct-07	

EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Máquina texturizadora	8,00	Q350,00	Q2.800,00
			TOTAL	Q2.800,00

MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
1	Operador de máquina texturizadora	8,00	Q23,00	Q184,00
2	Ayudantes de texturizado	8,00	Q16,00	Q256,00
			TOTAL	Q440,00

HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)			Q22,00
--	--	--	---------------

MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
			TOTAL	Q0,00

Total costo directo		Q462,00
Costos indirectos (49%)		Q226,38
Equipo:		Q2.800,00
Total Parcial:		Q3.488,38
IVA	12,00%	Q418,61
Total por día:		Q3.906,99
TOTAL POR	m ²	Q1,40

Tabla XXXVII. R. 14 Curado

Rendimiento:	2800	m ² /día		
Fecha:	oct-07			
EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
4	Bomba aspersora	8,00	Q2,00	Q64,00
			TOTAL	Q64,00
MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
4	Peón	8,00	Q8,00	Q256,00
			TOTAL	Q256,00
HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q12,80
MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
84	Antisol	gls.	Q80,00	Q6.720,00
			TOTAL	Q6.720,00
Total costo directo				Q6.988,80
Costos indirectos (49%)				Q3.424,51
Equipo:				Q64,00
Total Parcial:				Q10.477,31
IVA			12,00%	Q1.257,28
Total por día:				Q11.734,59
TOTAL POR			m²	Q4,19

Tabla XXXVIII. R. 15 Corte

Rendimiento:	2400	ml/día
Fecha:	oct-07	

EQUIPO				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Máquina cortadora	8,00	Q60,00	Q960,00
			TOTAL	Q960,00

MANO DE OBRA				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	HRS. TRABAJO	COSTO HR.	SUB-TOTAL
2	Operador maquina cortadora	8,00	Q12,00	Q192,00
2	Peón	8,00	Q8,00	Q128,00
			TOTAL	Q320,00

HERRAMIENTAS (5% de Mano de Obra)				Q16,00
--	--	--	--	---------------

MATERIALES				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	COSTO/UD	SUB-TOTAL
			TOTAL	Q0,00

Total costo directo		Q336,00
Costos indirectos (49%)		Q164,64
Equipo:		Q960,00
Total Parcial:		Q1.460,64
IVA	12,00%	Q175,28
Total por día:		Q1.635,92
TOTAL POR	ml	Q0,68

4.4 Costos totales

Los costos totales para dos diferentes proyectos en la provincia de Guatemala, nos sirven de comparación para culminar el ejercicio:

Tabla XXXIX. Resumen de costos totales para el proyecto construcción de la ruta RN-13 tramo Génova – Caballo Blanco

ACTIVIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO
Reacondicionamiento de sub rasante	m ²	163.400,00	Q 9,02	Q 1.473.931,30
Capa de sub-base (e=0.20 mts)	m ³	31.160,00	Q 103,88	Q 3.237.025,94
Capa de base granular (e=0.20 mts)	m ³	28.120,00	Q 270,76	Q 7.613.884,13
Pavimento Flexible				
Riego de imprimación	gls.	39.900,00	Q 38,13	Q 1.521.232,72
Riego de liga	gls.	15.960,00	Q 33,59	Q 536.086,89
Concreto asfáltico en caliente (e=0.10 mts)	ton	31.920,00	Q 365,63	Q 11.670.983,37
Cemento asfáltico para concreto asfáltico AC-20	gls.	191.520,00	Q 25,76	Q 4.934.256,02
TOTAL				Q 30.987.400,38
ACTIVIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO
Estabilización con cal	m ²	163.400,00	Q 6,12	Q 999.255,58
Cal	kg.	750.500,00	Q 2,43	Q 1.821.871,13
Capa de base granular (e=0.15 mts)	m ³	21.090,00	Q 270,76	Q 5.710.413,10
Pavimento Rígido				
Hechura de la mezcla	m ³	19.950,00	Q 1.273,72	Q 25.410.677,19
Colocación	m ³	19.950,00	Q 40,10	Q 800.085,01
Texturizado	m ²	133.000,00	Q 1,40	Q 185.581,82
Curado	m ²	133.000,00	Q 4,19	Q 557.393,00
Corte	ml	114.000,00	Q 0,68	Q 77.706,05
TOTAL				Q 35.562.982,87

**Tabla XL. Resumen de costos totales para el proyecto ampliación CA-9-
Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia**

ACTIVIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO
capa de sub-base (e=0.20 mts)	m ³	44.000,00	Q 103,88	Q 4.570.896,70
capa de base granular (e=0.20 mts)	m ³	42.400,00	Q 270,76	Q 11.480.394,28
Pavimento Flexible				
riego de imprimación	gls.	43.200,00	Q 38,13	Q 1.647.048,96
riego de liga	gls.	17.280,00	Q 33,59	Q 580.424,91
concreto asfáltico en caliente (e=0.16 mts)	ton	55.296,00	Q 365,63	Q 20.218.004,28
cemento asfáltico para concreto asfáltico AC-20	gls.	331.776,00	Q 25,76	Q 8.547.763,81
TOTAL				Q 47.044.532,94
Pavimento Rígido				
capa de sub base(e=0.20 mts)	m ³	44.000,00	Q 103,88	Q 4.570.896,70
capa de base granular (e=0.20 mts)	m ³	42.400,00	Q 270,76	Q 11.480.394,28
Pavimento Rígido				
hechura de la mezcla	m ³	28.800,00	Q 1.273,72	Q 36.683.082,85
colocación	m ³	28.800,00	Q 40,10	Q 1.155.009,95
texturizado	m ²	144.000,00	Q 1,40	Q 200.930,69
curado	m ²	144.000,00	Q 4,19	Q 603.493,17
corte	MI	140.000,00	Q 0,68	Q 95.428,48
TOTAL				Q 54.789.236,12

CONCLUSIONES

1. Puede verse, en el análisis realizado, que el costo del pavimento rígido es más alto que el del pavimento flexible; en cuanto a ejecución se refiere. Para ello debe de tomarse en cuenta que se realizó la comparación tomando en consideración los mismos parámetros de diseño, en cuanto a cargas, tipo de subrasante, especificaciones de materiales y tiempo.
2. Hablando en sentido constructivo, ambos pavimentos cumplen con todos los requisitos para brindar un buen servicio a través de su vida útil; tomando en consideración que la ejecución de ambos conlleva un estricto control de calidad que garantice durabilidad y buen funcionamiento. Siendo indispensable, para que esto se cumpla, un apropiado programa de mantenimiento que garantice su conservación,

RECOMENDACIONES

1. Para obtener un análisis completo del estudio comparativo de costos realizado en el presente trabajo, deberá tomarse en cuenta, además de los costos de ejecución, incluidos anteriormente, los costos de mantenimiento, para ambos pavimentos.
2. Hablar de qué tan económico resulta un pavimento respecto al otro, es muy relativo, ya que si se toma en cuenta el costo total, el cual incluye la inversión inicial más el costo de mantenimiento, no se obtendrá una alternativa definitiva. Por lo tanto, dependerá de las autoridades respectivas tomar la decisión acerca de qué tipo de pavimento emplear en un proyecto determinado, contando con los fondos y financiamiento necesarios.
3. En el caso de las empresas encargadas de llevar a cabo la ejecución de cualquiera de los dos pavimentos, y en especial a los supervisores de la obra desde su inicio; se recomienda aplicar el respectivo control de calidad, para que a través de los años, pueda darse una opinión de qué tan duradero y económico resulta cada cual, bien construido; y para que, con el programa mantenimiento necesario, se tengan calles y carreteras en buenas condiciones; sin llegar al extremo de estar efectuando reparaciones que resulten onerosas y que interrumpen el normal desarrollo del tránsito.

BIBLIOGRAFÍA

1. Vides Tobar, Amando (Ing.). **Análisis y control de costos de ingeniería**. Tomo 1. Editorial Piedra Santa. Guatemala 1978.
2. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto. **Diseño y técnicas de construcción de pavimentos de concreto**. IMCYC. México 1985.
3. Amaya Morgan, César Augusto. Estudio comparativo de costos entre pavimentos rígidos y flexibles en la ciudad de Guatemala. Tesis ingeniero civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 1981
4. Secretaría Permanente del Tratado General de Integración Económica Centroamericana. **Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras, alcantarillas y puentes**. SIECA. México 1974.
5. Moncayo V., Jesús. **Manual de pavimentos**. CECSA. México 1985.
6. Asociación Centroamericana del Cemento y Concreto. **Pavimentos urbanos de concreto de cemento Pórtland**. Manual y publicación especial. ACC. México 1972.

APÉNDICE

Figura 7. Detalle de sección típica para una carretera tipo "A"

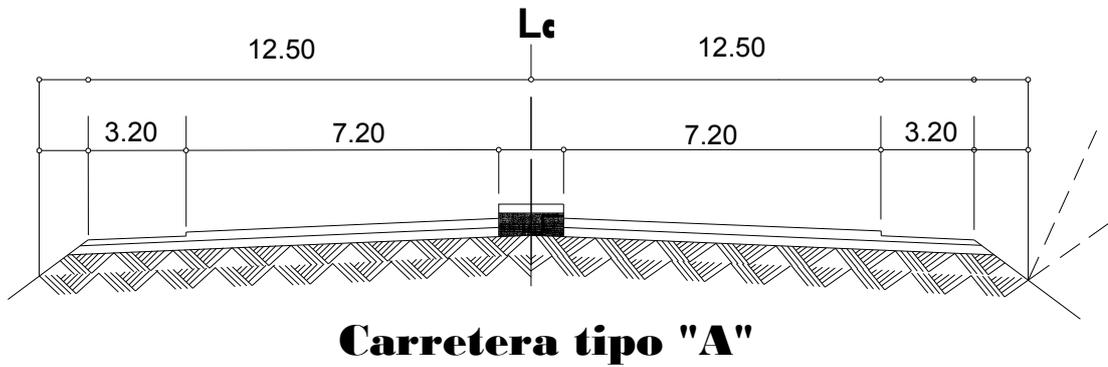


Figura 8. Detalle de sección típica para una carretera tipo "E" (modificada)

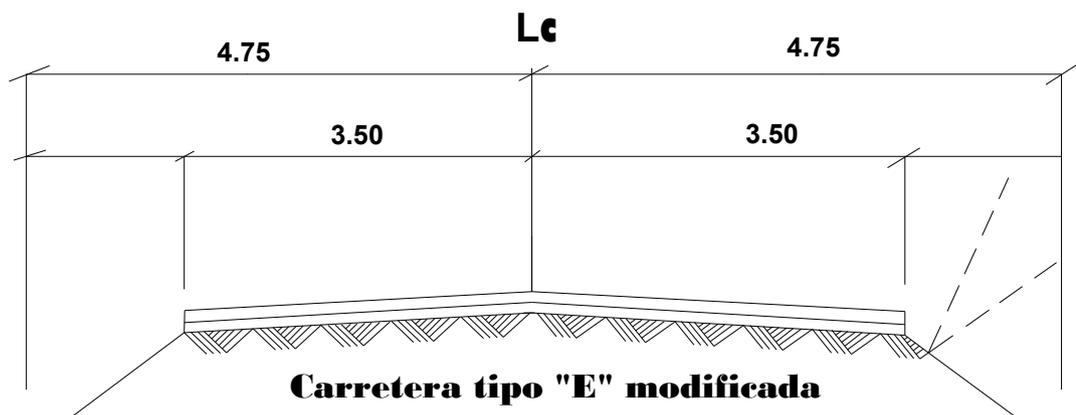


Figura 9. Ubicación de tensiones estimadas en el procedimiento de diseño de pavimentos

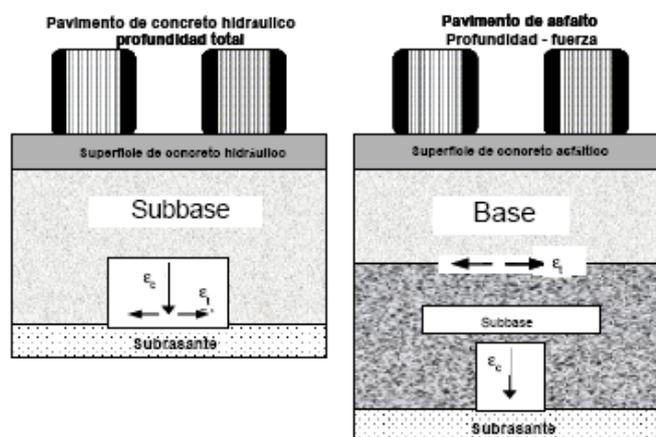


Tabla XLI. Resumen de especificaciones para colocación de juntas

Espesor de losa (cm)	Espaciamiento entre juntas (cm)	Profundidad de corte de juntas (cm)	Profundidad del material de sellado (cm)	Ancho del corte para la junta (cm)
15	360	5.00	1.00	0.50
16	384	5.33	1.07	0.53
17	408	5.67	1.13	0.57
18	432	6.00	1.20	0.60
19	456	6.33	1.27	0.63
20	480	6.67	1.33	0.67
21	504	7.00	1.40	0.70
22	528	7.33	1.47	0.73
23	552	7.67	1.53	0.77
24	576	8.00	1.60	0.80
25	600	8.33	1.67	0.83
26	624	8.67	1.73	0.87
27	648	9.00	1.80	0.90
28	672	9.33	1.87	0.93
29	696	9.67	1.93	0.97
30	720	10.00	2.00	1.00
31	744	10.33	2.07	1.03
32	768	10.67	2.13	1.07
33	792	11.00	2.20	1.10
34	816	11.33	2.27	1.13
35	840	11.67	2.33	1.17

Tabla XLII. Resumen de especificaciones para colocación de dovelas

Espesor de losa (cm)	Diámetro de dovelas cm (plg)	Largo de dovelas (cm)	Diámetro comercial de dovela (plg)	Profundidad de dovelas (cm)	Separación entre dovelas (cm)
15	1.88(0.74)	28	3/4	7.50	30.00
16	2.01 (0.79)	29	3/4	8.00	30.00
17	2.13 (0.84)	31	7/8	8.50	30.00
18	2.26 (0.89)	32	7/8	9.00	30.00
19	2.39 (0.94)	34	1	9.50	30.00
20	2.49 (0.98)	35	1	10.00	30.00
21	2.62 (1.03)	37	1	10.50	30.00
22	2.74 (1.08)	38	1 1/8	11.00	30.00
23	2.87 (1.13)	40	1 1/8	11.50	30.00
24	3.00 (1.18)	41	1 1/8	12.00	30.00
25	3.12 (1.23)	43	1 1/4	12.50	30.00
26	3.25 (1.28)	44	1 1/4	13.00	30.00
27	3.38 (1.33)	46	1 3/8	13.50	30.00
28	3.51 (1.38)	47	1 3/8	14.00	30.00
29	3.63 (1.43)	49	1 3/8	14.50	30.00
30	3.76 (1.48)	50	1 1/2	15.00	30.00
31	3.89 (1.53)	52	1 1/2	15.50	30.00
32	3.99 (1.57)	53	1 1/2	16.00	30.00
33	4.11 (1.62)	55	1 5/8	16.50	30.00
34	4.24 (1.67)	56	1 5/8	17.00	30.00
35	4.37 (1.72)	58	1 3/4	17.50	30.00

Tabla XLIII. Resumen de costos para equipo

EQUIPO	Costo/hr
Patrol	Q395.00
Rodo Vibratorio	Q250.00
Camión cisterna de 2000 Gls	Q140.00
Camión de volteo	Q140.00
Camión regador de asfalto	Q200.00
Planta central	Q500.00
Cargador	Q340.00
Extendedora (finisher)	Q600.00
Rodo liso	Q140.00
Equipo de laboratorio	Q20.00
Bothcat	Q170.00
Maquina texturizadora	Q350.00
Bombas aspersoras	Q2.00
Máquina cortadora	Q60.00
Camión para acarreo	Q130.00

Tabla XLIV. Resumen de costos para mano de obra

MANO DE OBRA	Costo/hr
Operadores de patrol	Q30,00
Operador de rodo	Q24,00
Operador de cisterna	Q23,00
Peón	Q8,00
Topógrafo	Q20,00
Cadenero	Q13,00
Laboratorista	Q20,00
Ayudante de laboratorista	Q14,00
Operador de camión regador	Q30,00
Ayudante camión regador	Q24,00
Encargado de la planta	Q40,00
Operador planta central	Q29,00
Ayudante planta	Q16,00
Operador de cargador	Q25,00
Operador camión de volteo	Q22,00
Ayudante camión de volteo	Q20,00
Operador bothcat	Q23,00
Operador extendedora	Q27,00
Ayudante de extendedora	Q16,00
Operador de máquina texturizadora	Q23,00
Ayudante de texturizado	Q16,00
Operadores maquina cortadora	Q12,00
Operador de camión acarreo	Q22,00
Ayudante (alisado)	Q9,00

Tabla XLV. Resumen de costos para materiales

MATERIALES	Costo/ud
Mat. de sub base	Q25,00
Mat. de base	Q125,00
RC	Q14,00
Secante	Q50,00
Emulsión	Q14,00
Concreto asfáltico	Q200,00
MC 70	Q15,00
Cemento	Q45,00
Ag. grueso	Q170,00
Ag. fino	Q140,00
Antisol	Q80,00
Cal	Q1,40
Aditivos	Q210,00