

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"MANUAL PARA EL DISEÑO, PRODUCCIÓN Y COLOCACIÓN DE PAVIMENTOS DE  
CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN GUATEMALA"**

TESIS DE GRADO

**STEPHANIE JOHANNA MOTTA LETONA**

CARNET 10416-10

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, OCTUBRE DE 2018  
CAMPUS CENTRAL

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"MANUAL PARA EL DISEÑO, PRODUCCIÓN Y COLOCACIÓN DE PAVIMENTOS DE  
CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN GUATEMALA"**

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA

POR

**STEPHANIE JOHANNA MOTTA LETONA**

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADA

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, OCTUBRE DE 2018  
CAMPUS CENTRAL

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

DECANA: MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA DE ZUNIGA

VICEDECANO: MGTR. OSMAN CARRILLO SOTO

SECRETARIA: MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN

DIRECTOR DE CARRERA: ING. ENRIQUE JOSÉ DE LEÓN BRAN

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

ING. HUGO JOSÉ GONZÁLEZ DEL VALLE

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

ING. ALVARO BERNARDO ZEPEDA HERMAN

ING. JUAN CARLOS GARCIA DIAZ

ING. WALTER NEFTALY MORALES PEÑATE



Universidad  
Rafael Landívar  
Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA  
No. 0299-2018

### Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado de la estudiante STEPHANIE JOHANNA MOTTA LETONA, Carnet 10416-10 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 02228-2018 de fecha 18 de septiembre de 2018, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

**"MANUAL PARA EL DISEÑO, PRODUCCIÓN Y COLOCACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN GUATEMALA"**

Previo a conferírsele el título de INGENIERA CIVIL en el grado académico de LICENCIADA.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 26 días del mes de octubre del año 2018.

MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN, SECRETARIA  
INGENIERÍA  
Universidad Rafael Landívar



Guatemala 16 mayo de 2018

Ingeniera  
Alejandra Ortiz  
Secretaria de Facultad  
Facultad de ingeniería

Estimada Inga. Morales:

Por este medio me es grato saludarle y desearle éxitos en sus actividades diarias. El motivo de la presente es para informarle que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado; **"MANUAL PARA EL DISEÑO, PRODUCCIÓN Y COLOCACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO EN GUATEMALA"** de la estudiante Stephanie Johanna Motta Letona quien se identifica con numero de carne 1041610. Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landivar doy como aprobado dicho trabajo.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Hugo González  
Asesor

## Agradecimientos

A:

Dios: por siempre ser guía y luz en mi vida acompañándome en cada paso y decisión tomada para lograr cumplir cada una de mis metas.

Universidad Rafael Landívar: por ser mi alma mater de estudio donde a través de la recolección de constantes conocimientos y experiencias me llevan el día de hoy a optar por mi título universitario.

Ingeniero Hugo González: por brindarme sus conocimientos, tiempo, apoyo y dedicación en la trascendental asesoría de este trabajo de graduación.

Cementos progreso: por apoyarme permitiéndome estar en sus instalaciones y laboratorios del centro de investigación y desarrollo (CETEC) para observar hechura y pruebas de ensayo. Con mención especial al ingeniero Benjamín López por su valioso apoyo durante las pruebas y al ingeniero Héctor Paredes.

Dedicatoria:

A:

Dios: por ser el centro de mi vida y acompañarme en todo momento.

Mis Padres: Igor Motta Bonilla y Karin Johanna Letona Solorzano por siempre guiarme, fortalecerme, amarme y apoyarme en cada de decisión tomada. Por su lucha y esfuerzo constante por formarme espiritual y profesionalmente para ser la persona que soy hoy.

Mis hermanos: Christian Motta Letona y Fernando Motta Letona por su constante motivación y apoyo para que logre cumplir cada una de mis metas.

Familia: por ser fuente de motivación, guía y entusiasmo a lo largo de toda mi vida pero sobre todo el cariño y comprensión brindado. En especial a mis abuelitos José Luis Letona Quiroa, Hilda Solorzano Espinoza (QEPD), Roberto Motta de Paz y Leticia Bonilla Pleitez que en todo momento me mostraron que con dedicación y esfuerzo todo en esta vida se puede lograr.

Mi novio: Franz Fernando Pira Samayoa por su apoyo y amor incondicional en cualquier situación, su paciencia y dedicación infinita en cada detalle, pero sobre todo por su esfuerzo inagotable por ayudarme en cumplir cada una de mis metas.

Mis amigos: por tantos gratos momentos vividos juntos en cada experiencia compartida

## RESUMEN EJECUTIVO

Este manual tiene como propósito guiar al usuario para desarrollar la técnica para pavimentos de concreto compactado con rodillo donde se consideró desde el diseño de mezcla, diseño estructural, producción y colocación más óptima según el tipo de proyecto. Considera la selección de materiales según normativas Coguanor, las propiedades estructurales aunque aún no están completamente desarrolladas para pavimentos de concreto compactado con rodillos sin embargo por sus características similares en materiales se utilizan los ensayos y pruebas de los pavimentos de concreto tradicionales, el método para dosificación de mezcla, el control de calidad tanto en campo como en laboratorio, el equipo necesario para la realización de la mezcla y colocación del pavimento.

Actualmente en Guatemala únicamente han sido desarrollados tres tramos de carreteras con esta técnica para una empresa privada y la primera experiencia fue realizada en el año 2008 sin embargo esta se ha desarrollado y tecnificado desde 1930 en varios países.

El desconocimiento acerca de su ejecución ha causado que la técnica no sea utilizada por todas las personas, constructoras, etc. Para que se desarrolle esta técnica en carreteras terciarias en Guatemala también se proporciona y explica dos ejemplos para la dosificación de mezcla de concreto compactado con rodillo con el fin de proporcionar al lector un mayor entendimiento acerca de esta técnica. Con el mismo objetivo también se expone el proceso y procedimiento que debe de llevar a cabo los controles de calidad en laboratorio para poder tener éxito en la aplicación del pavimento y se concluye con un presupuesto considerando todo el material, equipo y personal necesario para la realización de la técnica.

## Índice

<b>CAPITULO I .....</b>	<b>1</b>
Introducción .....	1
Antecedentes.....	3
Justificación .....	5
Objetivos.....	6
Descriptoros.....	6
Alcances .....	7
Limitantes .....	7
<b>CAPÍTULO II INTRODUCCIÓN CCR PARA PAVIMENTOS .....</b>	<b>9</b>
2.1. <i>Red vial de Guatemala y su estado actual .....</i>	9
2.1.1. Definición Concreto compactado con rodillo en pavimento .....	12
2.2. <i>Funcionamiento CCR como pavimento.....</i>	13
2.3. <i>Ventajas del uso del concreto compactado con rodillo en comparación con el</i> <i>asfalto 14</i>	
2.3.1. Ventajas económicas .....	14
2.3.2. Ventajas medioambientales .....	15
2.3.3. Ventajas sociales .....	16
2.4. <i>Desventajas del uso CCR para pavimento en comparación con el asfalto.....</i>	16
2.4.1. Magnitud y dimensiones del proyecto .....	16
2.4.2. Condiciones del proyecto .....	17
2.5. <i>Uso de CCR para pavimentos (Red vial Terciarias).....</i>	18
2.6. <i>Tipo de tráfico.....</i>	19
2.7. <i>Diseño de espesor.....</i>	19

2.8.	<i>Consideraciones de diseño:</i> .....	20
2.9.	<i>Características de superficie</i> .....	23
2.10.	<i>Tipo de juntas</i> .....	23
2.10.1.	<i>Juntas transversales</i> .....	23
2.10.2.	<i>Juntas longitudinales</i> .....	24
<b>CAPITULO III. Diseño de mezcla</b> .....		<b>25</b>
3.1.	<i>Selección de materiales para CCR</i> .....	25
3.2.	<i>Agregados gruesos</i> .....	25
3.3.	<i>Agregados finos</i> .....	26
3.4.	<i>Material cementantes</i> .....	28
3.4.1.	<i>Fly Ash</i> .....	28
3.5.	<i>Agua</i> .....	29
3.6.	<i>Aditivos químicos</i> .....	30
<input type="checkbox"/>	<i>Aditivos reductores de agua:</i> .....	30
<input type="checkbox"/>	<i>Aditivos retardantes:</i> .....	31
3.7.	<i>Métodos para dosificación de mezcla</i> .....	32
3.7.1.	<i>Método compactación del suelo</i> .....	32
3.8.	<i>Propiedades estructurales de CCR</i> .....	36
3.9.	<i>Módulo de elasticidad</i> .....	36
3.10.	<i>Resistencia</i> .....	37
3.11.	<i>Resistencia a la adherencia</i> .....	37
3.12.	<i>Durabilidad</i> .....	38
3.13.	<i>Permeabilidad</i> .....	38
3.14.	<i>Compresión</i> .....	39
3.15.	<i>Flexión</i> .....	39

3.16. Control de calidad CCR .....	40
3.16.1. Equipo de calidad y control .....	40
3.17. Control de calidad en campo y laboratorio .....	41
3.17.1. NTG 41017 h 37 (ASTM C 1170) Método de ensayo. Determinación de la consistencia y densidad del concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria.....	41
3.17.2. NTG 41017 h 38 (ASTM C1176) Práctica estándar para la elaboración de especímenes cilíndricos de concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria. ....	43
3.17.3. NTG 41017 h 39 (ASTM C1245) Método de ensayo. Determinación de la resistencia relativa de unión entre capas endurecidas de concreto compactado con rodillo. (Ensayo de carga puntual).....	45
3.17.4. NTG 41017 h 40 (ASTM C1435) Práctica estándar para elaborar especímenes cilíndricos de concreto compactado con rodillo utilizando un martillo vibratorio.....	47
3.17.5. La normativa NTG 41010 h19 (ASTM C566) Método de ensayo. Determinación por secado del contenido total de humedad evaporable en el agregado .....	49
3.17.6. ASTM C1040 Método estándar para la densidad en sitio de concreto no endurecido y endurecido.....	49
3.17.7. La normativa NTG 41049 h19 (ASTM C42) Método de prueba estándar para obtener y probar núcleos perforados y vigas aserradas de concreto .....	50

#### **CAPITULO IV METODOLOGÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE CCR PARA**

<b>PAVIMENTOS SEGÚN AASHTO 1993.....</b>	<b>51</b>
4.1. Diseño estructural de pavimentos con CCR.....	51
4.2. Bases de diseño .....	51
4.3. Diseño de espesor.....	52
4.3.1. Variable de diseño .....	52
4.3.2. Variable de comportamiento.....	58

4.3.3. Variable de propiedades de los materiales para el diseño estructural .....	60
4.3.4. Variable de características estructurales del pavimento .....	63
4.3.5. La ecuación que considera todos estos factores que afectan a los pavimentos rígidos según AASHTO es;.....	65
<b>CAPITULO V METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE CCR PARA PAVIMENTOS...</b>	<b>66</b>
5.1. <i>Planta de mezcla</i> .....	66
o Mezcladoras continuas .....	67
o Mezcladores de tambor central.....	69
<b>CAPÍTULO VI METODOLOGÍA DE COLOCACIÓN CCR PARA PAVIMENTOS .....</b>	<b>70</b>
6.1. <i>Preparación de la sub-rasante y sub-base</i> .....	70
6.2. <i>Proceso de colocación</i> .....	73
6.3. <i>Pavimentadora</i> .....	74
6.4. <i>Camiones para transportar</i> .....	75
6.5. <i>Proceso de compactación</i> .....	77
6.6. <i>Compactadora</i> .....	78
6.7. <i>Juntas por temperatura</i> .....	80
6.8. <i>Curado de pavimento de CCR</i> .....	84
Aplicación Pavimento rígido Concreto Compactado con Rodillo .....	<b>87</b>
6.9. <i>Métodos para dosificación de mezcla</i> .....	90
Método compactación del suelo ejemplo 1 .....	90
I. Selección de agregados graduados.....	<b>90</b>
II. Selección de contenido cementico de rango medio. ....	<b>90</b>
III. elección de intervalos de relación de humedad-densidad. ....	<b>91</b>
IV. Método de ensayo Proctor modificado (ASTM D 1557) .....	<b>91</b>

V. Prueba de especímenes y selección de contenido cementicio. ....	92
VI. Calculo de proporción de mezcla.....	92
6.9.1. Método compactación del suelo ejemplo 2.....	94
I. Selección de agregados graduados. ....	94
II. Selección de contenido cementicio de rango medio. ....	94
III. Selección de intervalos de relación de humedad-densidad.....	95
IV. Método de ensayo Proctor modificado (ASTM D 1557) .....	95
V. Prueba de especímenes y selección de contenido cementicio. ....	95
VI. Calculo de proporción de mezcla.....	96
6.10. <i>Ensayo en laboratorio según normativa NTG 41017 h 40 (ASTM C1435)</i> <i>Práctica estándar para elaborar especímenes cilíndricos de concreto compactado</i> <i>con rodillo utilizando un martillo vibratorio. ....</i>	98
6.11. <i>Ensayo en laboratorio según normativa NTG 41017 h2 (ASTM C78) Método</i> <i>de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga</i> <i>simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz).....</i>	105
<b>Resultados .....</b>	<b>111</b>
<i>Resistencia a compresión .....</i>	<i>111</i>
<i>Módulo de ruptura .....</i>	<i>111</i>
<b>Integración de costos en proyecto de pavimento CCR en Guatemala .....</b>	<b>112</b>
<i>Producción .....</i>	<i>113</i>
<i>Colocación .....</i>	<i>114</i>
<i>Acarreo .....</i>	<i>115</i>
<i>Corte .....</i>	<i>116</i>

<i>Curado</i> .....	117
<i>Integración total costos producción y colocación CCR</i> .....	118
<b>Conclusiones</b> .....	<b>119</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>121</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>122</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>124</b>

## Índice de figuras

<i>Figura 1: concreto compactado con rodillo.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2: concreto compactado con rodillo en pavimentos.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: mesa vibratoria para el ensayo de consistencia.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4: mesa vibratoria: Preparación del cilindro (Molde Tipo B) .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5: esquema del método de carga.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 6: placa circular de apisonar de acero y el eje metálico.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 7: esquema de la planta de mezcla continua.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 8: planta de mezcla continua.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 9: planta de mezcla de tambor central .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 10: preparación sub-rasante y sub-base.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 11: estabilización de base con agregado grueso.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 12: preparación Sub-rasante.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 13: proceso colocación CCR.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 14: junta fría.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 15: camiones para transportar mezcla CCR.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 16: compactadora.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 17: proceso constructivo pavimento CCR .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 18: proceso junta longitudinal fresca en pavimento de concreto compactado con rodillo.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 19: junta fresca en pavimento de concreto compactado con rodillo.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 20: junta final fría en pavimento de concreto compactado con rodillo.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 21: corte de sizas y siza en CCR.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 22: aplicación curado con compuestos químicos .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 23: aplicación compuesto químico para curado de CCR.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 24: aplicación de agua para curado de CCR.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 25: ubicación aldea Chivoc, San Juan Sacatepequez, Guatemala.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 26: combinación de agregados para concreto.....</i>	<i>90</i>

<i>Figura 27: agregado Grueso .....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 28: recipiente con el que midió agregados.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 29: agregado fino.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 30: cilindros utilizados para mezcla.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 31: mezcladora y mezcla CCR.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 32: hechura de cilindros y vibro compactadora aplicada a cilindros. ....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 33: nivelación final de cilindros.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 34: desencofrado de cilindros y la colocación de estos en piletas para su fraguado. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 35: prueba resistencia a compresión de cilindros a 7 días y 28 días. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 36: prueba resistencia a compresión de cilindros a 7 días y 28 días. ....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 37: Vigas utilizadas para mezcla.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 38: mezcladora y mezcla CCR para ensayo de vigas. ....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 39: hechura de vigas y vibro compactadora aplicada a vigas.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 40: nivelación final de vigas. ....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 41: prueba Modulo de ruptura mezcla CCR a 7 días y 28 días. ....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 42: costos aproximados de producción CCR para pavimentos en Guatemala. .....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 43: costos aproximados de colocación CCR para pavimentos en Guatemala. 114</i>	<i>114</i>
<i>Figura 44: costos aproximados de acarreo CCR para pavimentos en Guatemala. ...</i>	<i>115</i>
<i>Figura 45: costos aproximados de corte CCR para pavimentos en Guatemala.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 46: costos aproximados de curado CCR para pavimentos en Guatemala.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 47: integración costos aproximados de curado CCR para pavimentos en Guatemala. ....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 48: acabado en pavimento CCR .....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 49: sub-rasante y colocación pavimento CCR.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 50: curado con compuesto químico CCR.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 51: equipo de colocación .....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 52: acabado bordillo CCR.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 53: acabado final bordillo pavimento CCR .....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 54: estructura de pavimento final CCR.....</i>	<i>127</i>

<i>Figura 55: estructura de pavimento final CCR'</i> .....	127
<i>Figura 56: proceso colocación pavimento CCR.</i> .....	128

## Índice de Grafico

<i>Gráfico 1: gráfico de diseño para pavimentos RCC.....</i>	<i>20</i>
<i>Gráfico 2: gráfico de límites de graduación de agregados para pavimentos RCC. ....</i>	<i>27</i>
<i>Gráfico 3: gráfico banda de graduación sugerida y curva de potencia 0.45. ....</i>	<i>33</i>
<i>Gráfico 4: gráfico curva humedad – densidad proctor modificado y proctor estándar. ....</i>	<i>34</i>
<i>Gráfico 5: gráfico curva humedad – densidad. ....</i>	<i>35</i>
<i>Gráfico 6: densidad seca-humedad relativa .....</i>	<i>91</i>
<i>Gráfico 7: contenido de cemento vrs resistencia a compresión.....</i>	<i>92</i>
<i>Gráfico 8: combinación de agregados para concreto .....</i>	<i>94</i>
<i>Gráfico 9: densidad seca- humedad relativa .....</i>	<i>95</i>

## Índice de tabla

<i>Tabla 1: muestra el total de kilómetros de la red vial según clasificación y tipo de rodadura.</i> .....	11
<i>Tabla 2: usos comunes de concreto compactado con rodillo.</i> .....	22
<i>Tabla 3: muestra recomendaciones para la graduación en mezclas de CCR.</i> .....	27
<i>Tabla 4: muestra una guía que puede utilizarse para el factor DL</i> .....	54
<i>Tabla 5: muestra una guía que puede utilizarse para el factor DD</i> .....	54
<i>Tabla 6: muestra una guía de factores LEF para secciones de pavimento rígido equivalente.</i> .....	55
<i>Tabla 7: muestra los niveles de confiabilidad sugeridos por AASHTO 93 según su clasificación funcional.</i> .....	56
<i>Tabla 8: muestra los niveles de serviciabilidad sugeridos por AASHTO 93 según su clasificación funcional.</i> .....	59
<i>Tabla 9: muestra la varianza estándar normal sugeridos por AASHTO 93 según su clasificación funcional.</i> .....	61
<i>Tabla 10: muestra los valores del coeficiente de drenaje Cd sugeridos por AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.</i> .....	63
<i>Tabla 11: muestra los valores del coeficiente de transferencia J sugeridos por AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.</i> .....	64
<i>Tabla 12: muestra los valores considerados para cada variable que considera AASHTO 1993 para poder determinar el valor del espesor del pavimento.</i> .....	89
<i>Tabla 13: proporción de mezcla para 12.47% contenido cemento y 6% de humedad óptima. Para aplicación de 1 m3.</i> .....	93
<i>Tabla 14: proporción de mezcla para 9.44% contenido cemento y 5.5% de humedad óptima.</i> .....	97
<i>Tabla 15: muestra altura de cada agregado según recipiente utilizado.</i> .....	98
<i>Tabla 16: Muestra resultado de altura según recipiente y mezcla</i> .....	105
<i>Tabla 17: resultado cilindros a compresión según normativa según normativa NTG 41017 h 40 (ASTM C 1435)</i> .....	111
<i>Tabla 18: módulo de ruptura vigas mezcla concreto compactado con rodillo según normativa NTG 41017 h2 (ASTM C 78)</i> .....	111

## Índice de cuadros

*Cuadro 1: Límites químicos opcionales para el agua de mezcla combinada ..... 30*



# CAPITULO I

## Introducción

El pavimento de concreto compactado con rodillo es una técnica constructiva que combina el diseño estructural de pavimento de concreto convencional por sus materiales y la parte constructiva para colocación y compactación del pavimento asfáltico para formar una mezcla con cero slump debido a que posee una cantidad mínima de agua y una granulometría máxima, dicha característica permite que pueda ser compactada inmediatamente después de su colocación. Siendo esta una forma rápida de construcción y habilitación a tránsito.

El concreto compactado con rodillo ofrece una gran cantidad de aplicaciones posibles ya que puede ser utilizada para puertos, parqueos industriales, aeropuertos, arterias principales, secundarias y terciarias, hombros de carreteras, base para pavimentos de alta velocidad. Este manual es específico para la aplicación del concreto compactado con rodillo en vías, principalmente para la red vial secundaria y terciaria en Guatemala, vías públicas o privadas con velocidades de operación menores a 50km/hr.

La importancia de este tema radica que en Guatemala actualmente según DGC únicamente se encuentra pavimentada el 44% de la red vial total, esto debido a los escasos recursos económico del país sin embargo el concreto compactado con rodillo para pavimentos se presenta como una solución integral aplicable a vías terciarias por sus características y ventajas en comparación con la pavimentación de concreto convencional y asfalto ya que usa los componentes de mezcla del concreto convencional y la tecnología de colocación utilizada para el asfalto.

En el presente manual se presenta la metodología de diseño, producción y colocación de concreto compactado con rodillo(CCR) en pavimentos junto con aplicación de diseño de estructura de pavimento según AASHTO 1993, utilizando el programa

WinPas <sup>1</sup> también se considera dos ejemplos de métodos de dosificación de mezcla y ensayos de laboratorio para determinar resistencia a compresión y módulo de ruptura de un diseño de mezcla como complemento al manual se incluye un presupuesto aproximado para la ejecución de un tramo de un kilómetro ubicado en el interior del país.

---

<sup>1</sup> Winpas: Software para guía de análisis de pavimento basado en la guía AASHTO de 1993 para el diseño de estructuras de pavimento.

## **Antecedentes**

Alrededor del mundo se ha utilizado esta técnica para cubrir diversas necesidades teniendo como factor común la necesidad de construir carreteras de bajo impacto económico de forma más acelerada sin embargo los métodos constructivos han ido variando según el lugar y el tiempo en que fueron realizadas; no fue hasta principios de los años setenta cuando el método constructivo fue estandarizado.

Según el reporte de ACI 325.10R -95 la primera aplicación en carreteras de concreto compactado con rodillo fue en Suecia en los años 1930 sin embargo para esta fecha únicamente no era reconocido como un método CCR, siguiendo con la cronología, de aplicación la primera reportada en Estados Unidos por la oficina de ingenieros en Seattle, fue una pista en Yakima, Washington alrededor de 1942 utilizada como base sin embargo esta no contaba con el equipo, diseño y controles estándar de la mezcla.

Mientras que en Canadá, no fue hasta, 1976 en Caycuse, isla de Vancouver, Columbia Británica que fue construido el primer pavimento de CCR para patios industriales, debido a que los propietarios necesitaban un pavimento con mayor resistencia al desgaste, resistencia a congelación y descongelación de las vías. Tras este éxito se construyeron tres patios más en Queen Charlotte Islas frente la costa de Columbia Británica, funcionando de forma excepcional con poco mantenimiento

Durante la década de 1980 los ingenieros del ejército de Estados Unidos fueron utilizados CCR en pavimentos dentro de instalaciones militares, siendo en 1984 que fue diseñada y construida a escala completa el primer pavimento de este tipo.

Continuando con la implementación del sistema a nivel mundial en los años setenta y ochenta, se unieron ensayos de pequeños tramos carreteros en países como; Alemania, Argentina, Australia, Brasil, Chile, España, Japón, Sudáfrica, Suecia, Uruguay.

En el caso de Guatemala no fue hasta el año 1992 que fue implementada el primer tramo de prueba de pavimento de CCR en acceso a planta privada de cemento ubicada en zona 6 de la ciudad. La siguiente prueba fue realizada en el 2008 en "El Sinacal". El

último tramo realizado con esta metodología fue durante el 2014 en San Juan, Sacatepéquez, por una entidad privada.

## **Justificación**

La red vial de Guatemala se conforma de 16,450 km aproximadamente, de los cuales el 55% no está pavimentado. Dentro de las soluciones más utilizadas se encuentran los pavimentos flexibles (casi un 90% de la red vial con pavimento) los cuales debido a la naturaleza del material requiere de un mantenimiento preventivo constante y además una necesidad de intervenciones de mantenimiento correctivo con una frecuencia de 8 a 10 años durante su vida útil. El concreto compactado con rodillo es una tipología que pertenece a los pavimentos rígidos, estructuras que sobresalen por su gran durabilidad y que necesitan mantenimiento preventivo en menor frecuencia que los pavimentos flexibles, por lo que se considera una solución competitiva en la red vial del país. Los pavimentos de concreto compactado con rodillo presentan características competitivas las cuales lo hacen una excelente opción para pavimentos rurales y para la red vial terciaria del país. Dentro de las ventajas se pueden mencionar: rápida apertura al tránsito (24hrs), para su colocación se utiliza la misma maquinaria que en el asfalto (tecnología presente en el país), la mezcla de concreto utiliza menos cemento que una convencional (ahorro de materiales), en algunas ocasiones no precisa sub-base (optimización de materiales de cantera), vida útil mayor a 20 años (durabilidad) y rendimientos iguales o mejores que en el asfalto.

## **Objetivos**

### **General**

- Realizar un manual para el diseño, producción y proceso constructivo de pavimentos de concreto compactado con rodillo en Guatemala.

### **Específicos**

- Describir uno de los procedimientos para el diseño estructural de un pavimento de concreto compactado con rodillo, siguiendo lo detallado en el método de diseño AASHTO 1993.
- Describir el procedimiento para realizar el diseño de mezcla para concreto compactado con rodillos en pavimentos.
- Describir el proceso de producción de mezcla de concreto compactado con rodillo.
- Describir el proceso constructivo para la construcción de pavimentos con concreto compactado con rodillo.
- Describir la aplicación de diseño estructural y metodología de dosificación de concreto compactado con rodillo en pavimentos con un proyecto en Guatemala.
- Realizar pruebas de laboratorio a un diseño de mezcla para obtener resistencia a compresión y módulo de ruptura.
- Realizar presupuesto de ejecución de concreto compactado con rodillo en pavimento para un tramo específico de un kilómetro.

### **Descriptor**

Concreto Compactado con Rodillo, pavimentos, diseño, producción, método de colocación

## **Alcances**

El presente manual se orienta en la manera correcta de diseño de mezcla, producción y colocación adecuada para pavimentos de concreto compactados con rodillos para usuarios dedicados a la construcción de redes viales en Guatemala, exponiendo su proceso constructivo desde la selección de los materiales disponibles adecuados hasta el equipo correcto de colocación de esta técnica. Tomando como referencia los siguientes parámetros:

- **Diseño de mezcla:** se describen los materiales utilizados para realizar una mezcla para pavimentos de concreto compactado con rodillos donde se incluye; granulometrías (agregados grueso y fino), agua, cemento. Se describen las pruebas/ensayos relacionadas con los mismos sin embargo dichas no son sujetas a investigación ni realización.
- **Producción:** se describen únicamente dos tipos de planta donde se puede realizar la mezcla de concreto compactado con rodillo pues estas son la tecnología actual con la que cuenta Guatemala.
- **Colocación:** Describe el proceso junto con el equipo necesario para la colocación del concreto y se recomienda una capacidad específica de cada uno sin embargo esto se encuentra sujeto a cambios según requerimientos del proyecto.

## **Limitantes**

- Dicho manual considerara todas las normativas COGUANOR con su equivalente en normativas ASTM para realizar ensayos correspondientes tanto para el diseño como para la producción del mismo sin embargo no serán sujetas a estudio ya que no es el fin del presente manual.
- Dicho manual considerara todas las normativas COGUANOR con su equivalente en normativas ASTM para realizar a material de mezcla para el diseño de la misma sin embargo no serán sujetas a estudio ya que no es el fin del presente manual.

- El proceso constructivo para concreto compactados con rodillos considera una plataforma general para Guatemala sin embargo no se toman en cuenta las diferentes variaciones existentes para la preparación de subrasantes y de la base.
- Dentro de dicho manual únicamente se considera el diseño de pavimento no las obras complementarias que cada estructura de pavimento debe llevar, dichas no serán descritas en el presente manual no obstante se tiene que considerar para toda infraestructura vial. Se considera como obras complementarias; Pendiente transversal, hombros, sobre ancho del pavimento (SAP), banquetas, taludes, dreanjes, subrasante y bordillos.
- En dicho manual únicamente se desarrolla un tipo de dosificación de mezcla, el cual es el más utilizado para mezclas de concreto compactado con rodillo.
- Actualmente esta técnica únicamente ha sido desarrollada por Cementos progreso en Guatemala por lo tanto los datos, valores y ensayos fueron realizados en laboratorios de la compañía.
- Los resultados de las pruebas de laboratorio están sujetas únicamente a dos muestras por ensayo de 7 y 28 días porque no se contaba con más muestra de material de lugar sin embargo es mejor contar con más testigos y más días de evaluación para poder inferir mejor los resultados esperados de la mezcla.

## CAPÍTULO II INTRODUCCIÓN CCR PARA PAVIMENTOS

### 2.1. Red vial de Guatemala y su estado actual

En Guatemala la red vial está bajo la supervisión de “La Dirección General de Caminos”, la cual es una institución gubernamental cuyo objetivo primordial es velar por la planificación, diseño, ejecución, supervisión de obras de construcción, mejoramientos, ampliaciones, reconstrucciones y mantenimientos de toda la infraestructura vial (Dirección general de Caminos, 2014).

Esta institución clasifica la red vial de Guatemala en cuatro diferentes tipos de rutas las cuales son descritas a continuación:

- Rutas Centroamericanas (CA): conecta la capital con fronteras y puertos de importancia o bien desde otra ruta centroamericana atravesando tanto longitudinalmente como transversalmente la república cumpliendo condiciones de diseño óptimas según lo permita la topografía.
- Rutas Nacionales(RN): conecta cabeceras departamentales entre sí, une cabeceras departamentales a rutas centroamericanas y rutas centroamericanas con puertos. Funciona como una red auxiliar de las rutas centroamericanas.
- Rutas departamentales(RD): conecta cabeceras departamentales entre sí, une cabeceras municipales con rutas centroamericanas o rutas nacionales u otras departamentales.
- Caminos rurales (CR): conectan comunidades rurales de los municipios.

Estas clasificaciones a su vez se clasifican según su tipo de rodadura:

- Red vial primaria: es la red básica de carreteras troncales cuya función radica en comunicar principales puertos marítimos y puertos fronterizos con otros países. Está constituida por; rutas Centroamericanas (CA), ciertos tramos de rutas nacionales (RN), rutas departamentales (RD) y la franja transversal del norte (FTN).
- Red vial secundaria: su función es unir cabeceras departamentales continuas formando una red complementaria a la red vial primaria. Está constituida por; rutas nacionales (RN) y ciertos tramos de rutas departamentales (RD).
- Red vial terciaria: su función es unir cabeceras departamentales con municipios y aldeas complementando de las redes viales primarias y secundarias. Está constituida por; Caminos rurales (CR) y de terracería.

En el 2014, el cual fue el último año actualizado por la dirección general de caminos, la red vial de la república de Guatemala estaba conformada por 16,860.68 kilómetros de carreteras de los cuales únicamente 7,359.42 kilómetros se encuentra pavimentados y de estos 7,125 kilómetros están pavimentados con asfalto lo que representa un 43.3% y 234.42 kilómetros se encuentra pavimentados con concreto representando únicamente 1.3% de la red total. Dando como resultado 9,501.26 kilómetros de terracería que conforman el 55.4% restante de la red vial.

Tabla 1: muestra el total de kilómetros de la red vial según clasificación y tipo de rodadura.

CLASIFICACION DE RUTAS	TIPO DE RODADURA	CENTROAMERICANAS (CA)	NACIONALES (RN)	DEPARTAMENTALES (RD)	CAMINOS RURALES (CR)	TOTAL KILOMETROS
PRIMARIA	ASFALTO	2007.00	625.10	417.00		3049.10
	PAVIMENTO	131.00	22.00			153.00
	TERRACERIA		484.00	20.00		504.00
SECUNDARIA	ASFALTO	7.18	756.00	677.30		1440.48
	PAVIMENTO		0.00			0.00
	TERRACERIA		254.00	114.00		368.00
TERCIARIA	ASFALTO		397.80	2227.56		2625.36
	PAVIMENTO		22.00	50.45		72.45
	TERRACERIA		350.80	3885.06		4235.86
CAMINOS RURALES	ASFALTO				15.20	15.20
	PAVIMENTO				3.84	3.84
	TERRACERIA				4393.40	4393.40
	TOTAL EN KILOMETROS	2145.18	2911.70	7391.37	4412.43	16860.68

Fuente: elaboración propia (2014)

### 2.1.1. Definición Concreto compactado con rodillo en pavimento

El Concreto compacto con rodillo es un tipo resistente y durable de pavimento capaz de ser compactado con rodillos vibratorios inmediatamente después de la colocación, es de ahí donde proviene su nombre, el cual está compuesto por una mezcla rígida de material cementicio, agua, agregados finos, agregados gruesos y aditivos químicos, donde predomina mayor proporción de agregados finos. Esta característica da la posibilidad de formar una mezcla más consistente sin desplome de pasta, a diferencia de la mezcla de concreto tradicional, lo que permite que permanezca contenida cuando esta es compactada con rodillos neumáticos vibratorios de goma, conservando aún suficiente húmeda para tener densidad requerida en la pasta incluso sin segregar. (Universidad del Estado de Iowa,2010).

Típicamente este sistema constructivo no necesita encofrados, clavijas o acero de refuerzo debido al tipo de mezcla proporcionado posee la suficiente capacidad de resistencia necesaria para soportar las cargas causadas por el tránsito vehicular sin embargo puede llegar a necesitar juntas transversales. (Universidad del Estado de Iowa,2010)

Este método constructivo es utilizado con diversos fines como lo son; estacionamientos, áreas de almacenamiento, aeropuertos, instalaciones militares, calles, carreteras de baja velocidad y bases de pavimentos. (Southeast Cement Association,2007)

## 2.2. Funcionamiento CCR como pavimento

El funcionamiento del concreto compactado con rodillo radica en la buena aplicación de algunas de técnicas constructivas de pavimentación de asfalto para cumplir con características similares de resistencia a pavimentos realizados con concreto tradicionales, pero con baja permeabilidad. Cumpliendo con los lineamientos anteriores CCR provee una estructura de pavimento rígido capaz de soportar tráfico pesado continuamente sin necesidad de utilizar refuerzos adicionales teniendo una vida útil mayor con menores costos de mantenimiento. (Universidad del estado de Iowa,2010)



*Figura 1: concreto compactado con rodillo.  
Fuente: Igel & Co.,Inc (2017)*

## **2.3. Ventajas del uso del concreto compactado con rodillo en comparación con el asfalto**

### **2.3.1. Ventajas económicas**

- Durabilidad: el CCR posee algunas propiedades mecánicas como lo son; la resistencia a la flexión, compresión y alta densidad del concreto. Lo que permite aumentar la capacidad de resistencia a los efectos del medio ambiente y el uso frecuente realizado por el usuario. Es por esto que su tiempo de vida es más largo ya que puede llegar a durar veinticinco años mientras que un pavimento de asfalto tan solo quince años. (Universidad del estado de Iowa,2010)
- Mantenimiento: CCR necesita reparaciones menores cada diez años y fresado de la superficie cada treinta años a causa de la resistencia a compresión, alta densidad y bajo contenido de agua que posee la mezcla. Mientras que el asfalto necesita mantenimientos regulares cada dos años y reconstrucción cada diez años. Esta situación provoca que el mantenimiento de CCR sea un 59% más económico que el asfalto. (Cemex,2013)
- Costos de operación: los costos son menores debido a la durabilidad del concreto compactado con rodillo tiene menores reparaciones, la vía no sufre interrupción constante en su operación. También es importante mencionar que por la naturaleza del concreto es más brillante y capaz de reflejar hasta tres veces más luz que un pavimento de asfalto por lo tanto se puede llegar a reducir hasta en un 30% de intensidad luminosa en las vías sin comprometer la visibilidad nocturna del usuario. (Cemex,2013)
- Ciclo de vida: ofrece 10% de ahorros económicos mayores en comparación con el asfalto debido a la cantidad de mantenimientos que necesita el concreto compactado con rodillo a lo largo del ciclo de vida para el cual fue diseñado. (Cemex,2013)

### 2.3.2. Ventajas medioambientales

- Consumo de energía térmica: la producción de mezcla para CCR no necesita energía térmica debido a que no necesita mantener la mezcla a altas temperaturas tanto en su producción como colocación a diferencia de la mezcla asfáltica que necesita energía térmica para el almacenamiento de la misma.
- Consumo de combustible: como el CCR es una estructura de pavimento rígido, las llantas cuando ruedan sobre el pavimento causan una menor deflexión en comparación a las estructuras flexibles como es considerado el asfalto. Esto origina un menor impacto sobre el medio ambiente debido a que se hace más eficiente el consumo de combustible en un 3% generando menor cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (Cemex,2013)

Guatemala como país, por su ubicación geográfica y su variedad de climas tiende a exponerse a este efecto lo cual lleva a los usuarios a utilizar recurrentemente aire acondicionado causando más gasto de combustible y contaminación ambiental. El utilizar pavimentos de concreto por su color claro controla hasta 15°C la temperatura más fría que la del asfalto en días de temperaturas elevadas, esto por su propiedad reflejante. (EPA,2008)

- Efecto isla de calor urbano: de acuerdo con la “EPA”, por sus siglas en ingles, agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos, este efecto hace referencia a las altas temperaturas en zonas desarrolladas en comparación a áreas aledañas rurales debido al desarrollo, cambios de radiación y propiedades térmicas de infraestructuras urbanas.

### 2.3.3. Ventajas sociales

- Seguridad:

La propiedad mecánica de resistencia a compresión del concreto aumenta con el pasar del tiempo evitando la formación de baches en pavimento provocando una superficie más estable evitando la pérdida de tracción entre el neumático del vehículo y el pavimento.

Otra propiedad es el alto grado de fricción que proporciona este tipo de pavimento provocando la reducción de distancia requerida para frenar en un rango de 12% al 15% en comparación con el pavimento de asfalto no considerando las condiciones climáticas del lugar.

## 2.4. Desventajas del uso CCR para pavimento en comparación con el asfalto

### 2.4.1. Magnitud y dimensiones del proyecto

- Tipo de calzada

El uso de pavimentos compactados con rodillo en carreteras de alta velocidad (50 km/H), no es posible debido a que este tipo de construcción posee un perfil irregular haciéndolo ineficiente para este uso. (Gonzalez,2016)

- Topografía:

Según la topografía del proyecto no es factible utilizar esta técnica si el trayecto tiene pendientes muy pronunciadas o bien curvas pronunciadas debido a que la fricción y tracción de este tipo pavimento con las llantas no será suficiente para evitar desequilibrio en el vehículo. Es importante mencionar que se dificulta la colocación del pavimento en dichas situaciones por su equipo.

- Economía:

El costo inicial en la aplicación de este tipo de pavimento es mayor a los pavimentos flexibles, esta diferencia se debe generalmente a los costos de materiales con los cuales es realizada esta mezcla; cemento, agregado grueso, agregado fino y fino según su ubicación y magnitud del proyecto

#### 2.4.2. Condiciones del proyecto

- Logística:

La planta de producción debe estar lo suficientemente cerca del tramo a construir para evitar pérdidas de humedad y densidad en la mezcla. Aunque esta ya encuentra diseñada con aditivos pues es de vital importancia estos dos factores para determinar durabilidad y calidad de la mezcla pues puede ser afectados por el tiempo de acarreo de la mezcla.

- Disponibilidad de equipos y suministros:

El equipo para colocación del pavimento concreto compactado con rodillo es similar al utilizado para pavimentos flexibles(asfalto) pero por la poca experiencia que se tiene actualmente con esta técnica se desconoce las modificaciones que debe sufrir la pavimentadora para poder utilizar esta técnica.

## 2.5. Uso de CCR para pavimentos (Red vial Terciarias)

La red vial terciaria en Guatemala como fue expuesto anteriormente está compuesta por 9,501.26 kilómetros lo que equivale al 56% del total de la red de toda la república de Guatemala. (DGC, 2014)

A pesar de tener este porcentaje la mayoría de esta carretera de vital importancia para desarrollo tanto económico como social de la población se encuentran en mal estado debido a que son carreteras de terracería sin tratamiento o mantenimientos continuos por falta de presupuesto o falta de rutas alternas para realizarlos, lo cual provoca molestias y accidentes para los usuarios de la misma.

Esta razón propicia el uso de concreto compactado con rodillo para pavimentación de carreteras terciarias debido a la facilidad que brinda por su rápida construcción causando menor tiempo de restricción de paso por la vía y menores costos.



*Figura 2: concreto compactado con rodillo en pavimentos.  
Fuente: Concrete Construction (2016)*

## **2.6. Tipo de tráfico**

Los pavimentos de concreto compactado con rodillo son pavimentos rígidos capaz de soportar cargas transmitidas por;

- Vehículos livianos
- Transporte pesado
- Cargas especiales industriales (Grúas y montacarga)

## **2.7. Diseño de espesor**

Según la normativa ACI 325.10R -95 de concreto compactado con rodillo para pavimentos especifica que el diseño de espesor se diseña en base la tensión por flexión y la fatiga causado por las cargas de rodadura en los pavimentos. Existe un mayor efecto de las cargas en los bordes y articulaciones que en el interior del mismo. (American Concrete Institute ACI, 2002)

Procedimiento de diseño:

Se establece que para realizar un diseño óptimo de espesor de pavimento se necesita considerar:

- La fuerza de sub-base, sub-rasante o la combinación de ambos esfuerzos.
- Características de los vehículos como lo son;
  - i. Carga de la rodadura
  - ii. Separación de los neumáticos
  - iii. Características de los neumáticos
  - iv. Número de repeticiones de cargas durante su diseño de vida
  - v. Resistencia de flexión de la mezcla CCR
  - vi. Módulo de elasticidad de la mezcla CCR

El grafico usualmente utilizado para realizar diseño de espesor se muestra en el gráfico 1. Para múltiples losas de pavimentos CCR usualmente se utiliza 10 pulgadas de espesor esto con el objetivo de lograr una mejor compactación. (ACI, 2002)

## 2.8. Consideraciones de diseño:

El diseño geométrico de los pavimentos de CCR se regula por medio de las prácticas estándares para concreto convencional. Los diseños irregulares se encuentran limitados de tamaño y los accesos requieren de utilizar pavimentos de concreto convencionales. (ACI, 2002)

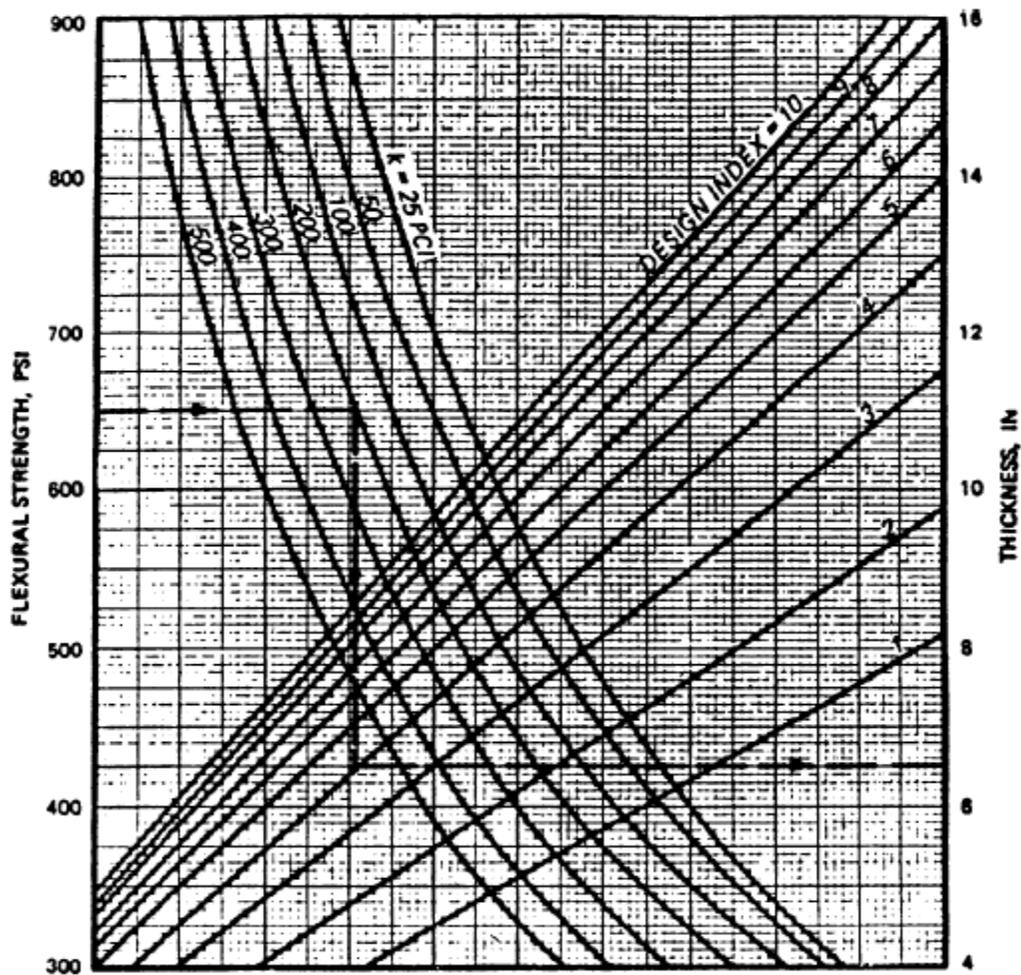


Gráfico 1: gráfico de diseño para pavimentos RCC.  
Fuente: ACI (2002)

El diseño de pavimento de concreto compactado con rodillo puede variar según el uso, entre los usos en los que este tipo de pavimento funciona son;

- Puertos y parqueos industriales
- Aeropuertos
- Calles principales
- Hombros de carreteras
- Sistema de multicapas para uso de alta velocidad
- Carreteras terciarias

Cada una de estas aplicaciones posee diferentes características físicas, soporte de cargas, tipos de tráfico, diseño de pavimento y tipo de juntas. A continuación, se presenta un cuadro con un breve resumen sobre las características que presenta cada uso en este tipo de pavimentos.

Tabla 2: usos comunes de concreto compactado con rodillo.

USOS COMUNES DE CONCRETO COMPACTADOS CON RODILLO					
Uso	Descripción	Tipo de tráfico	Diseño	Características superficiales	Tipo de juntas
<b>Puertos y parques industriales</b>	Son áreas grandes que no cuenta con obstáculos que puedan llegar a retrasar el proceso de construcción, estos son capaces de soportar cargas de 30 a 60 kips en cada neumático donde el espesor es mayor o igual a 25.4 cm ( 10 in).	*Contenedores y camiones pesados	*Cuerpo del ejército de EE.UU. de Ingenieros ( USACE ) *Método RCC-PAVE *StreetPave o WinPas *ACI 325.12R-02	*Velocidades menores de 48.3 km/h. *La superficie posee una homogeneidad de 9.5mm (3/8")	* Deben existir juntas tanto transversales como longitudinales de 4.6 m a 5 m cuando el espesor es menor a 20.3 cms.
<b>Aeropuerto</b>	Pavimentos que soporta grandes cargas, como cargas de nieve y estacionamiento del aeropuerto.	*Áreas de mantenimiento *Estacionamiento del aeropuerto *Almacenamiento de la nieve	*Método RCC- PAVE * StreetPave o WinPas *ACI 325.12R-02	*Bajas velocidades *La superficie no requiere de una homogeneidad específica. *Utiliza sistema de multicapas.	*Las juntas son necesarias para evitar fisuras y razones estéticas en los estacionamientos.
<b>Calles Principales</b>	Se utiliza para pavimentos en calles arteriales donde existen factores restrictivos de tráfico y tiempo, pues su forma constructiva es rápida disminuyendo de esta forma costos y tiempo.	*Autobuses *Automóviles livianos *Vehículos pesados	* StreetPave o WinPas *ACI 325.12R-02	*Por las altas velocidades que se tiene en las calles principales, se les debe proporcionar tratamiento superficial con una capa de rodadura de asfalto de espesor de 5.1 a 7.6 cm. *Si el espesor del pavimento es mayor de 25.4 cm, puede ser construido por medio de sistemas multicapa.	* Deben existir juntas tanto transversales como longitudinales de 4.6 m a 5 m cuando el espesor es menor a 20.3 cms. *Si se utiliza el sistema multicapa las juntas constructivas se trabajan de la misma forma que el pavimento de concreto convencional
<b>Hombros de carreteras</b>	Utilizado para aplicaciones de carreteras como bases y construcción de hombros por su pronta sistema constructivo. Este por su resistencia y su velocidad de construcción se utiliza como base estable el cual puede cubrirse con asfalto o concreto convencional proporcionando una vida útil mayor sin necesidad de mayor mantenimiento.	*Autobuses *Automóviles livianos *Vehículos pesados	* StreetPave o WinPas *ACI 325.12R-02	*La superficie posee una homogeneidad de 9.5mm (3/8").	*Los hombros no necesitan juntas transversales ni longitudinales. *Para ampliaciones en carreteras las juntas transversales se realizan en la misma línea principal.
<b>Sistema de multicapas para uso de alta velocidad</b>	Utilizado como base para pavimentos de asfalto o concreto de tráfico de alta velocidad reduciendo el espesor de la capa de pavimento. Este sistema necesita una capa de separación entre la base de multicapas y el pavimento de asfalto o de concreto, esta puede ser una capa de tela de geotextil. Este tiene usos para autopistas, aeropuerto, áreas industriales.	*Autobuses *Automóviles livianos *Vehículos pesados	* StreetPave o WinPas *AASHTO 93 Guía de diseño	*La superficie posee una homogeneidad de 9.5mm (3/8"). *Superficie de concreto o asfalto convencional de rodadura.	* Deben existir juntas tanto transversales como longitudinales de 4.6 m a 5 m cuando el espesor es menor a 20.3 cms. *Las juntas constructivas se trabajan de la misma forma que el pavimento de concreto convencional

Fuente: elaboración propia (2017)

## **2.9. Características de superficie**

- La mezcla es más inconsistente en su superficie en comparación con el pavimento de concreto convencional, en su superficie presenta menos fisuras, grietas, espacios vacíos o marcas de neumáticos visualmente en esta característica más al pavimento de asfalto. (Universidad del estado de Iowa,2010)
- Pavimento para velocidades menores a 50 km/h. (Universidad del estado de Iowa,2010)
- Si se tienen previstas velocidades mayores a 50 km/h, considerar una superficie superior de asfalto o la técnica de Multicapas de pavimentos la cual permite tener vías de altas velocidades. (Universidad del estado de Iowa,2010)

## **2.10. Tipo de juntas**

### **2.10.1. Juntas transversales**

- Según la guía para pavimentos de concreto compactado con rodillo las juntas transversales son el tipo de juntas formadas en los extremos de los carriles de pavimentación perpendiculares a la dirección de pavimentación.  
Usualmente en pavimentos de concreto compactado con rodillo solo existen juntas trasversales frías porque se realizan hasta que se tiene construido la longitud específica del carril. Típicamente estas juntas se realizan en intervalos de 6.1 mts para pavimentos de espesor menor a 20 cms y para pavimentos mayores a 20 cms es de 3 a 4 veces en pies su espesor en pulgadas.

### 2.10.2. **Juntas longitudinales**

Según La guía para pavimentos de concreto compactado con rodillo las juntas longitudinales son las que se forman entre la pista de pavimentación adyacentes a la dirección de pavimentación. Típicamente estas juntas se realizan en intervalos de 4.6 mts a 6.1 mts para pavimentos de espesor menor a 20 cms y para pavimentos mayores a 20 cms es 2.5 veces en pies su espesor en pulgadas.

Existen dos tipos de juntas longitudinales;

- Juntas longitudinales fresca; se forma entre líneas continuas adyacentes de pavimentación cuando el intervalo de tiempo entre colocación y compactación no es mayor a 60 minutos.
  
- Junta longitudinal fría; se forma entre líneas continuas adyacentes de pavimentación cuando el intervalo de tiempo entre colocación y compactación supera los 60 minutos, usualmente estas se encuentran planificadas.

## **CAPITULO III. DISEÑO DE MEZCLA**

### **3.1. Selección de materiales para CCR**

Según ACI 325.10R-95 la selección de materiales para la mezcla de CCR es de vital importancia para cumplir con las especificaciones de durabilidad, trabajabilidad, densidad y resistencia de la mezcla. Los materiales utilizados para dicha mezcla son; agua, material cementicio, aditivos, granulometría de agregados (agregados finos y gruesos). Cada uno de estos obedece a especificaciones constructivas establecidas para soportar los esfuerzos de compactación causados por los rodillos neumáticos vibratorios de goma. El 85% de la mezcla está conformada por los agregados gruesos y finos, son estos los responsables de la consistencia de la misma. (ACI, 2001)

### **3.2. Agregados gruesos**

Según la guía para pavimentos de concreto compactado con rodillo, este tipo de agregado está conformado por grava, grava triturada, piedra triturada o una homogénea combinación de estos, conforme a las especificaciones y requisitos proporcionados en la normativa NTG-41007 "Agregados para concreto" (ASTM C-33)

Si la mezcla contiene grava sin triturar usualmente necesita menor cantidad de agua para lograr una consistencia necesaria para soportar esfuerzos de compactación sin embargo si posee grava triturada, requiere mayor esfuerzo para compactarse esto le proporciona la cualidad de ser más estable durante su compactación generando mayor resistencia a la flexión. Se debe utilizar un tamaño nominal máximo del agregado de 3/4" (75mm) y un mínimo de 3/16"(4.75mm) para evitar el contenido de vacío en los agregados y tener una buena consistencia de mezcla minimizando la segregación durante el acarreo y colocación de concreto compactado con rodillo proporcionando una superficie de apariencia lisa. (ACI, 2001)

### **3.3. Agregados finos**

Este tipo de agregado está conformado por arena natural libre de impurezas y material orgánico, la más recomendada para este tipo de mezcla debido a que posee la característica de ser más redondeada angularmente para formar una superficie sólida, mientras la arena manufacturada, necesita de una combinación de agregados gruesos clasificados y cemento para cumplir con densidad requerida. La cantidad total graduada recomendada es un 2% a 8% que pase el tamiz No.200 (75 micras) con el fin de lograr una superficie suave y cerrada evitando limos y arcillas pues esto suelen aumentar la contracción y reducir la fuerza del pavimento. El material más fino puede utilizarse como material mineral disminuyendo la cantidad de material cementante en la mezcla si estas no son plastificantes, con la graduación adecuado de agregado grueso provoca una mezcla capaz de ser compactada y duradera. (Yoon moon Chun, Tarun R. Naik, and Rudolph N. Kraus,2008)

La selección adecuada de este agregado puede llegar a prevenir costos elevados en la mezcla debido que de este material depende la cantidad de agua y cemento necesaria para lograr durabilidad, compactación y suavidad de la superficie del pavimento. (Universidad del estado de Iowa,2010)

Tanto los agregados gruesos como finos son estandarizados por medio de la normativa NTG-41007 “Agregados para Concreto. Especificaciones” (ASTM C 33) donde son especificados características físicas, químicas, para verificar la calidad tanto de la agregado fino como del agregado grueso, para obtener una combinación y dosificación adecuada alcanzando características como lo es asentamiento que tiende a cerob, capaz de soportar la compactación del rodillo sobre la mezcla de CCR. (PCA, 2006)

Tabla 3: muestra recomendaciones para la graduación en mezclas de CCR.

TAMAÑO	PORCENTAJE QUE PASA POR PESO	
	MINIMO	MAXIMO
1-in (25 mm)	100	100
3/4-in. (19 mm)	90	100
1/2-in. (12.5 mm)	70	90
3/8-in. (9.5 mm)	60	85
No. 4 (4.75 mm)	40	60
No. 16 (1.18 mm)	20	40
No. 100 (150 $\mu$ m)	6	18
No. 200 (75 $\mu$ m)	2	8

Fuente: elaboración propia (2017)

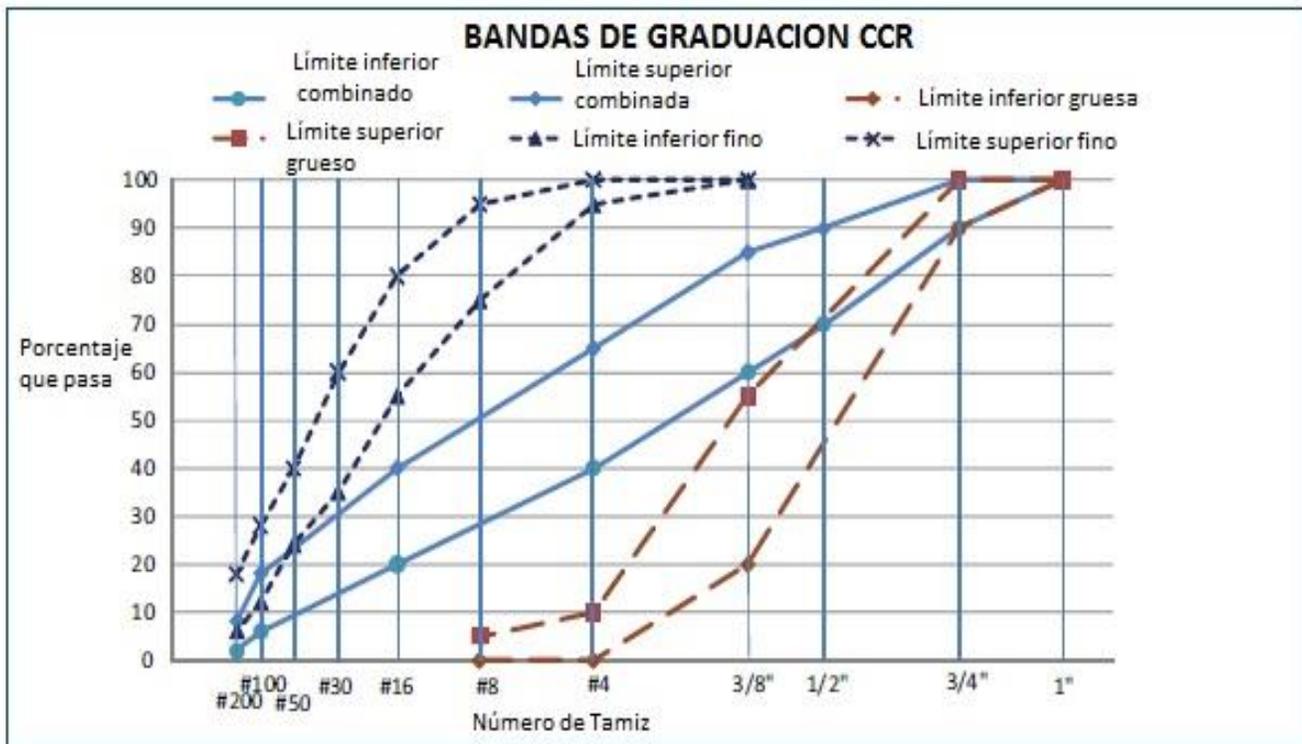


Gráfico 2: gráfico de límites de graduación de agregados para pavimentos RCC.  
Fuente: Universidad del Estado de Iowa (2010)

### **3.4. Material cementantes**

La selección de cemento adecuado para la mezcla es seleccionada a partir del diseño de mezcla y vida útil con la cual será diseñada. Los cementos usualmente utilizados para CCR son cemento portland o cemento hidráulico que incluyan puzolana o escoria molida, para determinar qué tipo concierne más al tipo de mezcla deseada consultar especificaciones en ACI 225R. En la actualidad los cementos más utilizados para este tipo de pavimentos son cementos tipo I o tipo II Portland pues cumplen con la resistencia química a ataques de sulfato, reactividad alcalina y resistencia a la abrasión. Siempre se debe verificar que cualquier tipo de cemento cumpla con la normativa NTG-41095 “Cementos hidráulicos” o en su efecto normativa ASTM C 150 para cemento portland. Especificaciones por desempeño” (ASTM C 1157) para cemento hidráulico (ACI, 2001).

#### **3.4.1. Fly Ash**

Para adicionar y asegurar a la mezcla una compactación adecuada se utilizan las cenizas volantes obtenidas de escorias de altos hornos en especial en aquellas mezclas que contengan menor cantidad de agregados finos. Usualmente estas constituyen de un 15% a un 20% del volumen total de los materiales cementantes en una mezcla de CCR. El uso de esta ayuda a la colocación de la mezcla debido a que necesitan menor cantidad de agua para lograr densidad óptima logrando mayor trabajabilidad e incrementa la resistencia de la mezcla por sus propiedades puzolánicas. En algunos casos este material puede llegar a sustituir parcialmente el agregado fino en una mezcla. Usualmente las cenizas volantes empleadas son de clase F o clase C. La selección de estos se basa en la normativa ACI 226R donde es especificado los usos correctos de las cenizas volantes. En ciertas ocasiones se utiliza escoria de alto horno y fosfato Gypsum Blast para aumentar el tiempo de fraguado de la mezcla durante su colocación. (Yoon moon Chun, Tarun R. Naik, and Rudolph N. Kraus,2008)

### **3.5. Agua**

El contenido de agua depende generalmente de los agregados finos y gruesos como también de los aditivos químicos utilizados en la mezcla de CCR. Es por lo que la dosificación de agua se basa en la densidad para alcanzar compactación adecuada siendo esta la razón para mantener control de calidad en la humedad de todos los agregados satisfaciendo con requisitos de compactación. (PCA, 2006)

Según la norma NTG 41073 “Agua de mezcla para uso en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones (ASTM C 1602) el agua dosificada a la mezcla debe cumplir con:

1. “El agua dosificada (El agua pesada o medida a través de la unidad dosificadora de la planta.)”
2. “El agua libre contenida en los agregados.”
3. “El agua introducida por el uso de aditivos cuando esta agua incrementa la relación agua-materiales cementantes, en más de 1%”

Y cumplir con los límites expuestos en el siguiente cuadro.

Cuadro 1: límites químicos opcionales para el agua de mezcla combinada

	Límites	Métodos de ensayo
Máxima concentración en el agua de mezcla combinada, ppm <sup>B</sup>		
A. Cloruro como Cl; ppm		
1. En concreto pro esforzado, tableros de puentes u otros usos designados	500 <sup>C</sup>	(ASTM C114)
2. Concreto reforzado en ambientes húmedos o conteniendo inserciones de aluminio o de metales disimiles o con formaletas de metal galvanizado que permanecen en el lugar.	1000 <sup>C</sup>	(ASTM C114)
B. Sulfato como SO <sub>4</sub> , ppm	3000	(ASTM C114)
C. Álcalis como (Na <sub>2</sub> O + 0.658K <sub>2</sub> O), ppm	600	(ASTM C114)
D. Sólidos tales por masa, ppm	50000	(ASTM C1603)

<sup>A</sup> Los límites de especificación de esta Tabla, pueden ser especificados como ítems individuales o en su conjunto como lo indica el numeral 6.16 de la especificación NTG 41068 (ASTM C94/C94M)

<sup>B</sup> ppm es la abreviatura de partes por millón.

<sup>C</sup> Los requisitos para concreto de ACI318 deben gobernar, cuando el fabricante pueda demostrar que los límites indicados para el agua de mezcla, pueden ser excedidos. Para condiciones que permitan el uso de aditivo de cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) acelerante, el límite sobre cloruro puede ser descartado por el comprador.

Fuente: Norma Técnica Guatemalteca 41073 (SIF)

### 3.6. Aditivos químicos

Los aditivos químicos en mezclas de concreto son utilizados para modificar sus propiedades físico-químicas para lograr mezclas adecuadas a las características que cada proyecto busca, cumpliendo con los requerimientos económicos y mano de obra. (ACI 212,1999)

ACI 325 indica que los aditivos químicos más utilizados y beneficiosos para mezclas CCR son;

- **Aditivos reductores de agua:** este tipo de aditivo ayuda a reducir la relación agua/cemento provocando que el concreto posea mayor trabajabilidad debido a que produce un efecto de superficie, el cual se da cuando se reduce la atracción entre las partículas de agua y cemento causando la exudación, disminuyendo la

cantidad de agua a dosificar en la mezcla. Provocando una menor relación de agua/cemento aumenta la resistencia a compresión al mismo tiempo reduce la permeabilidad de la mezcla. Como un efecto secundario puede provocar retardar el tiempo de fraguado sin embargo esto se encuentra estrechamente relacionado con los agregados utilizados para realizar la mezcla (ACI 212,1999). Para cumplir con especificaciones requeridas para mezclas de CCR verificar en NTG 41070 “Aditivos químicos para concreto. Especificaciones” (ASTM C 494) y ASTM C94 para especificaciones de aditivos químicos para concreto.

- **Aditivos retardantes:** utilizados para tener mayor cantidad de tiempo de duración tanto durante su acarreo y su colocación previniendo utilizar juntas frías en su estructura, esta característica causada por el aumento del periodo de plasticidad también propiciando el decremento de la pérdida de revenimiento y mayor trabajabilidad en climas calientes, largas distancias en su transporte (ACI 325,2001). Su efecto en la mezcla depende de la cantidad y tipo de agregado que se proporcione a la mezcla. Para cumplir con especificaciones requeridas para mezclas de CCR verificar en NTG 41070 “Aditivos químicos para concreto. Especificaciones” (ASTM C 494) y ASTM C94 para especificaciones de aditivos químicos para concreto.

Estos aditivos se suministran a las mezclas si cumplen con todos los parámetros y si sus beneficios son mayores que los costos que estos generan.

### **3.7. Métodos para dosificación de mezcla**

La dosificación de mezcla de concreto compactado con rodillo puede ser por diferentes métodos según el uso que se le proporcionará, para efecto de este documento se describirá únicamente el método compactación de suelo el cual es el más utilizado para pavimento de CCR.

#### **3.7.1. Método compactación del suelo**

Esta metodología se basa en la relación existente entre la densidad y contenido de humedad que posee una mezcla de CCR para determinar la máxima densidad por medio de la compactación de muestras tomadas en intervalos con contenido de humedad. Para llevar a cabo este método se debe seguir seis procedimientos, los cuales se describen a continuación.

##### **1. Selección de agregados graduados de manera correcta**

Optimizar los agregados de manera que la graduación, segregación y compactibilidad de estos sea la indicada para el tipo de mezcla a realizar, estos valores se encuentran descritos en el grafico 3 para mezcla de CCR, este grafico basado en PCA<sup>2</sup> 2006. Los valores mostrados son sugeridos sin embargo la curva de potencia 0.45 es un método bastante acertado para lograr definir una densidad máxima en cualquier tamaño máximo de agregado, con el objetivo de una producción de una mezcla que pueda ser compactada a la densidad máxima cuando son mezclados los agregados.

---

<sup>2</sup> PCA: Asociación de cemento portland

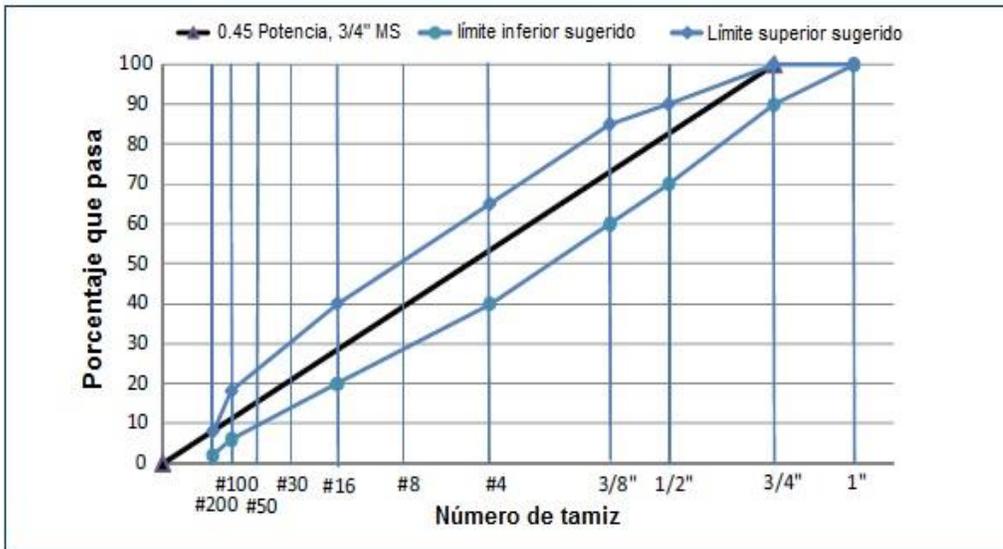


Gráfico 3: gráfico banda de graduación sugerida y curva de potencia 0.45.  
Fuente: Universidad del estado de Iowa (2010)

2. Selección de contenido cementicio de rango medio.

El contenido de materiales cementicios en cada mezcla es diferente y está definido por cada proyecto según especificaciones que a este respecto y consideraciones del ámbito económico, de ubicación y producción de la mezcla. La cantidad de este material está definido en porcentaje de materias secas, este es obtenido por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Material cementicio (\%)} = \frac{\text{Peso de material cementicio}}{(\text{Peso de material cementicio} + \text{peso de agregados secados al horno})} \times 100$$

3. Selección de intervalos de relación de humedad-densidad.

Desarrollar al menos tres intervalos con un porcentaje de materiales de cemento estables con distintos contenidos de humedad-densidad para desarrollar valores similares a los mostrados en el grafico 6, donde es sugerido que el contenido de humedad en los agregados debe variar en intervalos de 5 a 8 por ciento para lograr un contenido de humedad de la mezcla óptimo. Este contenido es calculado en base a la siguiente ecuación;

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso del agua}}{(\text{Peso de material cementicio} + \text{peso de agregados secados al horno})} \times 100$$

Dependiendo de los materiales cementicos y los agregados utilizados en la mezcla se puede considerar realizar método de ensayo diferente como los son;

- Método de ensayo Proctor modificado (ASTM D1557); utilizado para determinación de densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo. Se puede observar gráfico siguiente.
- Método de ensayo Proctor estándar (ASTM D 698); utilizado para evitar la fractura de los agregados durante la prueba. Se puede observar gráfico siguiente.

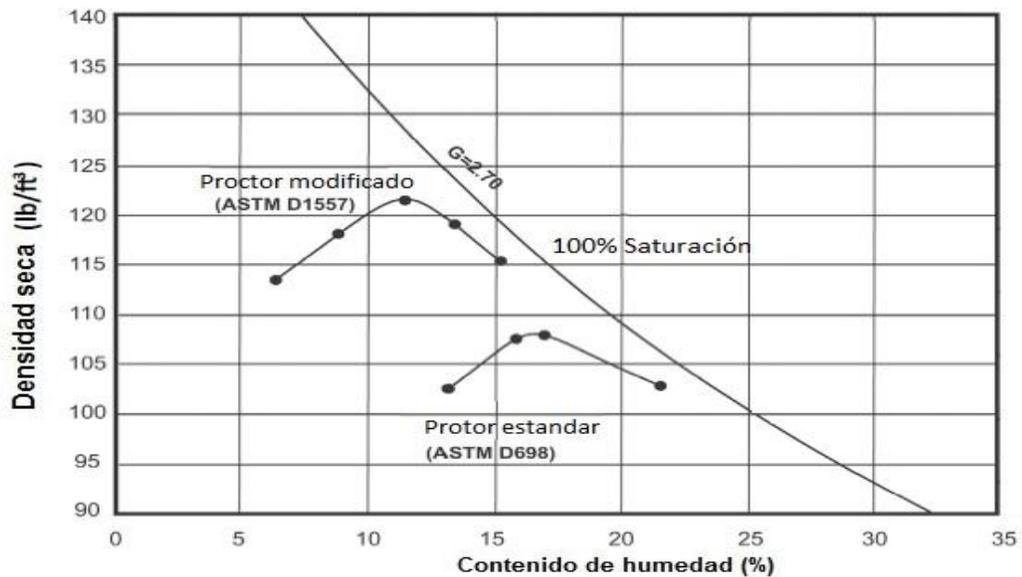


Gráfico 4: gráfico curva humedad – densidad proctor modificado y proctor estándar.  
Fuente: Universidad del estado de Iowa (2010)

- Método de prueba estándar para determinación de la consistencia y densidad de concreto compactado con rodillo con una mesa vibratoria NTG 41017 h 37 (ASTM C1170); utilizado para desarrollar la humedad en

relación de la densidad en CCR, este método descrito en el siguiente capítulo. Se puede observar gráfico siguiente.

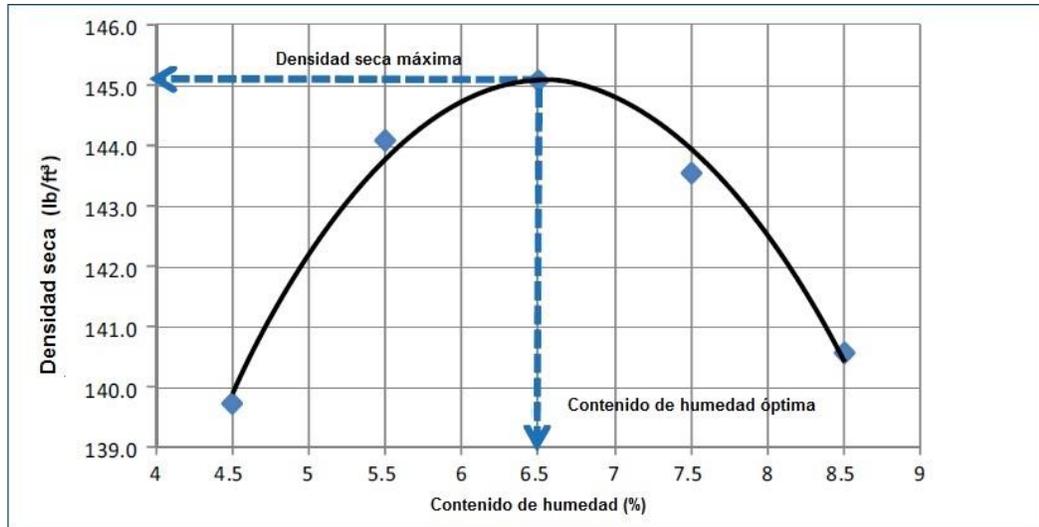


Gráfico 5: gráfico curva humedad – densidad.  
Fuente: Universidad del estado de Iowa (2010)

Selección muestras para medición de resistencia a la compresión.

La resistencia a compresión es determinada para cada uno de los contenidos de material cementicios con un porcentaje de humedad óptimo para cada muestra, este ensayo realizado por medio de método de mesa vibratoria NTG 41017 h 38 (ASTM C 1176), este descrito en el siguiente capítulo.

#### 4. Prueba de especímenes y selección de contenido cementicio.

Los datos de las muestras de cada contenido de cemento utilizados para obtener la resistencia a compresión son representados en gráficas, ya desarrolladas se obtiene la curva de contenido de cemento- resistencia a compresión y es determinada cual opción es la adecuada para el proyecto a ejecutar considerando que la resistencia requerida,  $f'_{cr}$ , sea igual a la resistencia especificada,  $f'_c$ , con factor de seguridad de resistencia.

## 5. Cálculo de proporción de mezcla.

Se considera que el contenido de cemento requerido no se modifique al utilizado durante las pruebas, si este varía significativamente se debe realizar otra prueba de relación humedad-densidad para determinar el contenido óptimo de humedad para la mezcla. Este también puede ser obtenido por medio de interpolación si el contenido óptimo de humedad no tiene varianza significativa a lo largo de intervalos de contenido de cemento utilizados durante los ensayos. Escogido un contenido de cemento y contenido de húmeda óptimo, ya es posible calcularlos en la mezcla. La humedad saturada y superficialmente seca de los agregados se aplica a los cálculos de volumen para determinar el peso.

### **3.8. Propiedades estructurales de CCR**

Las propiedades estructurales de pavimento CCR son estrechamente relacionadas y dependientes de la cantidad suministrada de cemento y el grado de compactación que sea proporcionado a la mezcla. Actualmente no se cuenta con ensayos y pruebas específicas para mezclas de este tipo en pavimentos sin embargo por sus características similares con el pavimento de concreto convencional, algunos de los ensayos realizados a este pavimento son aprovechados para la evaluación de la mezcla CCR también.

### **3.9. Módulo de elasticidad**

Esta propiedad en mezclas de CCR aún no tiene ensayos normados sin embargo utiliza los ya especificados para concreto convencional. En ensayos realizados a este tipo de pavimentos los valores obtenidos son similares o mayores a los obtenidos en pruebas en concretos convencionales pues tiene contenido cementante similar provocando que las deformaciones elásticas cuando son sometidas a tensión sean parecidas. (Universidad del Estado de Iowa, 2010).

Esta relación se describe de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

E= módulo de elasticidad(Psi)

$\varepsilon$  = tensión (psi)

$\sigma$ = deformación(pulg/pulg)

### **3.10. Resistencia**

Esta propiedad depende de la cantidad de materiales cementantes, la relación agua/cemento, calidad de agregados y grado de compactación del concreto compactado con rodillo (Universidad del estado de Iowa,2010).

### **3.11. Resistencia a la adherencia**

En los pavimentos de CCR esta propiedad posee una gran importancia pues determina si el pavimento se comporta como una sola capa o como una unión de capa sobre capa, considerando que la unión de varias capas tiene menos resistencia que una única capa del tamaño del espesor.

Una buena adherencia se obtiene por medio de la colocación de pavimentos haciendo que esta dependa del tiempo que no debe sobre pasar entre cada unión más de una hora sin embargo si esta construcción se realiza en clima cálidos la colocación debe tardar menos tiempo para evitar juntas frías en cada unión. (Universidad del Estado de Iowa,2010)

### **3.12. Durabilidad**

La durabilidad de CCR en la actualidad únicamente es medida por medio del rendimiento de la mezcla en la colocación en el campo, es por eso que los factores determinantes para lograr la durabilidad a la cual fue diseñado considera los materiales utilizados y el proceso constructivo.

Esta propiedad se atribuye al bajo contenido de humedad y la alta densidad de la mezcla siendo esta la razón que por medio de proporcionarle al pavimento mantenimientos adecuados pueda llegar a durar hasta treinta años.

Se considera otro factor determinante el curado adecuado del pavimento y es en esta parte donde se consideran los aditivos químicos para cumplir con el objetivo y asegurar la compatibilidad con la mezcla, el aditivo más utilizado en climas con temperaturas bajas es el inclusor de aire debido a que estos forman un sistema de vacíos de aire suficientemente estable pues el factor de separación entre cada burbuja de aire oscila en un espacio de por lo menos 250 micras evitando micro fisuras internas en el pavimento. (Universidad del estado de Iowa,2010)

### **3.13. Permeabilidad**

Esta propiedad depende de tres aspectos muy importantes;

- Dosificación de la mezcla
- Método de colocación
- Grado de compactación

Estos aspectos pueden llegar a generar espacios vacíos en la mezcla de concreto compactado con rodillos y aumentar o disminuir la porosidad que esta tenga. (Universidad del Estado de Iowa,2010).

### 3.14. Compresión

La resistencia a compresión en concretos compactados con rodillo se debe a los agregados graduados. La baja relación de agua/cemento proporciona una baja porosidad aumentando su compresión y manteniendo una humedad óptima para obtener una densidad capaz de soportar el rodillo. Se puede llegar a tener una resistencia a compresión a los 28 días es entre un rango de 28 a 41 Mpa (4,061 a 5,946 Psi). (Universidad del estado de Iowa,2010).

### 3.15. Flexión

Por la proporción de la mezcla CCR la flexión es analizada por medio de la base de las vigas y muestras tomadas en los proyectos de CCR en pavimentos, es importante resaltar que aún no existen ensayos estandarizados para obtener muestras para la fabricación de vigas en campo y laboratorio sin embargo la mezcla puede llegar a tener una fuerza a flexión similar al concreto convencional. La fuerza es determinada según su diseño de mezcla pero en proyectos realizados esta prueba se concluye que la relación entre la resistencia compresión y resistencia a la flexión es similar a la obtenida en concreto convencional, a los 28 días generalmente oscila entre 3.5 Mpa a 7 Mpa (507psi 1015 psi ). ((Universidad del estado de Iowa,2010).

Esta relación se describe de la siguiente manera:

$$Fr = C\sqrt{fc}$$

Donde:

Fr= resistencia a flexión, psi(Mpa).

Fc= resistencia a la compresión, psi(Mpa).

C= una constante entre 9 y 11 la cual depende de la mezcla real de CCR.

### **3.16. Control de calidad CCR**

Para pavimentos de concreto compactado con rodillo se realizan tramos de prueba que cumpla con todos los materiales, métodos constructivos que se utilizaran para toda el área a pavimentar. La extensión de estos depende de la experiencia del ingeniero constructor cuyo objetivo es;

- Validar el diseño (evaluar la base junto con controles de calidad en los materiales),
- Método de construcción (capacidad de mezcla en planta, dosificación de la misma, almacenamiento, manipulación y transporte, colocación y compactación)
- El proceso por utilizar para el curado
- Juntas constructivas
- Tipo de equipo y análisis tanto de calidad en planta como en laboratorio.

#### **3.16.1. Equipo de calidad y control**

Los controles de calidad son necesarios en todo proyecto con el objetivo que los ingenieros constructores, contratistas y propietarios pueda tener constancia de la calidad y control del pavimento de concreto compactado con rodillo. Estas se componen por diversos pruebas y observaciones cuya finalidad es garantizar tanto el pavimento como su tiempo de vida con exactitud para el cumplimiento de normativas en campo como en laboratorio realizado por personas especializadas y con experiencia. El control y calidad dependerán de la extensión del proyecto, ubicación y su naturaleza.

### **3.17. Control de calidad en campo y laboratorio**

#### **3.17.1. NTG 41017 h 37 (ASTM C 1170) Método de ensayo. Determinación de la consistencia y densidad del concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria.**

Este ensayo es realizado a concreto recién mezclado con agregado de tamaño nominal máximo de 50 mm (2pulg) o menor, empleado para la determinación de la consistencia del concreto utilizando una mesa vibratoria con una sobrecarga para medir consistencia y la densidad de un espécimen por medio de la determinación de la masa del espécimen consolidado dividiéndolo entre su volumen en de mezclas de concreto secas a extremadamente secas. Esta práctica aplica principalmente para ensayos de concreto compactado con rodillo sin embargo puede utilizarse para otro tipo de mezclas cementicos.

Esta práctica se puede realizar con dos métodos diferentes dependiendo si la mezcla de concreto con consistencia extremadamente seca o de una consistencia seca, el primero utiliza una masa de sobrecarga de 50 lbs.(22.7 Kg) mientras que la masa para consistencia seca con una sobrecarga de 27.5 lbs.(12.5Kg) colocando ambos pesos sobre la parte superior del espécimen a ensayar. El equipo para la realización de esta prueba se puede observar en la figura.

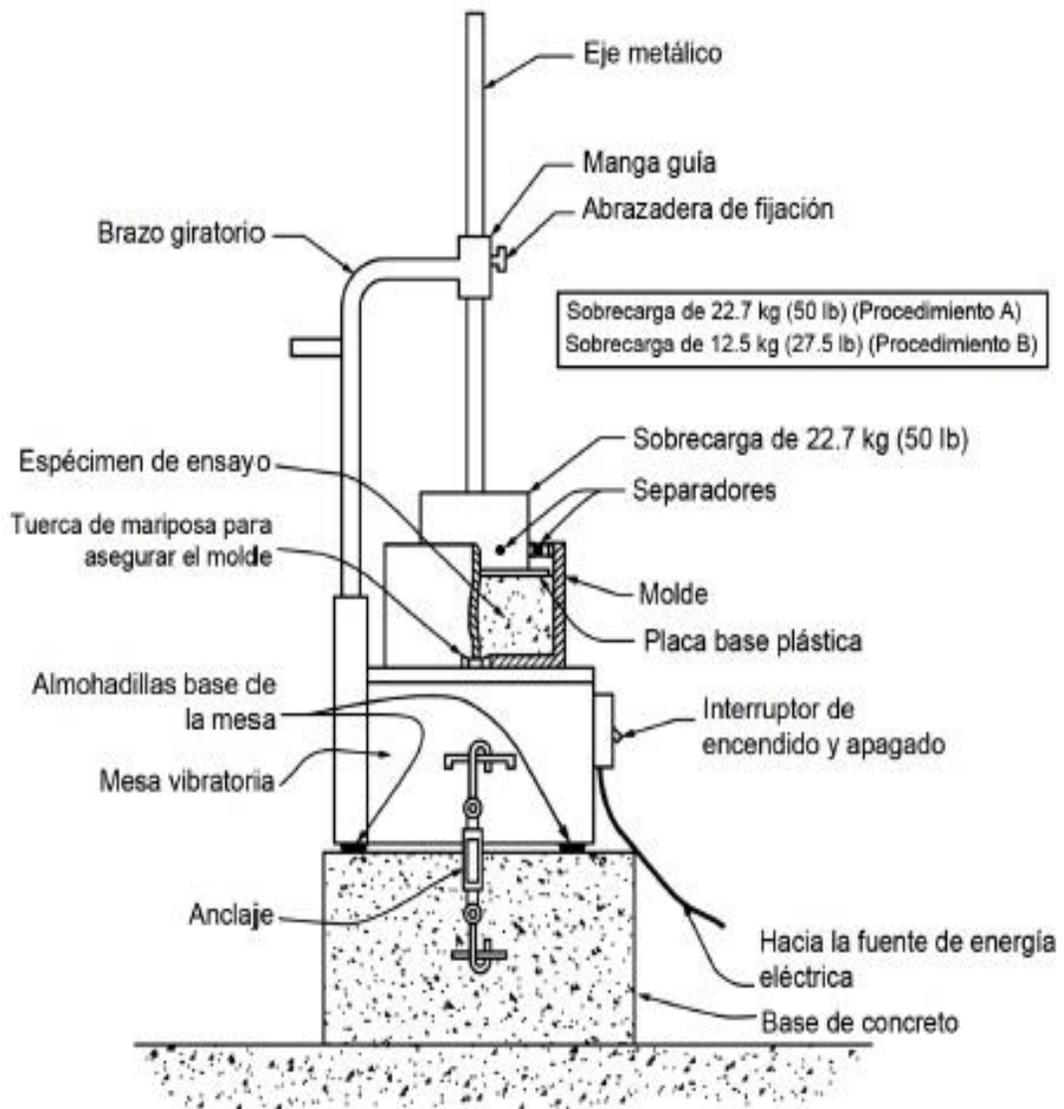


Figura 3: mesa vibratoria para el ensayo de consistencia.  
Fuente: NTG 41017 h 37 (SIF)

**3.17.2. NTG 41017 h 38 (ASTM C1176) Práctica estándar para la elaboración de especímenes cilíndricos de concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria.**

Este ensayo es realizado para la elaboración de especímenes cilíndricos de concreto recién mezclado con agregado de tamaño nominal máximo de 50 mm (2pulg) o menor, utilizando una mesa vibratoria consolidando los cilindros con una carga de 20 Lbs, cuando no es posible practicar procedimientos estándares de apisonamiento y vibración interna establecidos en la normativa NTG 41061 (ASTM C31). Si el agregado es mayor a 50mm (2pulg) o igual los especímenes se deben realizar según la normativa NTG 41057 (ASTM C172). Esta práctica aplica principalmente para ensayos de concreto compactado con rodillo sin embargo puede utilizarse para otro tipo de mezclas cementicios.

Este procedimiento puede ser realizado con dos métodos diferentes, siempre utilizando una mesa vibratoria:

- Método A: elabora especímenes de ensayo con moldes reutilizables de acero los cuales esta unidos a la mesa vibratoria.
- Método B: elabora especímenes de ensayo con moldes no reutilizables de plástico los cuales se han introducido en el interior de forros metálicos el cual esta unidos a la mesa vibratoria.

El equipo para la realización de esta prueba se puede observar en la figura.

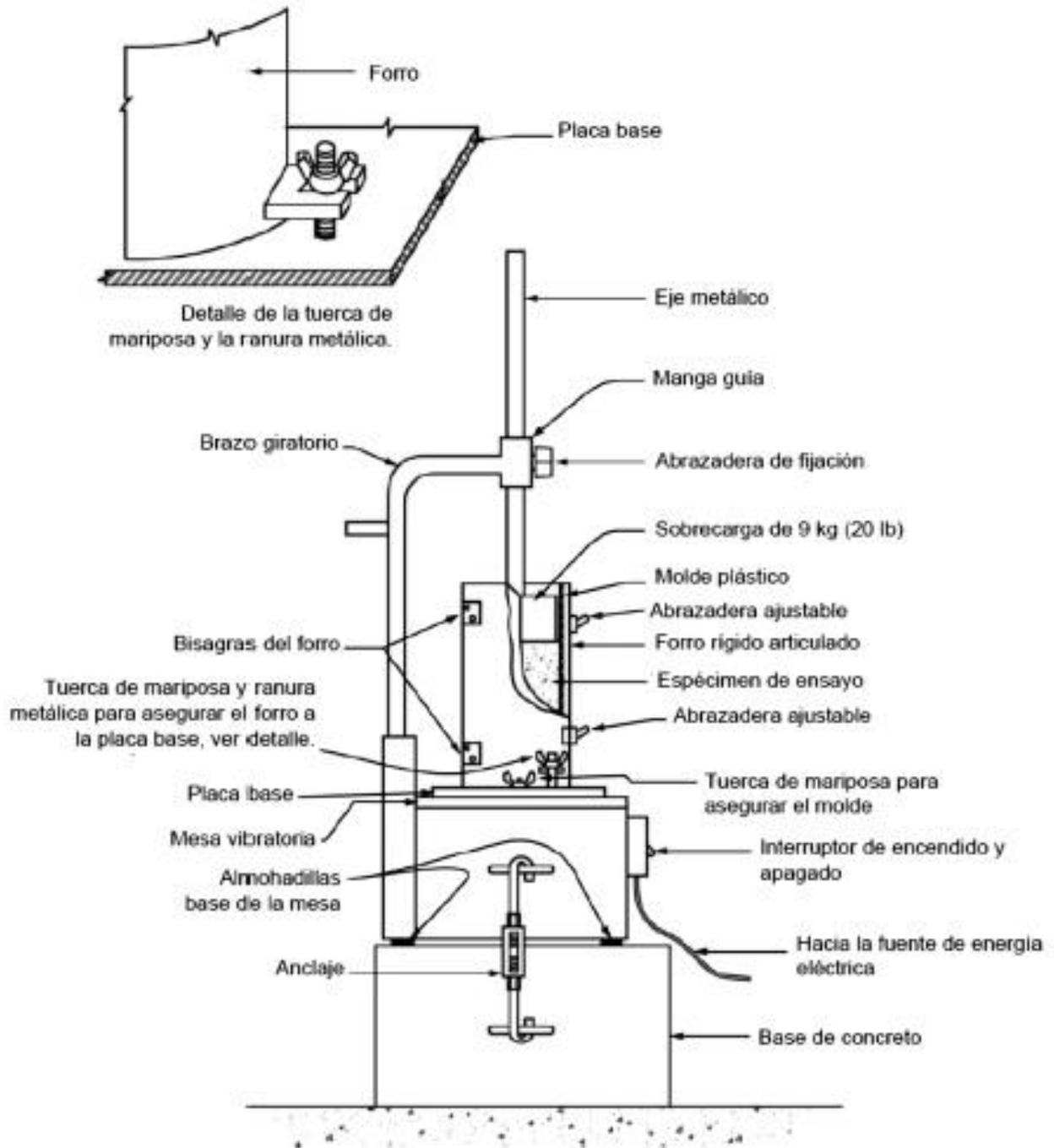


Figura 4: mesa vibratoria: Preparación del cilindro (Molde Tipo B)  
 Fuente: NTG 41017 h 38 (SIF)

**3.17.3. NTG 41017 h 39 (ASTM C1245) Método de ensayo.  
Determinación de la resistencia relativa de unión entre capas  
endurecidas de concreto compactado con rodillo. (Ensayo de carga  
puntual)**

Este ensayo describe la elaboración de especímenes de concreto compactado con rodillo para determinar la unión relativa entre capas endurecidas de concreto compactado con rodillo u otro tipo de concreto construido en forma de múltiples capas por medio de ensayos de carga puntual en la junta por medio de núcleos perforados o cilindros moldeados donde la superficie de unión es perpendicular al eje longitudinal a la mitad de la longitud de espécimen, produciendo un esfuerzo de tracción perpendicular a la junta de superficie por la aplicación de la carga puntual en esta junta. Esta práctica aplica principalmente para todo tipo de concreto compactado con rodillo por capas en donde el espesor total del espécimen cumple con requisitos mínimos de longitud y diámetro.

El equipo para la realización de esta prueba se puede observar en la figura.

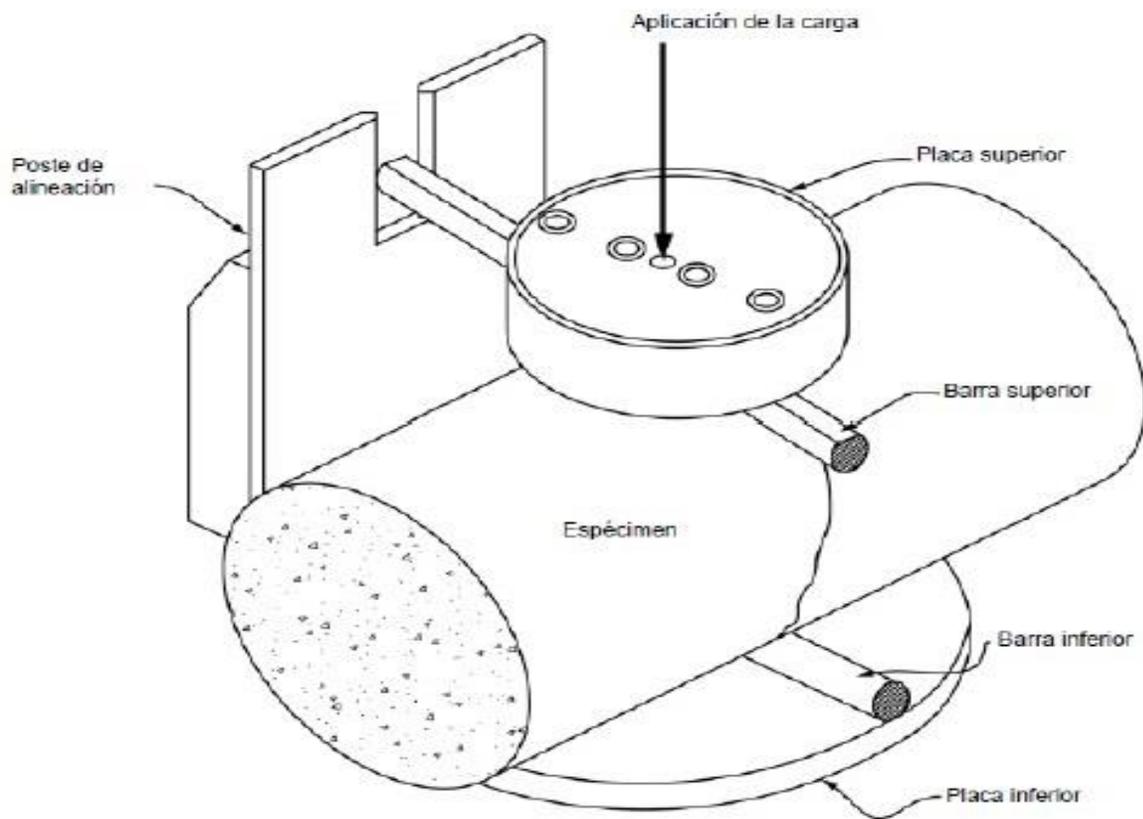


Figura 5: esquema del método de carga.  
Fuente: NTG 41017 h 39 (SIF)

**3.17.4. NTG 41017 h 40 (ASTM C1435) Práctica estándar para elaborar especímenes cilíndricos de concreto compactado con rodillo utilizando un martillo vibratorio.**

Este ensayo describe la elaboración de cilindros de concreto recién mezclado utilizando martillo vibratorio eléctrico equipado con un eje y una placa circular moldeados verticalmente en moldes cilíndricos compactando la mezcla de concreto seca a muy seca en cuatro capas, esto cuando no se puede elaborar procedimientos de apisonamiento y vibración establecidos en norma NTG 41061(ASTM C31) y NTG 41017 h38 (ASTM C 1176). Esta práctica aplica principalmente para ensayos de concreto compactado con rodillo sin embargo puede utilizarse para otro tipo de mezclas cementicias. Estos utilizados para ensayar la compresión o resistencia a la tracción del concreto.

El equipo para la realización de esta prueba se puede observar en la figura.

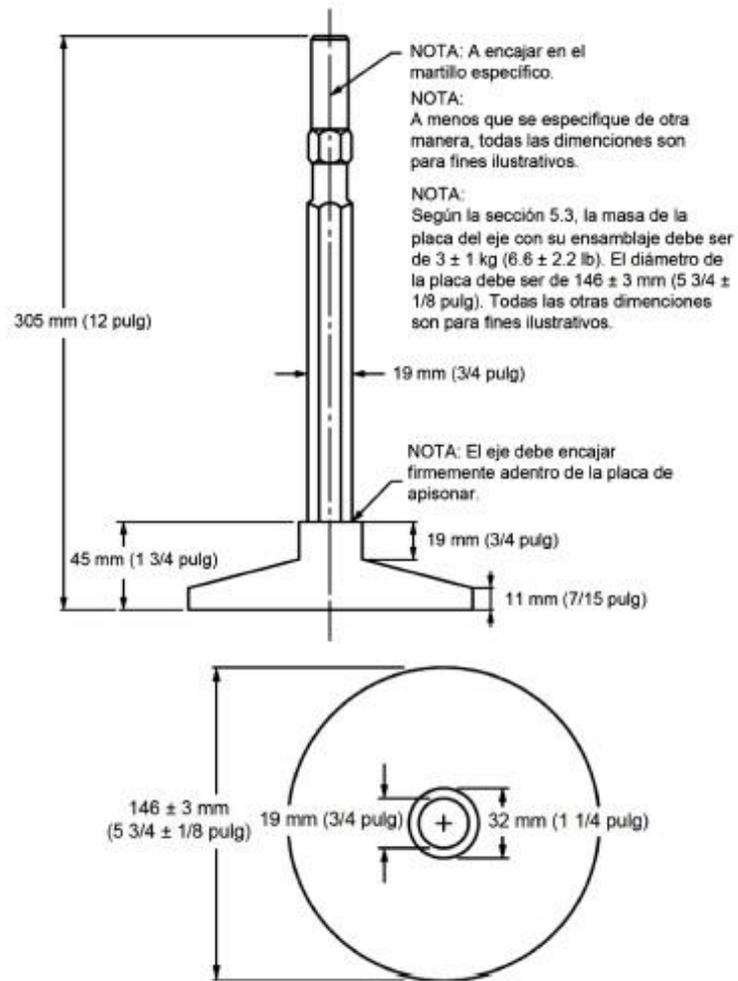


Figura 6: placa circular de apisonar de acero y el eje metálico.  
Fuente: NTG 41017 h 40 (SIF)

Según la guía ACPA de especificación para pavimentos concretos compactados con rodillo para cumplir con la calidad de la mezcla en campo se debe considerar las siguientes pruebas para garantizar que la mezcla de concreto compactado con rodillo sea colocada, compactada y curada adecuadamente con los parámetros con los cuales fue planificada y diseñada.

Contenido de humedad en Campo, esta prueba se realiza mediante:

- 3.17.5. La normativa NTG 41010 h19 (ASTM C566) Método de ensayo. Determinación por secado del contenido total de humedad evaporable en el agregado

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad de humedad evaporable en una muestra de mezcla por el secado de la humedad superficial como de la humedad dentro de los poros de la mezcla. El equipo necesario para realizar este ensayo es; una balanza, fuente calor(placa eléctrica o de gas, lámparas de calor eléctricas o un horno microondas), recipiente para la muestra. La muestra se obtiene en el punto de colocación desde el inicio de la descarga de la muestra y la cantidad es la que se considere necesaria para realizar el ensayo. El resultado esperado es  $\pm 1\%$  del contenido de humedad óptimo según la normativa ASTM D1557.

Densidad de la mezcla en campo, mediante la normativa:

- 3.17.6. ASTM C1040 Método estándar para la densidad en sitio de concreto no endurecido y endurecido

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad en sitio de concreto no endurecido o endurecido con radiación gama haciendo que esta prueba no sea destructiva. El equipo necesario para realizar esta prueba es; fuente gama, detector de fuente gama, sonda de transmisión directa, instrumento de lectura resistente a humedad y polvo, una placa guía de la densidad requerida o diseñada. La muestra se obtiene inmediatamente después que inicia la pavimentadora y dentro de los primeros 30 minutos de la compactación final,

se debe realizar una prueba por cada compactación. El resultado esperado debe ser al menos el 98% de la densidad obtenida en laboratorio por el método ASTM D 1557.

Espesor en Campo, esta prueba se realiza mediante:

- 3.17.7. La normativa NTG 41049 h19 (ASTM C42) Método de prueba estándar para obtener y probar núcleos perforados y vigas aserradas de concreto

El objetivo de este ensayo es para obtener, preparar y ensayar núcleos perforados de concreto para determinar su longitud, resistencia a compresión o resistencia a tracción indirecta. El equipo necesario para realizar este ensayo es; taladro de núcleos y una sierra. La toma de muestras debe ser por cada dos producciones de mezcla o bien un día de producción esto depende de la magnitud del proyecto y se considera la menor. El resultado esperado después de la compactación no debe ser menor de  $\frac{1}{4}$ " (6mm) bajo el grosor del concreto compactado con rodillo según fue diseñado el pavimento

La superficie de los pavimentos de concreto compactado con rodillo debe probarse con una regla de 3 metros y no debe variar mas de 9 mm desde cualquier punto que se coloque la regla y esta no debe variar más de 16 mm del grado especificado en el diseño. La textura de la superficie después del laminado y curado debe ser lisa y uniforme en toda el área del pavimento.

## **CAPITULO IV METODOLOGÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE CCR PARA PAVIMENTOS SEGÚN AASHTO 1993**

### **4.1. Diseño estructural de pavimentos con CCR**

El diseño estructural de los pavimentos de concreto compactado con rodillo como ya fue mencionado en el apartado de consideraciones de diseño, se divide principalmente en dos categorías; pavimentos industriales de uso pesado y pavimentos convencionales para carreteras. Por lo tanto, existen diferentes guías para diseñarlo sin embargo el CCR es construido como pavimento liso no reforzado comportándose estructuralmente como concreto convencional con menor contracción por su porcentaje de agua y cemento en la mezcla. Por tener estas características similares al concreto convencional, en este manual se considera como referencia el manual AASHTO 1993 “Guía para diseño estructural de pavimentos” donde se desarrolla la adecuada forma de diseño tanto pavimentos flexibles como de concreto, en este documento únicamente se desarrolla la parte de la guía para pavimentos de concreto enfocada únicamente a pavimento sin considerar hombros y cunetas.

### **4.2. Bases de diseño**

Para fines de diseño en pavimentos de concreto únicamente depende del uso que tendrá la vía pues esta característica del CCR hace referencia a cual será el objetivo que tendrá el pavimento y que tipo de vehículos transitaran por la misma, esto con el fin de determinar la capacidad de resistencia tendrá que poseer la mezcla según el espesor de concreto para ser capaz de soportar por el numero esperado de cargas causadas por el tipo de vehículo que transitará.

Según AASHTO 93 las características fundamentales que define un desempeño adecuado y una vida útil larga diseño estructural en este tipo de pavimentos se basan en considerar los siguientes aspectos;

### **4.3. Diseño de espesor**

El diseño de espesor es el objetivo general del diseño estructural pues de esta característica puede variar capacidad de resistencia, costo de inicial del proyecto, costo de mantenimiento anual. En el capítulo anterior se describieron las propiedades mecánicas a las cuales CCR es capaz de soportar.

Considerando que la resistencia a flexión es la propiedad más afectada en un pavimento de CCR debido a que por la rodadura de los vehículos y cargas proporcionadas por estas, es usual que se supere la resistencia a flexión para la cual fue diseñada en ciertos momentos o con ciertas cargas.

Según AASHTO 93 las variables consideradas para el diseño estructural de pavimentos dependen de cuatro diferentes variables:

#### **4.3.1. Variable de diseño**

- **Tiempo**

Se considera este factor para pavimentos tanto de alto como de bajo volumen de tráfico, esta característica permite al diseñador evaluar y seleccionar estrategias adecuadas para proporcionar diseño y mantenimientos que permitan al pavimento tener una vida útil tan prolongada como fue considerada en su diseño.

- **Trafico**

Es considerado este factor para pavimentos tanto de alto como de bajo volumen de tráfico, esta característica se basa en cargas acumuladas esperadas provocadas por el tránsito vehicular que transite por la vía, de un eje simple equivalente(ESAL) a 18 kips durante su periodo de análisis( $W_{18}$ ), para conocer el tráfico total esperado para el tramo de carretera. Si no es especificado este número se debe diseñar multiplicando el tráfico de diseño por la dirección y por el número de vías. La siguiente ecuación permite definir el tráfico en el carril de diseño:

$$w_{18} = D_D \times D_L \times \omega'_{18}$$

Donde:

$D_L$ = factor de distribución de carril, expresado como una relación que considera la distribución del tráfico cuando dos o más carriles existen en una dirección de tráfico.

$D_D$ = factor de distribución direccional, expresado como una relación que considera las unidades de ESAL por dirección.

$\omega'_{18}$ = unidades ESAL de 18 Kips acumuladas, previstas para una sección específica de la carretera en el periodo de análisis.

El factor  $D_D$  usualmente es 0.5(50%) para vías vehiculares si en ambas vías se mueve el mismo peso en ambas direcciones. Si el transito varia de carga en cada una de las direcciones experiencias han demostrado que esta factora varia de 0.3 a 0.7 dependiendo que dirección esta con mayor peso o menor peso.

Tabla 4: muestra una guía que puede utilizarse para el factor DL

<b>No. de carriles en una sola dirección</b>	<b>% de ESAL de 18 Kips en el carril de diseño</b>
<b>1</b>	100
<b>2</b>	80-100
<b>3</b>	60-80
<b>4</b>	50-75

*Fuente: Elaboración propia (1993)*

Tabla 5: muestra una guía que puede utilizarse para el factor DD

<b>No. de carriles en cada dirección</b>	<b>ESAL de 18 Kips en el carril de diseño</b>
<b>2</b>	50
<b>4</b>	45
<b>6 o mas</b>	40

*Fuente: Elaboración propia (1993)*

$$w'_{18} = TPDA \times FC \times 365 \times LEF$$

Donde:

TPDA= tránsito promedio diario anual

FC= factor de crecimiento (ver anexo 1 tabla de factor de crecimiento)

LEF= factor de cargas equivalentes

## Factor de cargas equivalente(LEF)

Este factor es basado en la capacidad de perdida de servicio equivalente en una estructura de pavimento pues se considera como la medición de la diferencia entre dos diferentes condiciones de carga como los son; el nivel de tensión y la deformación que pueda sufrir por la carga ejercida sobre el pavimento de 18 Kips.

Tabla 6: muestra una guía de factores LEF para secciones de pavimento rígido equivalente.

<b>Tipo de carga</b>	<b>Carga por eje , Kip ( kN )</b>	<b>Concreto LEF</b>
<b>Eje simple</b>	2 (8.9)	0.0002
	6 (26.7)	0.01
	10 (44.5)	0.082
	14 (62.3)	0.347
	18 (80.9)	1
	20 (89)	1.49
	22 (97.9)	1.55
	26 (116)	4.42
	30 (133)	7.79
<b>Eje Tandem</b>	2 (8.9)	0.0001
	10 (44.5)	0.011
	18 (80.9)	0.042
	30 (133)	0.703
	34(151)	1.11
	40 (178)	2.06
	44(196)	3.248
	50 (222)	5.03

*Fuente: Elaboración propia (1993)*

- **Confiabilidad**

Es un aspecto que proporciona un grado de certeza al diseño asegurando que las diferentes alternativas de diseño perduren durante el periodo de análisis propuesto. Este valor considera variaciones en la predicción del tráfico ( $w_{18}$ ) y en la predicción del comportamiento  $W_{18}$  proporcionando un factor de nivel de seguridad (R) para durabilidad diseñada del pavimento evitando de esta forma el riesgo que no se comporten de manera adecuada bajo efectos de esta variable. Este factor es una función de la desviación estándar total (S.) Esta propiedad se alcanza basándonos en niveles altos de confiabilidad. Estos niveles se recomiendan asignar según su clasificación funcional.

Tabla 7: muestra los niveles de confiabilidad sugeridos por AASHTO 93 según su clasificación funcional.

Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendada	
	Urbano	Rural
<b>Interestatal y otras vías libres</b>	85-99.9	80-99.9
<b>Arterias principales</b>	80-99	75-95
<b>Colectoras</b>	80-95	75-95
<b>Locales</b>	50-80	50-80

*Fuente: Elaboración propia (1993)*

El manual de diseño de estructuras de pavimento AASHTO 93 afirma la importancia de aclarar que este factor únicamente es útil si se definen correctamente los siguientes aspectos;

- Definición funcional de la vialidad y determinación en que condiciones se utilizara si en urbanas o rurales.
- La selección de nivel alto de confianza para aumentar confiabilidad en estructura de pavimento.
- Selección de una desviación estándar adecuada según condiciones locales que para pavimentos rígidos puede ser de 0.35.
- **Impactos ambientales**

En pavimentos rígidos el ambiente puede llegar a afectar de manera negativa al desarrollo y durabilidad de sus pavimentos modificando de esta forma su comportamiento. Los mayores cambios ambientales que modifican las propiedades del pavimento son los cambios de temperatura repentinos y la humedad afectando de esta manera su resistencia, durabilidad, capacidad de carga y el suelo de la sub-rasante, hinchando este provocando levantamientos del pavimento. Se propician la pérdida de calidad de manejo y serviciabilidad pues este se envejece, se seca y se deteriora a un ritmo diferente al cual fue diseñado para su periodo de análisis. El objetivo de esta variable es determinar la perdida de serviciabilidad respecto al tiempo y esta variable es considerada en las cargas acumuladas por eje, todo determinado por una gráfica tiempo vs impactas ambientales.

#### 4.3.2. Variable de comportamiento

- **Serviciabilidad**

Según la guía para pavimento AASHTO 93 define esta variable como una habilidad para servir según el tipo de tráfico (pesado o ligero) que transite en la vía por medio de una medida primaria conocida como “Present Serviciability Index, PSI”, la cual se basa en cierto volumen de tráfico total y un nivel mínimo de servicio que se utiliza como medio de diseño de pavimentos para periodo deseado de servicio. Esta medida se encuentra entre “0” donde es considerado como camino imposible y “5” considerado como camino en muy buenas condiciones.

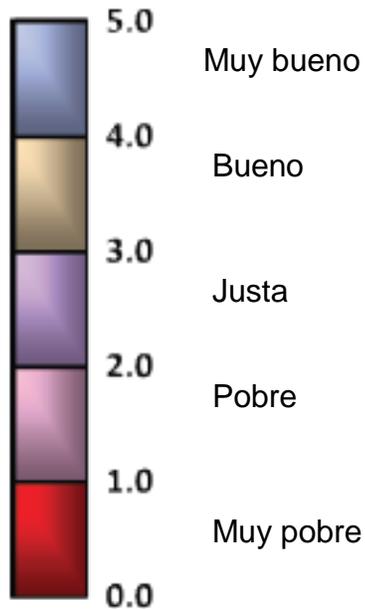


Figura 7. muestra el índice considerado como PSI para calificar la serviciabilidad de un pavimento.

El índice de servicialidad final de un pavimento se basa sobre el índice más bajo que resistirá antes de necesitar rehabilitación o reconstrucción, este índice al igual que la variable de confiabilidad depende de la clasificación de uso de la vía.

Tabla 8: muestra los niveles de serviciabilidad sugeridos por AASHTO 93 según su clasificación funcional.

<b>Clasificación funcional</b>	<b>Nivel de serviciabilidad final</b>
<b>Interestatal y otras vías libres</b>	2.5
<b>Arterias principales, calles industriales y comerciales</b>	2.25
<b>Calles secundarias, residenciales y parqueos</b>	2

Fuente: *Elaboración propia (1993)*

AASHTO 93 recomienda disminuir el periodo de diseño antes de disminuir el nivel de serviciabilidad final del pavimento, esto para vías de menor categoría donde influye de manera importante el factor económico.

El volumen del tráfico y la serviciabilidad inicial ( $P_o$ ) de la estructura de pavimento definen el tiempo que la estructura del pavimento alcanza su serviciabilidad final. Para definir el cambio total del índice de serviciabilidad, se debe seguir la siguiente ecuación;

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

Donde:

$P_o$  = Serviciabilidad inicial

$P_t$  = Serviciabilidad final

$\Delta PSI$  = Cambio de serviciabilidad

#### 4.3.3. Variable de propiedades de los materiales para el diseño estructural

- **Módulo de ruptura del concreto**

Según la guía para estructuras del pavimento este valor es obtenido por medio del ensayo de carga en los tercios después de 28 días por medio del ensayo ASTM C 78 debido a que este ensayo proporcionar un valor por debajo del cual pocos son aceptados en porcentajes de la distribución, es por esto que se debe realizar una desviación estándar del módulo de rotura y el porcentaje (PS) de la distribución normal de resistencia para tener un valor aceptable. (AASHTO 93) Estos ajustes son realizados por medio de la siguiente ecuación:

$$S'_c \text{ (media)} = S_c + Z \text{ (SDs)}$$

$$S'_c = C\sqrt{f'_c}$$

Donde:

$S'_c$  = valor medio estimado para-el módulo de rotura del PCC (psi)

$S_c$  = módulo de rotura de la especificación constructiva del concreto (psi)

SDs= desviación estándar estimada del módulo de rotura del concreto (psi)

z = varianza estándar normal

Tabla 9: muestra la varianza estándar normal sugeridos por AASHTO 93 según su clasificación funcional.

Porcentaje de muestras por debajo del valor especificado	Z
20	0.841
15	1.037
10	1.282
5	1.645
1	2.327

Fuente: Elaboración propia (1993)

- **Módulo de reacción de la sub-rasante**

Este módulo se desarrolló para el diseño de pavimentos rígidos siendo este un valor K que es un numero directamente proporcional al módulo de resiliencia del suelo de sub-rasante. Es determinado por medio del ensayo de carga de placa (ASTM D 1194 “ Ensayo estándar para capacidad de carga estatica del suelo”) asumiendo que la sub-rasante funciona como una cama de resorte con una constante “K” similar a la constante de un resorte psi / pulg. (MPa /m), cuando se le es aplicado una fuerza (AASHTO 93).

- Determinar Mr por medio de Proctor T180

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

Donde:

Mr= módulo resiliente del suelo (psi)

CBR= California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California.

- Convertir Mr a valor K, mediante la siguiente formula

$$\text{Valor } K = \frac{M_r}{19.4}$$

- **Módulo de elasticidad del concreto**

Este valor indica la cantidad del concreto que se comprime bajo cierta carga, la compresión es mínima cuando más alto es su módulo de elasticidad. Este parámetro es sensible sin embargo no tiene mayor influencia en el diseño de espesor o el rendimiento del mismo. (AASHTO 93)

Según American Concrete Institute (ACI) proporciona ecuaciones para obtener valores aproximados de módulo de elasticidad tanto para flexión como compresión;

Módulo de elasticidad a flexión

$$E_c (\text{psi}) = 6.750 * S_c '$$

Donde:

$S_c'$  = módulo de rotura de la especificación constructiva del concreto psi(Mpa).

$E_c$  = módulo de elasticidad a flexión del concreto psi(Mpa).

Módulo de elasticidad a compresión

$$E_c = 57000\sqrt{f_c}$$

Donde:

$E_c$  = módulo de elasticidad a flexión del concreto, psi(Mpa).

$f_c$  = resistencia a la compresión, psi(Mpa).

#### 4.3.4. Variable de características estructurales del pavimento

- **Coefficiente de drenaje**

El mantenimiento del pavimento depende de diversas variables una de las cuales es el drenaje adecuado para este se toma en cuenta en coeficiente de drenaje ( $C_d$ ). (AASHTO 93) Este valor es considerado para diseñar el espesor del pavimento y depende de factores como lo son;

- Calidad de drenaje
- Tiempo que la estructura de pavimento está expuesta a niveles de saturación de agua, lo cual depende de las precipitaciones promedio anuales de cada lugar.

Tabla 10: muestra los valores del coeficiente de drenaje  $C_d$  sugeridos por AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Calidad de drenaje	% del tiempo que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1	1-5	5-25	> 25
<b>Excelente</b>	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
<b>Bueno</b>	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
<b>Regular</b>	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
<b>Pobre</b>	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
<b>Muy Pobre</b>	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: Elaboración propia (1993)

- **Transferencia de carga**

Es la capacidad de una estructura de pavimento de concreto para transferir cargas por medio de discontinuidades como lo son; juntas y grietas. El coeficiente de transferencia de carga (J); se tiene valores para diferentes condiciones de carga. Estos son mayores con valores menores de módulo de reacción de la sub- rasante y de altas temperaturas, sin embargo, estos pueden variar a criterio de agregados y condiciones climáticas. (AASHTO 1993)

Tabla 11: muestra los valores del coeficiente de transferencia J sugeridos por AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.

Clase de pavimento	ESAL's (millones)	Simple con juntas y reforzado con juntas		CRCP	
		Soporte de borde			
		Si	No	Si	No
Calles locales	Hasta 0.3	2.8	3.2	N/A	N/A
	0.3 a 1	3	3.4	N/A	N/A
	1 a 3	3.1	3.6	N/A	N/A
Arterias principales y autopistas	3 a 10	3.2	3.8	2.5	2.9
	10 a 30	3.4	4.1	2.6	3
	arriba de 30	3.6	4.3	2.6	3.1

Fuente: Elaboración propia (1993)

**4.3.5. La ecuación que considera todos estos factores que afectan a los pavimentos rígidos según AASHTO es;**

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R + S_o + 7.35 + \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.64+10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_t) \times \log_{10} \left[ \frac{(S_c)(C_d)(D^{0.75}-1.132)}{215.63(J) \left( D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{K}\right)^{0.2}} \right)} \right]$$

Donde:

W18 = Número de cargas de 18 kips (80 kN) previstas.

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

S<sub>o</sub> = Desvío estándar de todas las variables.

D = Espesor de la losa del pavimento en pulg.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.

P<sub>t</sub> = Serviciabilidad final.

S = Módulo de ruptura del concreto en psi.

J = Coeficiente de transferencia de carga.

C<sub>d</sub> = Coeficiente de drenaje.

E<sub>c</sub> = Módulo de elasticidad del concreto, en psi.

K = Módulo de reacción de la sub-rasante (coeficiente de balastro), en (psi/pulg).

## **CAPITULO V METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE CCR PARA PAVIMENTOS**

Según ACPA<sup>3</sup> la producción de concreto compactados con rodillo para pavimentos es un conjunto de diversos aspectos que determinan una mezcla adecuada con buena calidad y bajo costo. Estos aspectos consideran; selección, calidad, almacenaje y manipulación de los materiales de la mezcla como también la calibración de la planta mezcladora y tiempo de mezclado.

Como ya fue descrito con anterioridad tanto los materiales como la mezcla deberán cumplir con las secciones que apliquen de la normativa NTG-41068 (ASTM C 94) y NTG 41048 (ASTM C 685) para lograr una dosificación de mezcla adecuado y una mezcla continua. Se considera que para cada lugar y dimensiones del proyecto donde se pretenda realizar este tipo de pavimento se diseña nuevamente la mezcla debido al cambio de fuente de los materiales, el clima y el tipo de equipo de mezclado que se le proporcionara.

### **5.1. Planta de mezcla**

En la actualidad existen una diversidad de tipos de mezcladoras que se adecuan para el tipo de mezcla de concreto compactado con rodillo y las necesidades de cada tipo de proyecto. Este tipo de maquinarias cumplen cualidades que las hacen versátiles y útiles para cualquier tipo de proyecto de esta índole, no importando su dimensión pues proporciona una mezcla homogénea y uniforme de material cementicio, aditivos, agua y agregados tanto gruesos como finos. Aunque todas las plantas mezcladoras concluyen en el mismo resultado, la selección de la misma considera proporción y naturaleza del proyecto.

---

<sup>3</sup> ACPA: Asociacion Americana de pavimentos de concreto

La maquinaria más empleada en estos proyectos es;

- **Mezcladoras continuas**

Este tipo de maquinaria está compuesta una planta de mezcla de eje horizontal y al final una mezcladora tipo pugmill que usualmente se encuentra a 15 grados con paletas metálicas en su interior en forma de tornillo que giran en el centro de tambor. Este proceso se puede observar en la figura 7.

El funcionamiento de este tipo de maquinaria es: la mezcladora está compuesta por un sistema de uno o dos alimentadores de agregados, un silo cementico, una cinta sin fin, un sistema para suministro de agua para llegar a la mezcladora pugmill y luego colocar mezcla sobre cinta de descarga. El proceso inicia cuando se le es dosificada los alimentadores principales los agregados gruesos y finos, estos son trasportados hacia la mezcladora pugmill donde se adiciona agua, cemento a la mezcla y de ser necesario agregar aditivos. En esta parte son mezclados por medio de paletas metálicas giratorias.

Estos materiales dosificados a cierta velocidad según su capacidad de toneladas por hora. Usualmente este tipo de maquinaria logra producir entre 250 a 600 toneladas por hora y necesita alrededor de 10 a 30 segundos, es por esta razón que este tipo de mezclador se utiliza para proyectos de mayor magnitud y proporción. Usualmente en este tipo de planta se desperdicia alrededor 0.27 a 1.35 toneladas al inicio de proceso, en muchos casos se detiene y vuelve a comenzar el proceso para cada uno de estos casos se tiene que volver a verificar por medio visual y de ensayos a la mezcla que cumpla con requisitos especificados para cada proyecto.

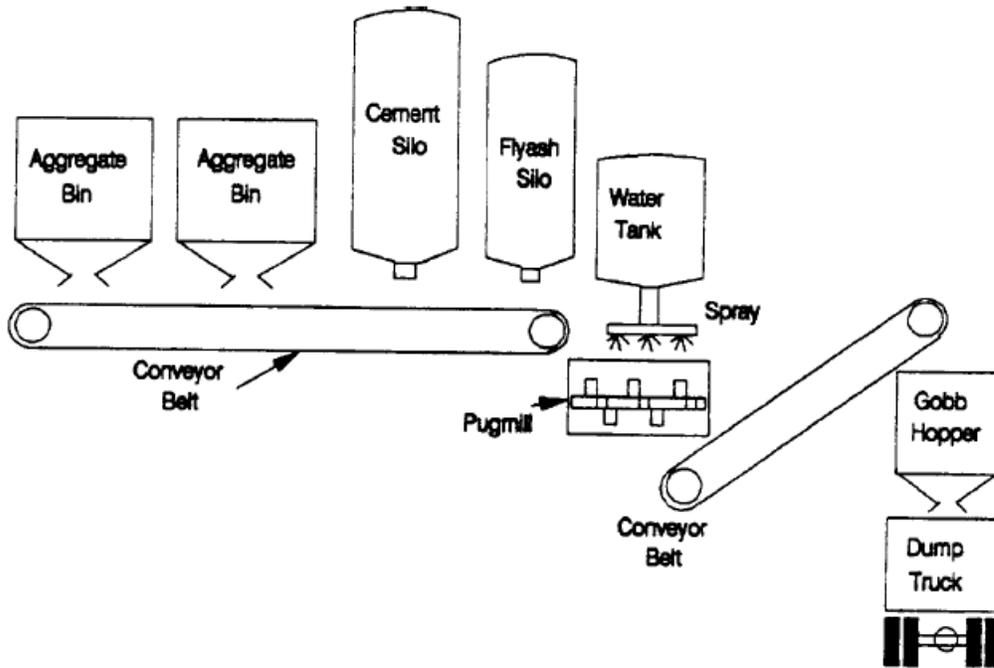


Figura 7: esquema de la planta de mezcla continua.  
Fuente: Portland Cement Association (2006)



Figura 8: planta de mezcla continua.  
Fuente: Cemex (2006)

- **Mezcladores de tambor central**

Este tipo de maquinaria es la más común utilizada para mezclas de concreto compactada con rodillo debido a su capacidad de producción rápida y su calidad en consistencia. Estas pueden ser permanentes o portátiles ambos tipos funcionales para proyectos de menor intensidad pues estas tienen rendimiento menor aproximado de 50 a 90 por ciento que las mezcladoras continuas esto se debe a que esta maquinaria genera una tensión mecánica alta en el equipo y existe el riesgo de segregación del agregado, necesita de limpieza constante.

El funcionamiento de esta maquinaria es por medio del almacenamiento de agregados gruesos y finos en contenedores por encima de la tolva de dosificación y el cemento es suministrado en la tolva por medio de una cinta sin fin. La dosificación de los agregados es por medio de pesos para cada mezcla y se le adiciona agua por medio de una barra pulverizadora que se encuentra por encima de la mezcla, esta dura un periodo de tiempo estipulado.



*Figura 9: planta de mezcla de tambor central  
Fuente: RexCon, Inc. (2018)*

## **CAPÍTULO VI METODOLOGÍA DE COLOCACIÓN CCR PARA PAVIMENTOS**

La metodología de colocación de las mezclas de concreto compactado con rodillo usa el equipo y las técnicas similares a las utilizadas con pavimentos de asfalto por lo tanto esto lo convierte en un tipo de pavimento rígido de rápida y fácil colocación, es importante mencionar no es necesario el uso de tacos, refuerzo de acero o juntas por lo tanto el costo y el tiempo de colocación disminuyen notablemente en comparación al concreto convencional. La construcción de este pavimento debe considerar las siguientes características;

### **6.1. Preparación de la sub-rasante y sub-base**

La preparación de estas capas para un pavimento de CCR al igual que para pavimentos de concreto convencional tiene que cumplir con propiedades mecánicas como lo son la rigidez y densidad adecuada para obtener la capacidad de soportar la compactación del pavimento CCR no importando su espesor. Según el libro azul sección 302 esto se logra por medio de la operación de mezclar y compactar la mezcla de sub-rasante con materiales estabilizadores (cal, granza de cal o compuestos químicos orgánicos e inorgánicos de durabilidad comprobada). Estos materiales no pueden contener partículas mayores a 70 milímetros y deben estar regidos bajo la sección 203.1 y 302.04

La sub-rasante debe ser gradual conforme a las pendientes especificadas en su diseño, mientras es colocado esta sección se desprecia cualquier material inadecuado o bien que no cumpla con condiciones de humedad, se reemplaza por un material apto para satisfacer especificaciones requeridas.

La proporción de los materiales depende de las características de estos y de acuerdo a indicaciones de disposiciones especiales. Este material para la sub-rasante ya

estabilizado debe determinarse por medio del método AASHTO 193 donde especifica que debe cumplir con el mínimo de 20 en CBR sobre una muestra saturada a 95% de compactación el cual lo determina AASHTO t 180 y un hinchamiento máximo de 1%, esto según el método de dosificación del libro azul sección 302.06.

La sección 302.10 nos indica que cuando ya los materiales son mezclados y aplicados se debe compactar al menos 95 % de su densidad máxima. La densidad máxima y el contenido de humedad son obtenidos en campo por medio del ensayo AASHTO T 191.

Esta capa debe estar limpia de residuos orgánicos o inorgánicos, no puntos bajos para evitar agua estancada (acumulamiento de agua) y cumplir con densidad adecuada para que pueda ser colocada la mezcla de concreto compactado con rodillo, es importante mencionar que la superficie debe ser humedecida antes de aplicar la capa de pavimento es con el objetivo de evitar que la humedad sea absorbida del concreto compactado con rodillo.



*Figura 10: preparación sub-rasante y sub-base.  
Fuente:Huesker (2018)*



Figura 11: estabilización de base con agregado grueso.

Fuente: Use of Roller-Compacted Concrete Pavement in Stafford, Virginia (2015)



Figura 12: preparación Sub-rasante

Fuente: L. Vasquez -Varela (2016)

## 6.2. Proceso de colocación

Este proceso es uno de los más importantes después de la producción de la mezcla debido a que el tiempo que toma realizar este proceso es determinante para el cumplimiento de propiedades tanto físicas como mecánicas que debe tener este tipo de concreto. Utiliza el equipo y la técnica constructiva similar a la usada por pavimentos de asfalto, pero con mezcla de concreto, esto genera que la mezcla de CCR en comparación a concreto convencional sea colocada a mayor velocidad o más rapidez en grandes cantidades con menor cantidad de esfuerzo y equipo. La colocación de este tipo pavimentos también considera menor tiempo pues no utiliza tacos ni refuerzo de acero. Se debe considerar tener la capacidad suficiente de pavimentación para colocar 1.5 veces la producción de la capacidad de la mezcladora para evitar la segregación durante su colocación.



*Figura 13: proceso colocación CCR.  
Fuente: Fabrica Alicante (2017)*

### 6.3. Pavimentadora

Usualmente para la colocación de concreto compactado con rodillo es utilizado una pavimentadora de asfalto modificada de tal forma que la cantidad de mezcla se pueda mover a través de ella misma sin ningún inconveniente. Algunas modificaciones implican; la ampliación de las puertas de tolvas de alimentación, ajuste de tornillos difusores en todo el ancho delante de la regla para afirmas de manera adecuada la extensión de la mezcla sobre la superficie de similar forma a como se efectúa con la mezcla de asfalto caliente, esto con el objetivo de prevenir la formación de protuberancias o depresiones en la superficie del pavimento por medio del equilibrio entre velocidad de la pavimentadora y la carga de mezcla. Tradicionalmente esta maquinaria cuenta con dispositivos para la auto nivelación, para evitar variaciones de nivel en dicho pavimento. En la actualidad se pueden utilizar reglas vibratorias para proporcionar cierta compactación inicial externa lo cual ayudad a la densidad final del pavimento.



*Figura 14: junta fría*  
*Fuente: Technopow (2014)*

#### **6.4. Camiones para transportar**

Para mezcla de CCR es totalmente independiente el tipo, método de mezcla y la dosificación elegida para realizar el pavimento pues para transportar la mezcla de su punto de origen la planta de mezcla a la ubicación del proyecto es común utilizar camiones de volteo pues estos no son vehículos de agitación permitiendo que la consistencia de la mezcla al ser seca se evite la fluidificación de la misma. Para el transporte es de suma importancia considerar los siguientes aspectos;

Considerar capacidad de los camiones según rendimientos de producción del mezclador, distancia de acarreo, clima y hora de pavimentación.

La limpieza de los camiones de volteo debe ser frecuente para evitar contaminaciones en la mezcla y el desperdicio de la misma por añadiduras a las paredes del camión.

La parte superior del camión debe ser cubierta por medio de lonas o material adecuado para evitar la pérdida de humedad en la mezcla pues puede derivar problemas en la colocación, compactación y rendimiento.

En proyectos que no se tenga espacio suficiente para maniobrar el camión de volteo se pueden utilizar cargadores tipo Front-end para suministra CCR en la colocación. Para evitar segregación de la mezcla debe suministrarse dentro del camión de forma uniforme en toda su longitud separando en tercio inicial, tercio del centro y tercio final también se considera el tiempo de descarga de la mezcla hacia tolva de pavimentadora, el cual debe ser el mínimo no excediéndose de 45 minutos. Esto con el fin que la mezcla aún posea trabajabilidad ya que los materiales cementicos inician su proceso desde el contacto con el agua en las plantas mezcladoras. El tiempo se puede prolongar por medio de retardantes y el control de velocidad de evaporación sin embargo este se puede llegar a reducir si la temperatura ambiente es igual o mayor a 27 grados Celsius.



*Figura 15: camiones para transportar mezcla CCR.  
Fuente: portland Cement Association (2006)*

## **6.5. Proceso de compactación**

Este proceso es el último, pero no menos importante en la construcción de concreto compactado con rodillo pues la importancia de este radica en la durabilidad para la cual fue diseñado debido a que una mala compactación puede llegar a ser susceptible a deterioro continuo pues daña su densidad, resistencia, permeabilidad y suavidad.

La compactación debe tener una alta densidad sin espacios vacíos con superficie lisa sin agregados gruesos resaltados para evitar desprendimiento entre uniones y bordes. Antes de ser compactada debe observarse el aspecto de la superficie; si la superficie cuenta con un alto porcentaje de humedad se tendrá un aspecto brillante y pastosa mientras que si su porcentaje de humedad es bajo el aspecto de la superficie es con polvo o bien granulado, en cualquiera de los casos puede llegar a ocurrir la segregación de agregados lo que causara una baja densidad de la mezcla en especial en la parte inferior. La compactación debe ser inmediatamente después de la colocación sin embargo para saber si la mezcla se encuentra lista por medio de observar el comportamiento de CCR bajo los efectos del paso del rodillo estático por medio de la consistencia adecuada para soportar la compactación del rodillo.

Una de las técnicas utilizadas para obviar problemas de mala compactación es dejar por último la unión entre los carriles. El tiempo en que este proceso se lleva a cabo es de 15 minutos de colocación y transcurridos no más de 45 minutos de la mezcla inicial, este tiempo debe ser menor a 60 minutos desde producida la mezcla para evitar reducciones en la resistencia.

## 6.6. Compactadora

La compactación debe ser por medio de un rodo vibratorio de doble tambor aplicado inmediatamente después de la colocación y su capacidad depende del espesor del pavimento por ejemplo para 15 cms de espesor se utiliza equipo convencional de asfalto mientras que para espesores mayores de 15 cms hasta 25 cms se utiliza maquinaria de pavimentación de alta densidad, si en caso el espesor diseñado fuese mayor a los mencionados anteriormente se debe proceder en diferentes capas de compactación (capa superior y capa inferior) no permitiendo que la compactación entre la compactación inferior y superior sea mayor a 60 minutos, no obstante este tiempo depende del tipo mezcla y condiciones ambientales esto con el objetivo de permitir la conveniente unión entre las capas si esto no se logra durante este tiempo la unión es considerada parcial por lo tanto pierde sus propiedades estructurales.

La selección del equipo es la habilidad del operador de la misma es esencial para obtener la densidad y suavidad necesaria para el acabado adecuado para el pavimento. El operador debe compactar de forma continua en modo vibración y continuos pasos de rodillo deben estar escalonados para evitar depresiones en la superficie del pavimento. Usualmente la densidad de un 98% para mezclas de CCR con un espesor de 15 a 25 cms se alcanza con el paso de un tambor doble rodillo vibratorio de 10 toneladas aproximadamente de cuatro a seis veces. El éxito de este proceso radica tanto en el tiempo como en la longitud del tramo para que la mezcla aún se encuentre fresca y moldeable.



Figura 16: compactadora.  
Fuente: Fabrica Alicante (2017)



Figura 17: proceso constructivo pavimento CCR  
Fuente: Groupe Thomas Bellemare (2017)

## 6.7. Juntas por temperatura

En pavimentos de concreto compactado con rodillo, las juntas constructivas se forman entre los carriles de pavimentación sucesivos que se encuentran dentro de un intervalo de tiempo entre la colocación y compactación de los carriles no mayor a 60 minutos sin embargo este tiempo puede variar según tipo de mezcla y condiciones climáticas si en la mezcla no se consideran aditivos retardantes. Las juntas longitudinales frescas consideran dejar durante su construcción de 30 a 45 cms del carril a pavimentar sin compactar durante el periodo de laminación, este proceso utilizado para ajustar la altura de la regla entendedora para la pavimentación del carril adyacente. Esta parte es compactada centrando el tambor de rodillo sobre la junta y compactando los bordes del carril adyacente de manera simultánea, el rodillo debe compactar las veces que sea necesario para lograr la densidad necesaria y suavidad adecuada en esta articulación.

La rodadura en juntas frescas transversales debe tener patrones para logra una compactación y densidad adecuada antes de 60 minutos de contacto de materiales con agua en la mezcla de CCR, este patrón se establece por medio de guías antes de la construcción o bien en el primer día de construcción. En la mayoría de estas construcciones los constructores utilizan el patrón de rodadura de doble paso estático el cual se basa en un movimiento hacia atrás y hacia delante sin tener los vibradores activados sobre la superficie de concreto fresco para permitir fijar la superficie antes de iniciado el proceso de laminación. Luego se pasa de dos a más veces el rodillo vibratorio encendido para obtener densidad específica para después llegar a la compactación vibratoria por medio de neumáticos de como para eliminar los espacios vacíos en la superficie o fisuras dejando por último el rodillo estático de nuevo para excluir las marcas causadas por los rodillos vibratorios o los neumáticos. Este proceso se puede observar en la figura 19.

La rodadura de las juntas frescas longitudinales al igual que las juntas transversales se considera fresca antes de ser transcurridos 60 minutos de contacto de agua con mezcla de CCR, las primeras dos pasadas de rodillo son de modo estático a lo largo del borde interior dejando un tramo sin compactar de 30 a 45 cms de ancho. El tramo sin compactar es utilizado para ajustar altura de la pavimentadora para la colocación de la banda paralela, en tramo interno después de rodillos en modo estático al igual que en la rodadura en juntas transversales se compacta con el rodillo en modo vibratorio.

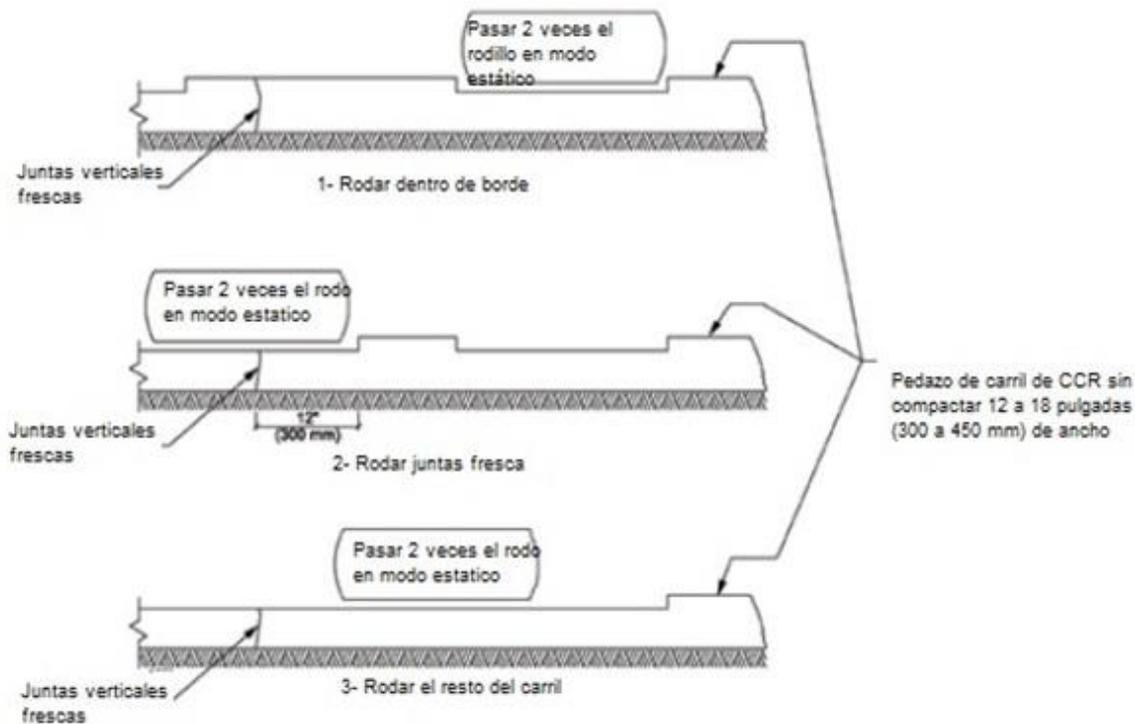


Figura 18: proceso junta longitudinal fresca en pavimento de concreto compactado con rodillo  
Fuente: Universidad del estado de Iowa (2010)

La rodadura de las juntas frías longitudinales se considera fría después de ser transcurridos 60 minutos de contacto de agua con mezcla de CCR, el laminado inicia en el borde exterior que al ser compactado su espesor varia respecto al CCR sin compactar de 2.5 a 5 cms, cuando la compactación ha finalizado este borde es recortado con una

sierra a la altura completa del tramo y por lo menos 30cms desde el borde. Para colocar un nuevo tramo la superficie debe ser limpiada con aire y posteriormente humedecida con el fin de evitar que la humedad se extraiga de la mezcla de concreto.

El corte en juntas en pavimentos de CCR no son estrictamente necesarias para el control de grietas aleatorias pues se forman juntas de contracción a lo ancho, las grietas se producen usualmente en intervalos de 6.1 a 18.3 metros (20 a 60 ft), este intervalo depende de sus propiedades y el espesor del pavimento. Sin embargo, la prevención de agrietamiento aleatorio el corte en sizas debe ser  $\frac{1}{4}$ " de la profundidad del pavimento, el primer corte aproximadamente varia de 2 a 3 cms sin considerar el espesor del pavimento.

El sellado en sizas se realiza en cortes mayores a  $\frac{1}{4}$ " siempre limpiándolas con agua o aire antes de aplicar producto, el cual puede ser los usuales utilizados para el concreto convencional, no obstante, en sizas de origen natural o menores de  $\frac{1}{8}$ " de ancho no son selladas.



*Figura 19: junta fresca en pavimento de concreto compactado con rodillo.  
Fuente: Universidad del Estado de Iowa (2010)*



*Figura 20: junta final fría en pavimento de concreto compactado con rodillo.  
Fuente: Universidad del Estado de Iowa (2010)*



*Figura 21: corte de sizas y siza en CCR.  
Fuente: Portland Cement Association (2006)*

## **6.8. Curado de pavimento de CCR**

El curado es un factor determinante para la resistencia y durabilidad de CCR pues permite al concreto desarrollar por completo su resistencia de diseño, previene de incrustaciones, elimina de polvo y el levantado de la superficie endurecida. Debido a las propiedades de este tipo de mezcla, la eliminación de agua en la mezcla tiene su inicio desde su momento de colocación, lo cual puede llegar a producir agrietamiento por contracción y micro fisuras provocando deterioro de la superficie.

Existen diferentes tratamientos a aplicarse que resultan eficaces para evitar la evaporación del agua en la mezcla, pues esta tiene un bajo contenido agua, dichos tratamiento también son utilizados en pavimentos de concreto convencional.

Usualmente para este tipo de mezcla se utiliza conforme la normativa ASTM C 309 “Especificación para compuestos para curar concreto liquido”, esto se debe aplicar inmediatamente después de la compactación final para sellar y minimizar la evaporación del agua con el fin de evitar el secado prematura de la superficie. La cantidad de compuesto de curado depende del tipo de textura y capacidad de absorción de superficie para lograr una membrana uniforme libre de huecos, para este tipo de mezcla puede necesitar de 1.5 a 2 veces más cantidad de compuesto que la mezcla de concreto convencional.

El curado con humedad no es la práctica más económica debido a que se debe aplicar durante los primeros siete días aplicándolo con camión de agua para mantener la humedad por aspersion, la cantidad de agua depende de las condiciones ambientales.



*Figura 22: aplicación curado con compuestos químicos*  
*Fuente: Silvi (2017)*



*Figura 23: aplicación compuesto químico para curado de CCR*  
*Fuente: Universidad del Estado de Iowa (2010)*



*Figura 24: aplicación de agua para curado de CCR.  
Fuente: Portland Cement Association (2006)*

## APLICACIÓN PAVIMENTO RÍGIDO CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

La aplicación mostrada en esta publicación del diseño de estructura de pavimento rígido de concreto compactado con rodillo, fue utilizada en la Aldea Chivoc, San Juan Sacatepequez, Guatemala. Se decidió realizar este tramo carretero con este tipo de mezcla principalmente por el uso que se le dará y las velocidades a las cuales transitará los vehículos considerando como también las ventajas económicas que este presenta a lo largo de su vida útil.

### Ubicación

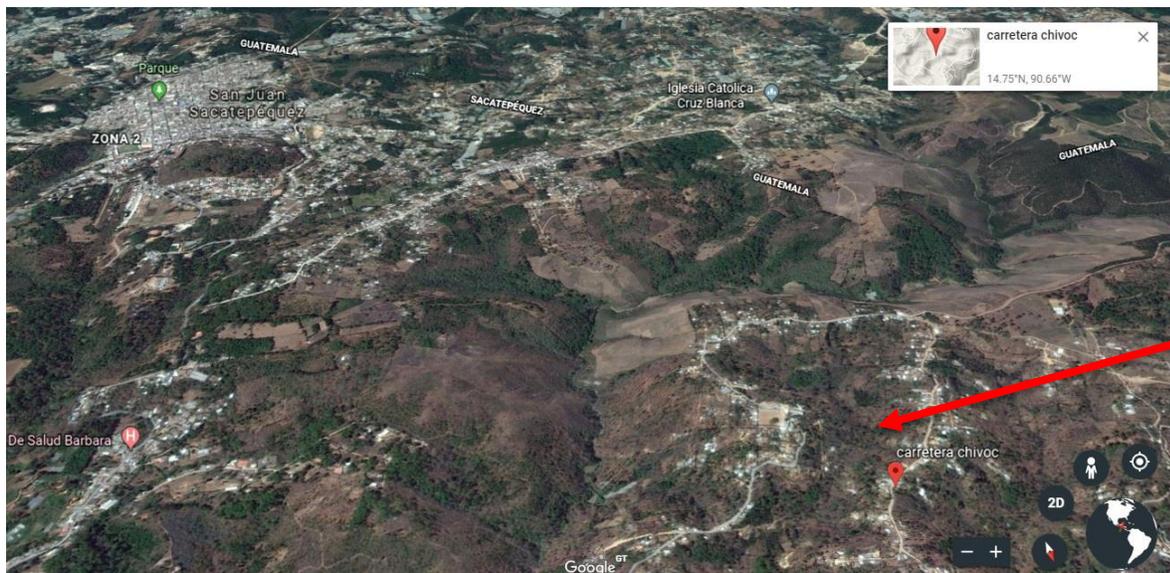


Figura 25: ubicación aldea Chivoc, San Juan Sacatepequez, Guatemala.  
Fuente: Google Earth (2017)

El diseño de esta estructura de pavimento se trabaja con AASHTO 1993 “Guía para diseño estructural de pavimentos”, en base a este manual se utiliza el programa Winpas para obtener el espesor de pavimento pues esta técnica posee características similares al pavimento de concreto convencional, los parámetros iniciales son;

- Transito que considera 80 vehículos pesados al día, con 20 toneladas de carga en un eje tándem.
- El área con el que se cuenta de vía es de 6 metros.
- Los suelos del lugar fueron caracterizados y analizados.

Dados los parámetros anteriores se inicia con la selección de las características mínimas con las que debe contar este pavimento.

Tabla 12: muestra los valores considerados para cada variable que considera AASHTO 1993 para poder determinar el valor del espesor del pavimento.

<b>CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO AASHTO 1993</b>	
<b>VARIABLE</b>	<b>VALORES</b>
<b>PERIODO DE DISEÑO</b>	20 años
<b>CRECIMIENTO ANUAL</b>	2%
<b>DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL</b>	100%
<b>DISTRIBUCIÓN LINEAL DE DISEÑO</b>	100%
<b>ESAL'S RIGIDO</b>	3.6MM
<b>CONFIABILIDAD ( R )</b>	75%
<b>DESVÍO ESTANDAR (So)</b>	0.35
<b>MÓDULO DE RUPTURA (Sc')</b>	650 psi
<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO (Ec)</b>	4,200,000 psi
<b>COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CARGA (J)</b>	3.4
<b>MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUB-RASANTE (Kc)</b>	150 psi/in
<b>COEFICIENTE DE DRENAJE (Cd)</b>	1
<b>SERVICIALIDAD INICIAL(Po)</b>	4.5
<b>SERVICIABILIDAD FINAL(Pt)</b>	2
<b>CBR</b>	>10 90% compactación
<b>ESPESOR DE LOSA DEL PAVIMENTO (D)</b>	7.89 in 20.04 cm
<b>ESPESOR DE LOSA DEL PAVIMENTO (D requerido)</b>	20 cm

Fuente: Elaboración propia (2017)

Dichos valores fueron obtenidos por medio de las características especificadas anteriormente y por ensayos realizados al suelo para obtener sus propiedades estructurales a considerar en un tipo de pavimento CCR. Estos ensayos fueron realizados por Cementos Progreso S.A.

## 6.9. Métodos para dosificación de mezcla

Método compactación del suelo ejemplo 1

### I. Selección de agregados graduados.

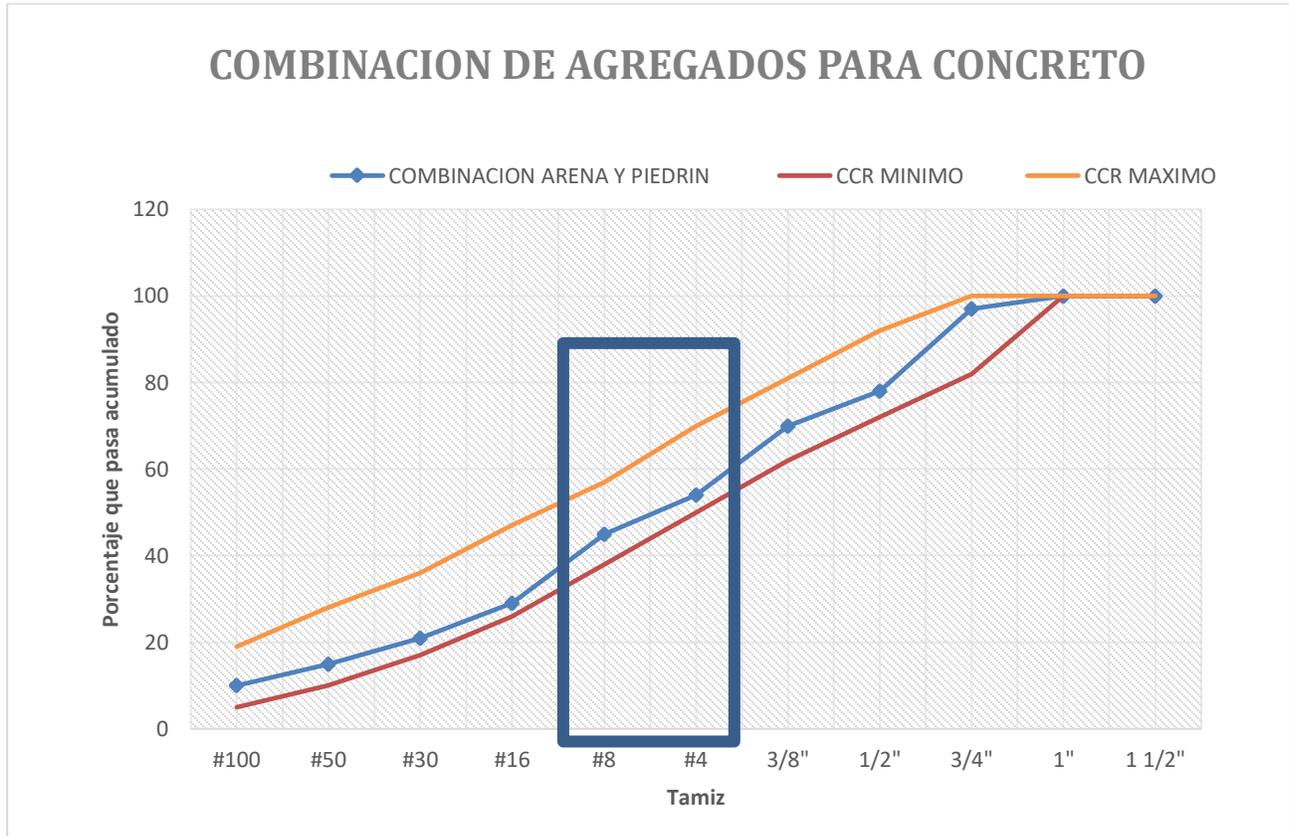


Figura 26: combinación de agregados para concreto  
Fuente: elaboración propia (2017)

### II. Selección de contenido cementicio de rango medio.

$$\text{Material cementicio (\%)} = \frac{\text{Peso de material cementicio}}{(\text{Peso de material cementicio} + \text{peso de agregados secados al horno})} \times 100$$

Material cementicio (%) = 12.47

### III. Selección de intervalos de relación de humedad-densidad.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso del agua}}{(\text{Peso de material cementicio} + \text{peso de agregados secados al horno})} \times 100$$

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = 3.41$$

### IV. Método de ensayo Proctor modificado (ASTM D 1557)

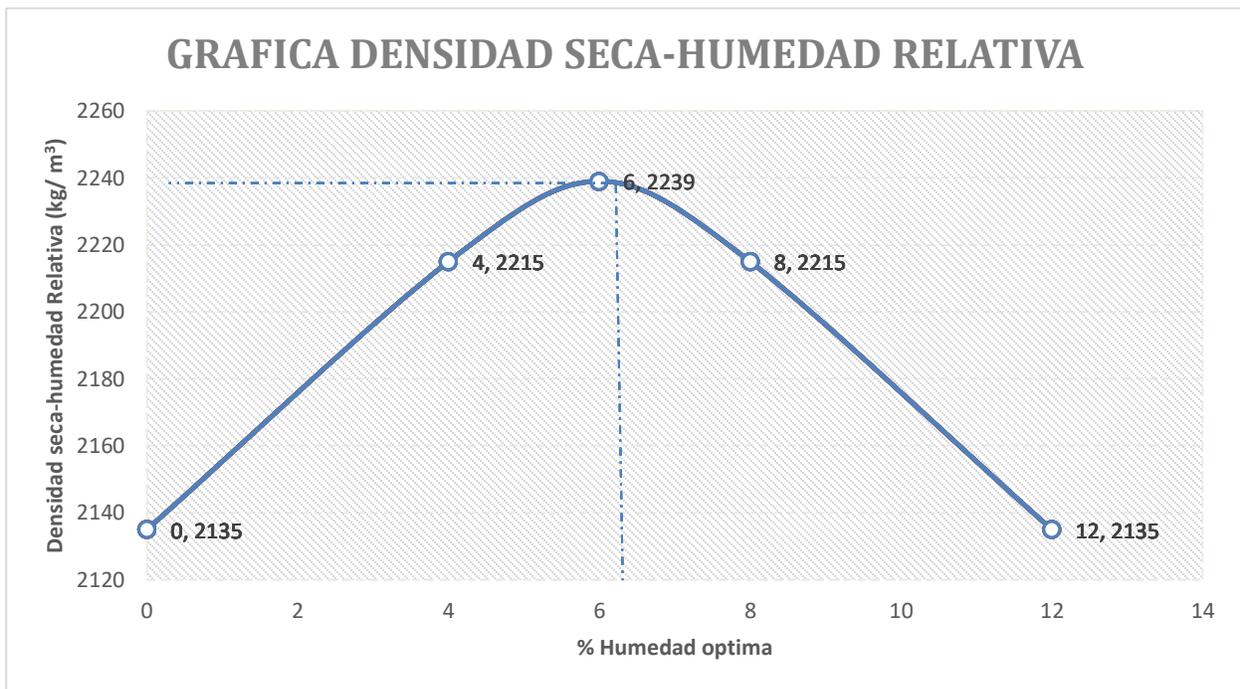


Gráfico 6: densidad seca-humedad relativa  
Fuente: elaboración propia (2017)

**V. Prueba de especímenes y selección de contenido cementicio.**

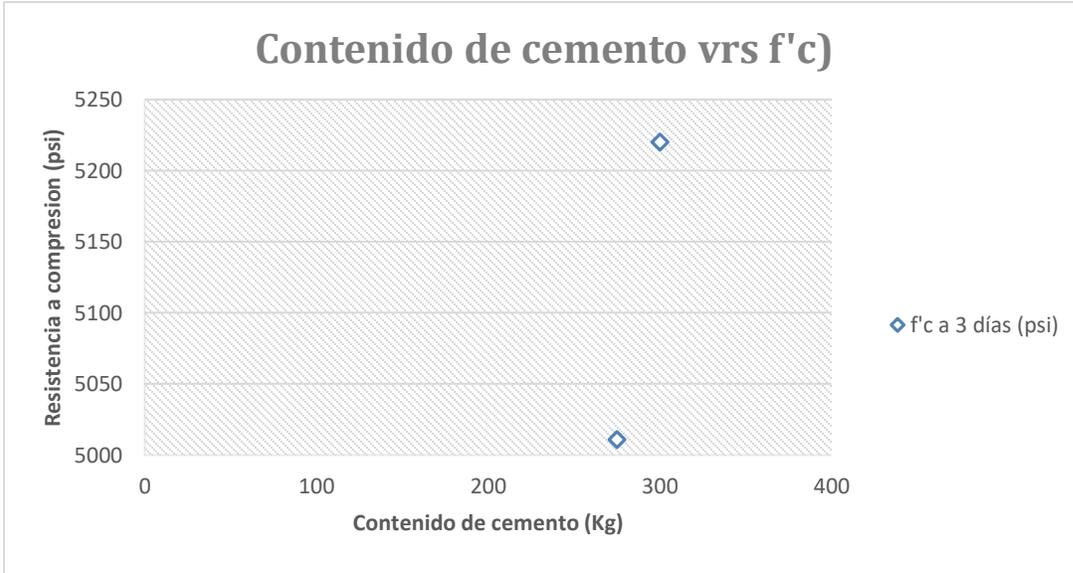


Gráfico 7: contenido de cemento vrs resistencia a compresión.  
Fuente: elaboración propia (2017)

**VI. Calculo de proporción de mezcla**

Contenido de cemento=	300	Kg
Humedad optima=	6%	
Densidad seca máxima =	2239	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad especifica cemento =	3.03	
Gravedad especifica agua=	1	

- i. Combinación de agregados gruesos y finos: 50% agregado fino y 50% agregado grueso.
- ii. Densidad seca máxima= 2239 kg/m<sup>3</sup>  
Humedad optima=6%  
Densidad máxima húmeda= 2239 kg/m<sup>3</sup> \* 1.06= 2373.34 kg/m<sup>3</sup>
- iii. Peso seco de los materiales=2239 kg/m<sup>3</sup>\* 1.0745m<sup>3</sup>=2405.77kg

Contenido de cemento= 300 kg

iv. Peso total de agregados=2405.77kg-300 kg=2105.77kg

v. División del peso seco de arena y grueso por combinación de agregados como se determina en el paso 1:

\*Agregado grueso=0.50\*2105.77kg=1052.89kg

\*Agregado fino=0.50\*2105.77kg=1052.89kg

vi. Calculo peso de agua

$(2373.34 \text{ kg/m}^3 - 2239 \text{ kg/m}^3) * 1.07 = 143.74 \text{ kg}$

Tabla 13: proporción de mezcla para 12.47% contenido cemento y 6% de humedad óptima. Para aplicación de 1 m3.

	Proporciones de prueba		Proporciones para un rendimiento adecuado	
	Peso (Kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (kg)	Peso (Kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (Kg)
Cemento	300	0.0952	300	0.0952
peso de los agregados	2101	0.8078	2106	0.8078
Agua	82	0.0820	82	0.0820
1.5% de aire	---	0.0150	---	0.0150
Total		1.0000		1.0000

Fuente: Elaboración propia (2017)

### 6.9.1. Método compactación del suelo ejemplo 2

#### I. Selección de agregados graduados.

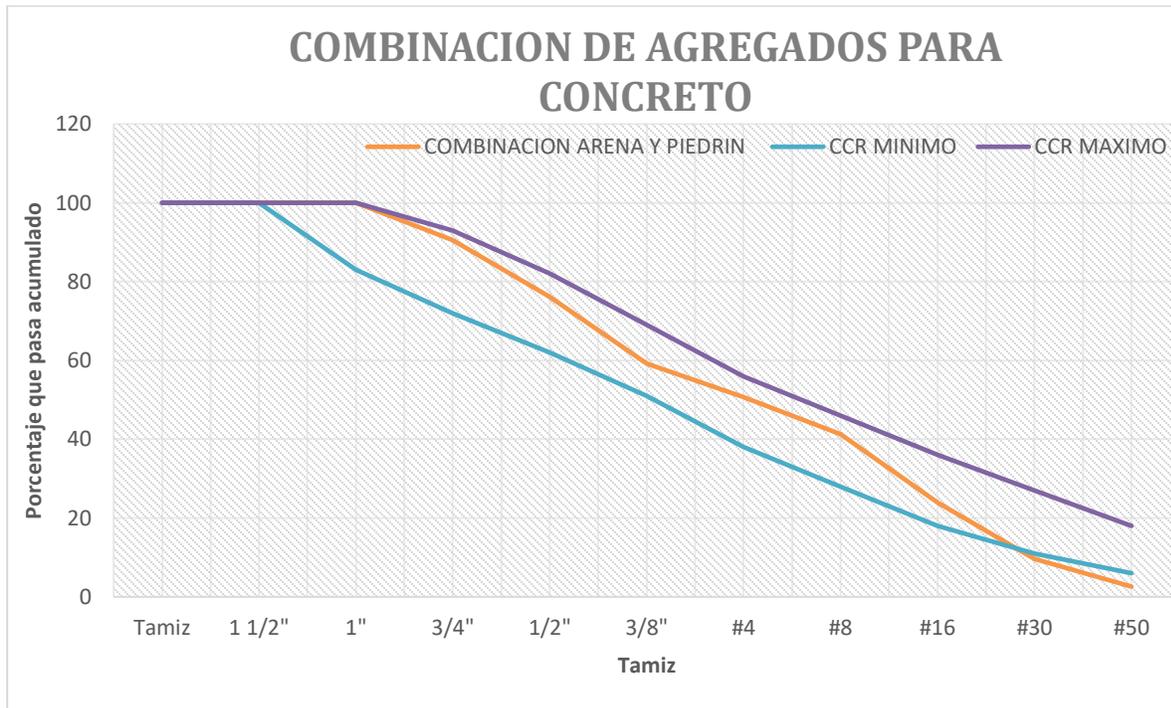


Gráfico 8: combinación de agregados para concreto  
Fuente: elaboración propia

#### II. Selección de contenido cementicio de rango medio.

$$\text{Material cementicio (\%)} = \frac{\text{Peso de material cementicio}}{(\text{Peso de material cementicio} + \text{peso de agregados secados al horno})} \times 100$$

Material cementicio (%)= 9.4

### III. Selección de intervalos de relación de humedad-densidad.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso del agua}}{(\text{Peso de material cementicio} + \text{peso de agregados secados al horno})} \times 100$$

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = 5.5$$

### IV. Método de ensayo Proctor modificado (ASTM D 1557)

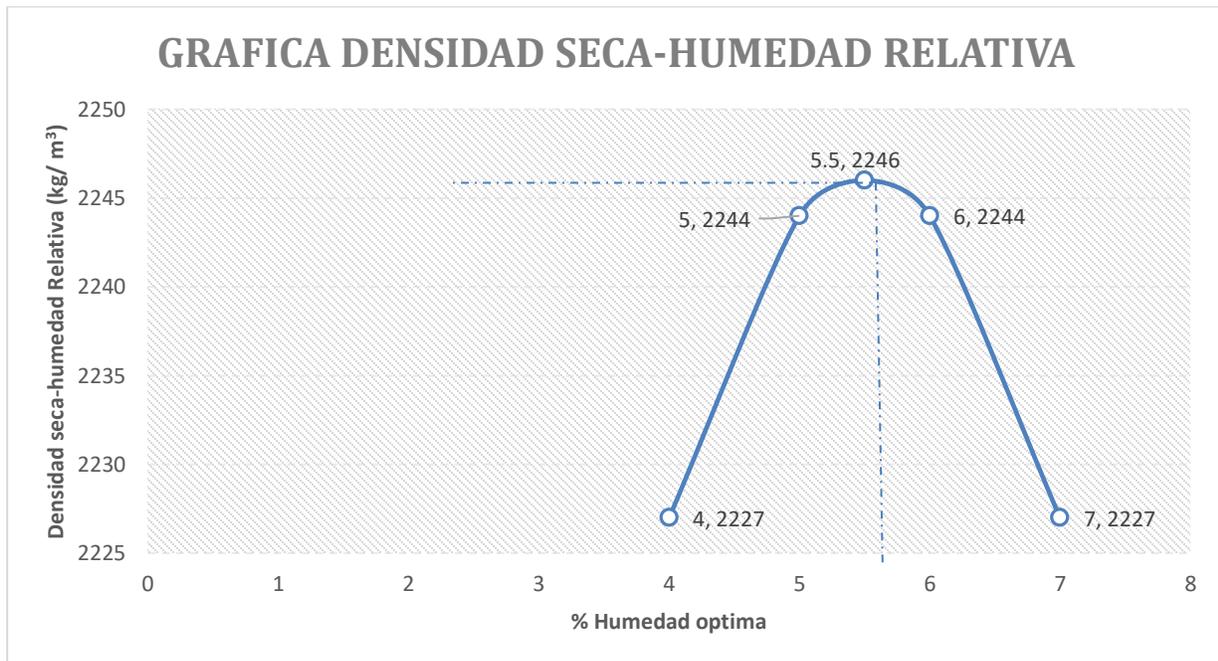


Gráfico 9: densidad seca- humedad relativa  
Fuente: elaboración propia (2017)

### V. Prueba de especímenes y selección de contenido cementicio.

No se realizaron esta pruebas para este ensayo.

## VI. Cálculo de proporción de mezcla

Contenido de cemento=	297.5	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad óptima=	5.5%	
Densidad seca máxima =	2246	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad específica cemento =	3.15	
Gravedad específica agua=	1	
Cantidad de agua preliminar	90	Kg/m <sup>3</sup>

- i. Combinación de agregados gruesos y finos: 55% agregado fino y 45% agregado grueso.
- ii. Densidad seca máxima= 2246 kg/m<sup>3</sup>  
Humedad óptima=5.5%  
Densidad máxima húmeda= 2246 kg/m<sup>3</sup> \* 1.055= 2369.53 kg/m<sup>3</sup>
- iii. Peso seco de los materiales=(2157.10 kg/m<sup>3</sup>\* 0.80056m<sup>3</sup>)+(297.5 kg/m<sup>3</sup>\* 0.09444m<sup>3</sup>)=1754.97 kg  
Contenido de cemento= 28.09 kg
- iv. Peso total de agregados=1754.97kg-28.09 kg=1726.88kg
- v. División del peso seco de arena y grueso por combinación de agregados como se determina en el paso 1:  
  
\*Agregado grueso=0.45\*1726.88kg= 777.096kg  
\*Agregado fino=0.55\*1726.88kg= 949.784kg
- vi. Cálculo peso de agua  
(2369.53 kg/m<sup>3</sup>- 2246 kg/m<sup>3</sup>)\*1.055=130.32 kg

Tabla 14: proporción de mezcla para 9.44% contenido cemento y 5.5% de humedad óptima.

	Proporciones de prueba		Proporciones para un rendimiento adecuado	
	Peso (Kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (kg)	Peso (Kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (Kg)
Cemento	298	0.09444	298	0.09444
peso de los agregados	2157	0.80056	2157	0.80056
Agua	90	0.0900	90	0.0900
1.5% de aire	---	0.0150	---	0.0150
Total		1.00		1.00

Fuente: *Elaboración propia (2017)*

**6.10. Ensayo en laboratorio según normativa NTG 41017 h 40 (ASTM C1435) Práctica estándar para elaborar especímenes cilíndricos de concreto compactado con rodillo utilizando un martillo vibratorio.**

Hechura de cilindros de concreto compactado con rodillo

Fecha: 24 de octubre de 2017

Mezcla proporción

Agregado fino: 55%

Agregado grueso 45%

Peso: 1834 kg/ m<sup>3</sup>

Cilindro de 6" x12"

Procedimiento:

1. Obtener altura completa de recipiente y calcular altura de agregados utilizados para la mezcla.

Tabla 15: muestra altura de cada agregado según recipiente utilizado.

	<b>Mezcla</b>	<b>Altura (cms)</b>
<b>Recipiente</b>	-	35.8
<b>Piedrin 1/2"</b>	45%	16.11
<b>Arena</b>	55%	19.69

*Fuente: Elaboración propia (2017)*



*Figura 27: agregado Grueso  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*



*Figura 28: recipiente con el que midió agregados.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*



Figura 29: agregado fino  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)

2. Definir si la mezcla alcanzará para realizar cuatro cilindros por medio del volumen preparado.

Tara de recipiente= 0.96 kg

Peso mezcla previa= 1834 kg/m<sup>3</sup>

Peso completo de recipiente con mezcla= 35.12kg

Masa de mezcla sin cemento= 34.20 kg

Cantidad de cemento

$$34.20kg * 15\% \text{ cemento} = 5.1 \text{ kilos de cemento}$$

Peso completo de mezcla con cemento

$$34.20 \text{ kg} + 5.1 \text{ kg} = 39.3 \text{ kg}$$

Volumen cilindros

$$\pi(3)^2 * 12 = 339.3 \text{ in}^3 = 0.005560 \text{ m}^3$$

Peso necesario para obtener volumen necesario calculado anteriormente,

$$1834 \frac{kg}{m^3} \times 0.005561 m^3 = 10.2 kg \text{ por cilindro}$$

Total de mezcla en 4 cilindros

$$10.2 kg \text{ por cilindro} * 4 \text{ cilindros} = 40.80 kg \text{ de mezcla}$$

Mezcla de agregado grueso y fino

$$34.20 kg + 15.80 kg = 50 kg$$

Cantidad necesaria de cemento para total mezcla de agregado grueso y fino

$$50 kg * 15\% \text{ de cemento} = 7.5 kilos \text{ de cemento}$$

Total de mezcla de agregados y cemento

$$50 kg + 7.5 kg = 57.5 kg \text{ de mezcla completa}$$

3. Calculo de agua en mezcla.

$$57.5 kg \text{ de mezcla} * 6.5\% = 3.74 kg \text{ de agua}$$

4. Limpieza y engrasar cilindros a utilizar para ensayo.



*Figura 30: cilindros utilizados para mezcla.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*

5. Realizar mezcla de todos los componentes, agregado grueso, agregado fino, agua y cemento. Esto según cantidades especificadas en calculo anterior.



*Figura 31: mezcladora y mezcla CCR.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*

6. Hechura de cilindros según normativa NTG 41017 h 40 Nivelación de cilindros con pasta de mezcla, esto para evitar el corte de los mismo para el ensayo a compresión.



*Figura 32: hechura de cilindros y vibro compactadora aplicada a cilindros.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*



*Figura 33: nivelación final de cilindros.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*

7. Limpieza de todo el equipo utilizado (carreta, pala, concretera, vibro compactadora y piso)
8. Desencofrado de cilindros a las 24 horas y se deja en piletas con agua para su fraguado, cada pileta cuenta con temperatura regulada.



Figura 34: desencofrado de cilindros y la colocación de estos en piletas para su fraguado.  
Fuente: Laboratorio CETEC (2017)

9. Prueba a compresión de cilindros a 7 días y a 28 días.



Figura 35: prueba resistencia a compresión de cilindros a 7 días y 28 días.  
fuente: laboratorio CETEC (2017)

**6.11. Ensayo en laboratorio según normativa NTG 41017 h2 (ASTM C78)**  
**Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto**  
**(utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz)**

Hechura de viga de concreto compactado con rodillo

Fecha: 26 de octubre de 2017

Mezcla proporción

Agregado fino: 55%

Agregado grueso 45%

Masa: 1834 kg/ m<sup>3</sup>

Cilindro de 6" x12"

Procedimiento:

1. Obtener altura completa de recipiente y calcular altura de agregados utilizados para la mezcla.

Tabla 16: Muestra resultado de altura según recipiente y mezcla

	<b>Mezcla</b>	<b>Altura (cms)</b>
<b>Recipiente</b>	-	35
<b>Piedrin 1/2"</b>	45%	15.75
<b>Arena</b>	55%	19.25

*Fuente: Elaboración propia (2017)*



Figura 36: prueba resistencia a compresión de cilindros a 7 días y 28 días.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)

2. Definir si la mezcla alcanzara para realizar dos vigas por medio del volumen preparado.

Tara de recipiente= 0.88 kg

Peso mezcla previa=  $1834 \text{ kg/m}^3$

Peso completo de recipiente con mezcla= 34 kg

Peso de mezcla sin cemento= 33.12 kg

Cantidad de cemento

$$33.12 \text{ kg} * 15\% \text{ cemento} = 4.97 \text{ kilos de cemento}$$

Peso completo de mezcla con cemento

$$33.12 \text{ kg} + 4.97 \text{ kg} = 38.09 \text{ kg}$$

Volumen viga dimensiones internas

$$0.53 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} = 0.012 \text{ m}^3 \times 2 = 0.024 \text{ m}^3$$

Peso necesario para obtener volumen necesario calculado anteriormente,

$$1834 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.012 \text{ m}^3 = 22.01 \text{ kg por viga}$$

Total de mezcla en 2 vigas

$$22.01 \text{ kg por cilindro} * 2 \text{ viga} = 44.02 \text{ kg de mezcla}$$

Mezcla de agregado grueso y fino

$$33.12 \text{ kg} + 33.34 \text{ kg} + 32.62 \text{ kg} = 99.08 \text{ kg}$$

Cantidad necesaria de cemento para total mezcla de agregado grueso y fino

$$99.08 \text{ kg} * 15\% \text{ de cemento} = 14.86 \text{ kilos de cemento}$$

Total de mezcla de agregados y cemento

$$99.08 \text{ kg} + 14.86 \text{ kg} = 113.94 \text{ kg de mezcla completa}$$

3. Calculo de agua en mezcla.

$$113.94 \text{ kg de mezcla} * 6.8\% = 7.78 \text{ kg de agua}$$

4. Limpieza y engrasar vigas a utilizar para ensayo.



*Figura 37: Vigas utilizadas para mezcla.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*

5. Realizar mezcla de todos los componentes de la mezcla, agregado grueso, agregado fino, agua y cemento. Esto según cantidades especificadas en calculo anterior.



*Figura 38: mezcladora y mezcla CCR para ensayo de vigas.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*

- Realizar ensayo según especificaciones de normativa.



*Figura 39: hechura de vigas y vibro compactadora aplicada a vigas.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*

- Nivelación de vigas con pasta de mezcla, esto para evitar el corte o nivelación posterior de vigas.



*Figura 40: nivelación final de vigas.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)*

- Limpeza de todo el equipo utilizado (carreta, pala, concretera, vibro compactadora y piso)
- Desencofrado de vigas a las 24 horas.

10. Prueba a compresión de cilindros a 7 días y a 28 días.



Figura 41: prueba Modulo de ruptura mezcla CCR a 7 días y 28 días.  
Fuente: laboratorio CETEC (2017)

## RESULTADOS

### Resistencia a compresión

Tabla 17: resultado cilindros a compresión según normativa según normativa NTG 41017 h 40 (ASTM C 1435)

Fecha de hechura	Fecha de ruptura	Edad (días)	Resistencia compresión (PSI)
24.10.2017	31.10.2017	7	4,961.00
24.10.2017	21.11.2017	28	5,560.00

Fuente: Elaboración propia (2017)

### Módulo de ruptura

Tabla 18: módulo de ruptura vigas mezcla concreto compactado con rodillo según normativa NTG 41017 h2 (ASTM C 78)

Fecha de hechura	Fecha de ruptura	Edad (días)	Masa (Kg)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	modulo de ruptura (PSI)
26.10.2017	02.11.2017	7	29.79	534	153	153	613.88
26.10.2017	23.11.2017	28	30.01	535	154	152	761.94

Fuente: Elaboración propia (2017)

## INTEGRACIÓN DE COSTOS EN PROYECTO DE PAVIMENTO CCR EN GUATEMALA

A continuación, se muestra la integración del costo aproximado que puede llegar a tener la mezcla de concreto compactado con rodillo para pavimentos en Guatemala.<sup>4</sup>

El costo de concreto se consideró a partir de las siguientes condiciones:

- La sub-rasante y rasante del tramo a trabajar con concreto compactado con rodillo ya se encuentra en óptimas condiciones para colocación de pavimento.
- Tramo de pavimento de longitud 1 km con ancho de 6 metros y un espesor de 0.20 mts, para la producción y colocación se asume un .02 mts adicionales de espesor por el proceso de compactación que este requiere.
- El tramo presupuestado se encuentra en Cobán, Guatemala. Es un proyecto que no existe, únicamente se le dio ubicación para poder cuantificar.
- La planta de CCR está ubicada a 30 km del proyecto, dicho datos únicamente es con fines de cuantificación.

---

<sup>4</sup> Los precios unitarios de maquinaria y equipo, mano de obra y material fueron tomados de documento más actualizado hasta el momento de la cámara de la construcción del año 2018, igual estos valores puede variar según ubicación y empresa a contratar.

## Producción

### INTEGRACIÓN COSTOS DE PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

<b>Renglón:</b>	Tramo pavimento con CCR en Coban, Guatemala		
	Para un tramo de 1 km con espesor de 20 cms y una seccion de 6 mts		
<b>Rendimiento</b>	60.00	m <sup>3</sup> / hrs	
<b>Cantidad contratada</b>	1,320.00	m <sup>3</sup>	

#### PRODUCCIÓN CCR CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA INICIAL 5000 PSI

<b>MAQUINARIA Y EQUIPO CON MATENIMIENTO</b>				
Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hra.	Sub-Total
1.00	Planta central	22.00	Q 1,500.00	Q 33,000.00
1.00	cargador frontal	22.00	Q 1,000.00	Q 22,000.00
1.00	Equipo de laboratorio	22.00	Q 396.00	Q 8,712.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 63,712.00</b>

<b>MANO DE OBRA CON PRESTACIONES</b>				
Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hra.	Sub-Total
1.00	Encargado de planta	22.00	Q 90.00	Q 1,980.00
1.00	operador de planta central	22.00	Q 80.00	Q 1,760.00
1.00	ayudante general	22.00	Q 35.00	Q 770.00
1.00	Operador de cargador frontal	22.00	Q 70.00	Q 1,540.00
1.00	laboratorista	22.00	Q 40.00	Q 880.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 6,930.00</b>
<b>HERRAMIENTAS (5% Mano de obra)</b>				<b>Q 346.50</b>

<b>MATERIALES</b>				
Cantidad	Descripción	P.U.	Unidad	Sub-Total
407.00	Arena (agregado fino)	109.51	m3	Q 44,570.57
308.00	Piedrin de 1/2" (agregado grueso)	202.19	m3	Q 62,274.52
339,529.00	Cemento nacional gris	1.76	Kg	Q 596,993.84
396.00	Agua	10.00	Lts	Q 3,960.00
33.00	Aditivo retardante de fraguado	194.00	gal	Q 6,402.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 714,200.93</b>

<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	Q 721,477.43
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	Q 353,523.94
<b>EQUIPO</b>	Q 63,712.00
<b>TOTAL SIN IVA</b>	Q 1,138,713.37
<b>IVA</b>	Q 136,645.60
<b>TOTAL CON IVA POR DIA</b>	Q 1,275,358.97
<b>TOTAL POR:</b>	<b>m3 Q 966.18</b>

Figura 42: costos aproximados de producción CCR para pavimentos en Guatemala.  
, Fuente: Elaboración propia (2018)

## Colocación

### INTEGRACIÓN COSTOS DE PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

**Renglón:** Tramo pavimento con CCR en Coban, Guatemala  
Para un tramo de 1 km con espesor de 20 cms y una seccion de 6 mts

**Rendimiento** 60.00 m<sup>3</sup>/ hrs

**Cantidad contratada** 1,320.00 m<sup>3</sup>

### COLOCACIÓN CCR

<b>MAQUINARIA Y EQUIPO CON MATENIMIENTO Y TRANSPORTE</b>				
Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hra.	Sub-Total
1.00	Pavimentadora mayor de 35,500 lbs	22.00	Q 2,100.00	Q 46,200.00
1.00	Rodo liso tipo tandem mas de 10 TNS. M.	22.00	Q 1,050.00	Q 23,100.00
1.00	Vibrocompactadora neumatico para mas de 8-11.9 TNS. M.	22.00	Q 950.00	Q 20,900.00
1.00	Iluminacion	22.00	Q 682.00	Q 15,004.00
1.00	Señalización preventiva	1.00	Q 10,000.00	Q 10,000.00
1.00	Flete traslado equipos	1.00	Q 120,000.00	Q 120,000.00
1.00	Equipo de laboratorio	8.00	Q 750.00	Q 6,000.00
2.64	Analisis de laboratorio	1.00	Q 3,000.00	Q 7,920.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 249,124.00</b>

<b>MANO DE OBRA CON PRESTACIONES</b>				
Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hra.	Sub-Total
1.00	<b>Supervisor</b>	22.00	Q 110.00	Q 2,420.00
2.00	Operador pavimentadora	22.00	Q 80.00	Q 3,520.00
1.00	Operador rodo liso tipo tandem	22.00	Q 70.00	Q 1,540.00
1.00	Operador vibrocompactadora	22.00	Q 70.00	Q 1,540.00
1.00	Topografo	22.00	Q 45.00	Q 990.00
2.00	cadenero	22.00	Q 25.00	Q 1,100.00
13.00	Grupo de colocación	22.00	Q 35.00	Q 10,010.00
1.00	laboratorista	22.00	Q 40.00	Q 880.00
1.00	asistente laboratorista	22.00	Q 25.00	Q 550.00
1.00	Viaticos supervisor por dia	3.00	Q 500.00	Q 1,500.00
1.00	Viaticos y hospedaje personal por persona	15.00	Q 2,640.00	Q 39,600.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 63,650.00</b>
<b>HERRAMIENTAS (5% Mano de obra)</b>				<b>Q 3,182.50</b>

<b>MATERIALES</b>				
Cantidad	Descripción	P.U.	Unidad	Sub-Total
<b>TOTAL</b>				<b>Q -</b>

<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	Q	66,832.50
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	Q	32,747.93
<b>EQUIPO</b>	Q	249,124.00
<b>TOTAL SIN IVA</b>	Q	348,704.43
<b>IVA</b>	Q	41,844.53
<b>TOTAL CON IVA POR DIA</b>	Q	390,548.96
<b>TOTAL POR:</b>	<b>m3</b>	<b>Q 295.87</b>

Figura 43: costos aproximados de colocación CCR para pavimentos en Guatemala.  
Fuente: Elaboración propia (2018)

## Acarreo

### INTEGRACIÓN COSTOS DE PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

**Renglón:** Tramo pavimento con CCR en Coban, Guatemala  
Para un tramo de 1 km con espesor de 20 cms y una seccion de 6 mts

**Rendimiento** 60.00 m<sup>3</sup>/ hrs  
**Cantidad contratada** 1,320.00 m<sup>3</sup>

#### ACARREO CCR

<b>MAQUINARIA Y EQUIPO CON MATENIMIENTO</b>				
Cantidad	Descripción	Km recorridos	Costo Km	Sub-Total
2.00	Camion de volteo	1,200.00	63	Q 151,200.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 151,200.00</b>

<b>MANO DE OBRA CON PRESTACIONES</b>				
Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hra.	Sub-Total
2.00	Operador Camion de volteo	22.00	30	Q 1,320.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 1,320.00</b>
<b>HERRAMIENTAS (5% Mano de obra)</b>				<b>Q 66.00</b>

<b>MATERIALES</b>				
Cantidad	Descripción	P.U.	Unidad	Sub-Total
<b>TOTAL</b>				<b>Q -</b>

<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	Q	1,386.00
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	Q	679.14
<b>EQUIPO</b>	Q	151,200.00
<b>TOTAL SIN IVA</b>	Q	153,265.14
<b>IVA</b>	Q	18,391.82
<b>TOTAL CON IVA POR DIA</b>	Q	171,656.96
<b>TOTAL POR:</b>	<b>M3</b>	<b>Q 130.04</b>

Figura 44: costos aproximados de acarreo CCR para pavimentos en Guatemala.  
Fuente: Elaboración propia (2018)

## Corte

### INTEGRACIÓN COSTOS DE PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

**Renglón:** Tramo pavimento con CCR en Coban, Guatemala  
 Para un tramo de 1 km con espesor de 20 cms y una sección de 6 mts  
**Rendimiento** 2,500.00 ml /día  
**Cantidad contratada** 6,000.00 ml

#### CORTE CCR

<b>MAQUINARIA Y EQUIPO CON MATENIMIENTO</b>				
Cantidad	Descripción	Hrs. Trabajo	Costo Hra.	Sub-Total
				Q -
<b>TOTAL</b>				<b>Q -</b>

<b>MANO DE OBRA CON PRESTACIONES</b>				
Cantidad	Descripción	P.U.	Unidad	Sub-Total
6,000.00	Corte siza a 1/3 de Espesor	13.70	ml	Q 82,194.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 82,194.00</b>
<b>HERRAMIENTAS (5% Mano de obra)</b>				<b>Q 4,109.70</b>

<b>MATERIALES</b>				
Cantidad	Descripción	P.U.	Unidad	Sub-Total
<b>TOTAL</b>				<b>Q -</b>

<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	Q	86,303.70
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	Q	42,288.8
<b>EQUIPO</b>	Q	-
<b>TOTAL SIN IVA</b>	Q	128,592.51
<b>IVA</b>	Q	15,431.10
<b>TOTAL CON IVA POR DIA</b>	Q	144,023.61
<b>TOTAL POR:</b>	ml	<b>Q 24.00</b>

Figura 45: costos aproximados de corte CCR para pavimentos en Guatemala.  
 Fuente: Elaboración propia (2018)

## Curado

### INTEGRACIÓN COSTOS DE PAVIMENTO DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO

<b>Renglón:</b>	Tramo pavimento con CCR en Coban, Guatemala		
	Para un tramo de 1 km con espesor de 20 cms y una seccion de 6 mts		
<b>Rendimiento</b>	2,500.00	m <sup>2</sup> / dia	
<b>Cantidad contratada</b>	6,000.00	m <sup>2</sup>	

#### CURADO CCR

<b>MAQUINARIA Y EQUIPO CON MATENIMIENTO</b>				
Cantidad	Descripción	Dias	Costo Dia	Sub-Total
1.00	Camion cisterna 2000 GLS	3.00	728	Q 2,184.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 2,184.00</b>

<b>MANO DE OBRA CON PRESTACIONES</b>				
Cantidad	Descripción	P.U.	Unidad	Sub-Total
6,000.00	Aplicacion curado	2.65	m <sup>2</sup>	Q 15,900.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 15,900.00</b>
<b>HERRAMIENTAS (5% Mano de obra)</b>				<b>Q 795.00</b>

<b>MATERIALES</b>				
Cantidad	Descripción	P.U.	Unidad	Sub-Total
6,000.00	Aditivo(base parafina y agua)	2.65	gal	Q 15,900.00
<b>TOTAL</b>				<b>Q 15,900.00</b>

<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	Q	32,595.00
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	Q	15,971.6
<b>EQUIPO</b>	Q	2,184.00
<b>TOTAL SIN IVA</b>	Q	50,750.55
<b>IVA</b>	Q	6,090.07
<b>TOTAL CON IVA POR DIA</b>	Q	56,840.62
<b>TOTAL POR:</b>	<b>m2</b>	<b>Q 9.47</b>

Figura 46: costos aproximados de curado CCR para pavimentos en Guatemala.  
Fuente: Elaboración propia (2018)

## Integración total costos producción y colocación CCR

PROYECTO: Tramo pavimento concreto compactado con rodillo

UBICACIÓN: Municipio de Coban, Guatemala

FECHA: Febrero 2018

Tramo pavimento con CCR en Coban, Guatemala  
Para un tramo de 1 km con espesor de 20 cms y una seccion de 6 mts

N.	ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	PRODUCCIÓN CCR	m3	1320.00	Q 939.13	Q 1,239,651.60
2	COLOCACIÓN CCR	m3	1320.00	Q 70.45	Q 92,994.00
3	ACARREO CCR	m3	1320.00	Q 130.04	Q 171,652.80
4	CURADO CCR	m2	6000.00	Q 9.47	Q 56,820.00
5	CORTE CCR	ml	6000.00	Q 24.00	Q 144,000.00
	<b>TOTAL CON IVA</b>				<b>Q1,705,118.40</b>

**PRECIO CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO  
CON RESISTENCIA 5000 PSI**      **Q1,291.76**      **m<sup>3</sup>**

*Figura 47: integración costos aproximados de curado CCR para pavimentos en Guatemala.  
Fuente: Elaboración propia (2018)*

## CONCLUSIONES

- La red vial total de Guatemala actualmente tiene deficiencias y problemas causados por el poco mantenimiento proporcionado a los pavimentos por motivos económicos, causando con esto una situación de menor desarrollo pues pocos países o empresarios quieren invertir o situarse en nuestro país ya que les representa altos costos la movilización de sus productos o materias primas por nuestra red vial. Considerando esta situación se propone el pavimento de concreto compactado con rodillo ya que dentro de sus ventajas se encuentra la poca inversión a largo plazo en mantenimiento haciendo posible que sea útiles durante más tiempo los pavimentos considerando de igual forma que aunque el costo inicial de este tipo de pavimento es alto sus beneficios a largo plazo lo hacen una posibilidad realista y aplicable.
- Este tipo de pavimento es una alternativa aplicable en Guatemala para carreteras de terracería y caminos rurales ya que de esta clasificación en la red vial de Guatemala actualmente representa un 55.4% que no se encuentra pavimentada por lo tanto se propone como una solución integral para el desarrollo y progreso del interior de nuestro país haciendo los accesos a comunidades o municipios que actualmente no tiene un fácil acceso sin cerrar la vía completamente pues este tipo de pavimento puede ser aperturado al tráfico al llegar al 65% de su resistencia de diseño y para velocidades no mayores a 50 kilómetros por hora.
- Esta técnica constructiva en pavimentos se produce y coloca con equipo que se utiliza en Guatemala para las técnicas clásicas de pavimentación; producción con plantas de mezclador central, transporte con camiones de volteo, colocación con pavimentadora de asfalto, la densidad con rodillo vibratorio, y puede ser curado con agua o emulsión asfáltica.

- La resistencia y densidad es determinada por el contenido de agua y la compactación del pavimento verificando la trabajabilidad por medio de la temperatura y alcalinidad de la mezcla. Estas verificaciones se realizan por medio del control y monitoreo tanto en laboratorio como en campo.

## RECOMENDACIONES

- Se debe considerar que para pavimentos concreto compactado rodillo su bajo costo de mantenimiento depende del diseño modulación de las losas, una buena calidad de sub-rasante, control de calidad en laboratorio y en campo para que la mezcla cumpla con todas su propiedades de diseño.
- La mezcla de concreto compactado con rodillo para ser aperturada al transito se debe considerar; realizar un tramo de prueba y los resultados obtenidos, el tipo de curado que se consideró.
- La planta de mezclado debe considerarse colocarse en una ubicación cercana al punto de ejecución del proyecto para que el abastecimiento de la mezcla no pierda humedad afectado la densidad y consistencia de la mezcla.
- El control de calidad en laboratorio y en campo debe estar estrictamente relacionados para cumplir con las propiedades estructurales para las cuales fue diseñado.

## BIBLIOGRAFÍA

AASHTO (1993). Guide for desing of pavement structures. Estados Unidos.

ACI Committee 325. (2001). Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. Estados Unidos.

Alvarado, J. (2014). Estudio descriptivo de la tecnología del concreto compactado con rodillo y su aplicabilidad en pavimentos. Universidad Militar Nueva Granada. Colombia.

Alvarado, R. Diaz, G. Somoza, C. (2004). Concreto compactado con pavimentadora como alternativa de pavimentación para red vial de El Salvador. Tesis inédita. Universidad de El Salvador. El Salvador.

American Concrete Pavement Association (2014). ACPA Guide Specification, roller-Compacted Concrete Pavements. Estados Unidos.

Benavides, JC. (2005). Bases estabilizadas (para pavimentos) utilizando tecnología del Concreto Compactado con Rodillo. Informe inédito. Costa Rica.

Dirección General de caminos (2016). Plan operativo anual. Guatemala.

ERMCO (2013). ERMCO Guide to Roller Compacted Concrete for pavements, Europa.

Fuhrman, Russell (2000). Engineering and Desing roller-compacted Concrete. Estados unidos.

Guerrero, Y. Ugarte, A. (2003). Posibilidades del uso de concreto compactado con rodillo (CCR) para construcciones de pavimentos en Nicaragua. Tesis inédita. Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.

Harrington, Dale(2010). Roller- Compacted Concrete Pavements. CProad Map. Estados Unidos.

Kiefer, O. (1986). Paving with roller compacted concrete. U.S Army Corps of Engineers. Estados Unidos.

Portland Cement Association (2004). Guide Specification for Construction of roller- Compacted Concrete Pavements. Estados Unidos.

Portland Cement Association (2010). Guide for roller- Compacted Concrete Pavements. Iowa State University. Estados Unidos.

Ríos, E. (2004). La utilización de pavimentos de concreto rodillado (PCR) para la construcción de calles y carreteras en Guatemala. Tesis inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Rocha, M. Estado del arte de los pavimentos de concreto compactado con rodillo. Brasil.

Yoon-moon, C. Kraus, R. (2008). Roller compacted concrete pavements. The University of Winsconsin- Milwaukee. Estados Unidos.

Zagaceta, I. Romero, R. (2008). El pavimento de concreto hidráulico premezclado en la modernización y rehabilitación de la avenida arboledas. Tesis inédita. Instituto Politécnico Nacional. México.

## ANEXOS



*Figura 48: acabado en pavimento CCR*  
*Fuente: A.G. PELTZ GROUP, LLC (2017)*



*Figura 49: sub-rasante y colocación pavimento CCR*  
*Fuente: A.G. PELTZ GROUP, LLC (2017)*



*Figura 50: curado con compuesto químico CCR  
Fuente: A.G. PELTZ GROUP, LLC (2017)*



*Figura 51: equipo de colocación  
Fuente: Kemper Construction (2016)*



*Figura 52: acabado bordillo CCR  
Fuente: Kemper Construction, (2016)*



*Figura 53: acabado final bordillo pavimento CCR  
Fuente: Kemper Construction (2016)*



*Figura 54: estructura de pavimento final CCR*  
*Fuente: Kemper Construction, (2016)*



*Figura 55: estructura de pavimento final CCR'*  
*Fuente: Cemex (2016)*



*Figura 56: proceso colocación pavimento CCR.  
Fuente: U.S. Army (2014)*