



**UNIVERSIDAD FEDERAL DE LA  
INTEGRACIÓN LATINOAMERICANA  
INSTITUTO LATINOAMERICANO DE  
TECNOLOGÍA, INFRAESTRUCTURA Y  
TERRITORIO**

**INGENIERÍA CIVIL DE INFRAESTRUCTURA**

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE PROYECTO DE RESTAURACIÓN DE UNA PISTA  
DE PAVIMENTO RÍGIDO DEL ÁREA INDUSTRIAL DE LA USINA DE ITAIPU**

**CHRISTIAN GABRIEL GONZÁLEZ DENTON**

Foz de Iguazú  
2021



**INSTITUTO LATINOAMERICANO DE  
TECNOLOGÍA, INFRAESTRUCTURA Y  
TERRITORIO**

**INGENIERÍA CIVIL DE INFRAESTRUCTURA**

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE PROYECTO DE RESTAURACIÓN DE UNA PISTA  
DE PAVIMENTO RÍGIDO DEL ÁREA INDUSTRIAL DE LA USINA DE ITAIPU**

**CHRISTIAN GABRIEL GONZÁLEZ DENTON**

Trabajo de Conclusión de Curso presentado al Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, como requisito parcial para la obtención de título de Ingeniero Civil de Infraestructura

Orientador: Prof. Dr. Noe Villegas Flores

Foz de Iguazú  
2021

CHRISTIAN GABRIEL GONZALEZ DENTON

**ANALISIS Y PROPUESTA DE PROYECTO DE RESTAURACIÓN DE UNA PISTA  
DE PAVIMENTO RÍGIDO DEL ÁREA INDUSTRIAL DE LA USINA DE ITAIPU**

Trabajo de Conclusión de Curso presentado  
al Instituto Latinoamericano de Tecnología,  
Infraestructura y Territorio de la Universidad  
Federal de la Integración Latinoamericana,  
como requisito parcial para la obtención de  
título de Ingeniero Civil de Infraestructura

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Noe Villegas Flores  
UNILA

---

Prof. Dr. Ana Carolina Parapinski dos Santos  
UNILA

---

Ing. Civil Claudio Neumann Junior  
M.Sc. por la UNILA

Foz de Iguazú, 04 de Junio de 2021.

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Christian Gabriel Gonzalez Denton

Curso: Ingeniería Civil de Infraestructura

Tipo de Documento	
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> monografia
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> dissertação
	<input type="checkbox"/> tese
	<input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais
	<input type="checkbox"/> _____

Título do trabalho acadêmico: ANALISIS Y PROPUESTA DE PROYECTO DE RESTAURACIÓN DE UNA PISTA DE PAVIMENTO RÍGIDO DE LA USINA DE ITAIPU

Nome do orientador(a): Noe Villegas Flores

Data da Defesa: 04 / 06 / 2021

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Responsável

Dedico este trabajo a mis padres y  
abuelos

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por sus infinitas bendiciones.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por permitir la realización de este sueño.

A los profesores que formaron parte de mi formación por sus enseñanzas a lo largo del curso, y en especial a mi orientador por su constante orientación, paciencia, y disposición.

A los ingenieros de la ENCC.DT por su orientación y enseñanzas durante la pasantía, y por los recursos que permitieron la realización de este trabajo.

A mi novia por su apoyo y cariño.

A mis amigos por su apoyo.

A todos aquellos que de una u otra manera hicieron posible la realización de este trabajo.

*El hombre que más ha vivido no es aquél que más años ha cumplido, sino aquel que más ha experimentado la vida. Rousseau*

GONZALEZ DENTON, Christian Gabriel. **ANÁLISIS Y PROPUESTA PROYECTO DE RESTAURACIÓN DE UNA PISTA DE PAVIMENTO RÍGIDO DEL ÁREA INDUSTRIAL DE LA USINA DE ITAIPU**. 2021. 290p. Trabajo de Conclusión de Curso (Graduación en Ingeniería Civil de Infraestructura) – Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz do Iguaçu, 2021.

## RESUMEN

Las manifestaciones patológicas presentes en un pavimento rígido son indicadores de comportamiento y desempeño durante su vida útil. El estudio y diagnóstico del deterioro y deformación de estos pavimentos suponen la concepción de directrices y orientaciones en la etapa de reparación y restauración de una vía. El grado de deterioro de un pavimento rígido puede determinarse en base a las mediciones de los indicadores de calidad de forma superficial y estructural, para lo cual fue desarrollado un manual que permite la identificación de la condición del pavimento con base en la literatura consultada. El estado físico del pavimento puede predecirse y calcularse con criterios de ingeniería, levantamientos existentes y con modelos de deterioro adecuados. Para ello, es necesario contar con una base de datos con indicadores de desempeño que permita analizar y alimentar modelos de comportamiento del pavimento en aras de buscar el mejor programa de conservación del pavimento. En la usina de Itaipu, a amplia base de datos del histórico de la pista de aguas abajo con levantamientos manuales y automatizados y ensayos no destructivos propició un análisis exhaustivo de los defectos, verificándose la objetividad y rigurosidad de los levantamientos automatizados que fueron comparados con los levantamientos manuales, demostrando ambos un estado de la pista coincidente con el periodo de funcionamiento de esta, tomando como base la literatura consultada. Además, se observó que la implementación de ensayos no destructivos proporciona datos confiables de las condiciones del pavimento, factibles de ser analizados, y que permitieron conocer la situación estratigráfica y estructural del pavimento. El estudio desarrollado en este trabajo de conclusión de curso ha sugerido un proyecto para recuperación (o restauración) para la pista de aguas abajo en la elevación 144,00 del área industrial de la usina de Itaipu por medio de softwares y basados en normativas internacionales.

**Palabras clave:** Pavimento rígido, Proyecto, Manifestaciones Patológicas, Restauración.

GONZALEZ DENTON, Christian Gabriel. **ANALYSIS AND PROJECT DESIGN PROPOSAL OF A RIGID PAVEMENT ROAD IN ITAIPU DAM**. 2021. 290p. Course Completion Work (Graduation in Infrastructure Civil Engineering) – Federal University for Latin American Integration, Foz do Iguaçu, 2021.

## **ABSTRACT**

Pathological manifestations in a rigid pavement serve as indicators of its behavior and performance throughout its lifespan. The study and diagnosis of the deterioration and deformation of these pavements suppose the conception of guidelines in the stage of repair and restoration of a road. The degree of deterioration of a rigid pavement can be determined based on the measurements of the quality indicators of superficial and structural form, for which a manual was developed that allows the identification of the condition of the pavement based on the literature consulted. The physical state of the pavement can be predicted and calculated with engineering criteria, existing surveys and with suitable deterioration models. For this, it is necessary to have a database with performance indicators that allows analyzing and feeding models of pavement behavior to find the best pavement conservation program. At the Itaipu Dam, an extensive database of the history of the downstream runway with manual and automated surveys and non-destructive test provided an exhaustive analysis of the defects, verifying the objectivity and rigor of the automated surveys that were compared with the manual surveys, both demonstrating a state of the runway coinciding with its operating period, based on the literature consulted. In addition, it was observed that the implementation of non-destructive test provides reliable data on pavement conditions, feasible to be analyzed, and that allowed to know the stratigraphic and structural situation of the pavement. The study developed in this course completion work has suggested a new project for the downstream runway at elevation 144,00 of Itaipu Dam Industrial Area by using softwares and based on international regulations.

**Key words:** Rigid Pavement, Project design, Pavement distresses, Rehabilitation.

GONZALEZ DENTON, Christian Gabriel. **ANÁLISE E PROPOSTA DE PROJETO DE RESTAURAÇÃO DE UMA PISTA DE PAVIMENTO RÍGIDO DA ÁREA INDUSTRIAL DA USINA DE ITAIPU** 2021. 290p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

## RESUMO

As manifestações patológicas presentes em um pavimento rígido são indicadores de comportamento e desempenho durante sua vida útil. O estudo e diagnóstico da degradação e deformação destes pavimentos pressupõe a concepção de diretrizes e orientações na fase de reparação e restauração de uma estrada. O grau de deterioro de um pavimento rígido pode ser determinado com base nas medições dos indicadores de qualidade de forma superficial e estrutural, para os quais foi elaborado um manual que permite a identificação do estado do pavimento com base na literatura consultada. O estado físico do pavimento pode ser previsto e calculado com critérios de engenharia, levantamentos existentes e com modelos de deterioro adequados. Para isso, é necessário contar com um banco de dados com indicadores de desempenho que permita analisar e alimentar modelos de comportamento do pavimento para encontrar o melhor programa de conservação do pavimento. Na usina de Itaipu, a extensa base de dados do histórico da pista de jusante com levantamentos manuais e automatizados e ensaios não destrutivos proporcionou uma análise exaustiva dos defeitos, verificando a objetividade e rigor dos levantamentos automatizados que foram comparados com os levantamentos manuais, ambos demonstrando um estado da pista coincidente com o seu período de funcionamento, tendo como base a literatura consultada. Além disso, observou-se que a realização de ensaios não destrutivos fornece dados confiáveis sobre as condições dos pavimentos, factíveis de serem analisados, e que permitem conhecer a situação estratigráfica e estrutural do pavimento. O estudo desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso propõe um projeto para recuperação (ou restauração) pista de jusante na cota 144,00 da Área Industrial da usina de Itaipu por meio de softwares e com base em normas internacionais.

**Palavras-chave:** Pavimento rígido, Projeto, Manifestações Patológicas, Restauração.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Corte transversal de un pavimento asfáltico .....	28
<b>Figura 2</b> - Corte longitudinal de un pavimento de hormigón .....	28
<b>Figura 3</b> - Porcentaje de pistas de pavimento de hormigón en relación con el total pavimentado.....	30
<b>Figura 4</b> - Corte longitudinal de un pavimento de hormigón simple.....	33
<b>Figura 5</b> – Algunos vehículos pertenecientes a la clasificación (Camiones) .....	38
<b>Figura 6</b> – Algunos vehículos pertenecientes a la clasificación (Buses).....	39
<b>Figura 7</b> – Ficha I de contaje manual .....	41
<b>Figura 8</b> – Ficha II de contaje manual .....	41
<b>Figura 9</b> – Detección de las clases (arriba) y comparación entre conteo manual y automático por deep learning (abajo).....	43
<b>Figura 10</b> – Detección de las clases (arriba) y precisión del conteo en diferentes muestreos y métodos (abajo).....	44
<b>Figura 11</b> – Relación entre el tipo de suelo encontrado en la subrasante y el valor k correspondiente.....	46
<b>Figura 12</b> – Correlación entre el CBR y el Coeficiente de recalque.....	46
<b>Figura 13</b> – Tipos de subbase para pavimentos de hormigón .....	47
<b>Figura 14</b> – Recomendaciones de la DNIT para subbases granulares .....	48
<b>Figura 15</b> – Recomendaciones de la DNIT para subbases tratadas .....	49
<b>Figura 16</b> – Aumento de k debido a la presencia de A) subbase granular (Superior izquierda), B) subbase de grava tratada con cemento (superior derecha), C) subbase de suelo cemento (Inferior izquierda) y D) subbase de hormigón compactado con rodillo(Inferior derecha) .....	50
<b>Figura 17</b> – Valores de equivalencia de carga ESALF .....	53
<b>Figura 18</b> – Valores de confiabilidad recomendados.....	54
<b>Figura 19</b> – Valores de desviación estándar normal $Z_R$ .....	54
<b>Figura 20</b> – Valores de desviación estándar $S_0$ .....	54
<b>Figura 21</b> –Serviciabilidad y Valores de Aceptabilidad.....	55
<b>Figura 22</b> –Recomendaciones de Serviciabilidad $p_0$ , pt.....	55
<b>Figura 23</b> –Valores de Resistencia a la Flexotracción $S'c$ .....	56
<b>Figura 24</b> –Coeficiente de Drenaje $C_d$ .....	56
<b>Figura 25</b> –Coeficiente de Transferencia de Carga J .....	57

<b>Figura 26</b> – Captura de pantalla de interfaz del software para pavimentos rígidos EqAASHTO93 .....	58
<b>Figura 27</b> – Curvas de fatiga .....	60
<b>Figura 28</b> – Factor de seguridad de carga.....	61
<b>Figura 29</b> – Ejemplo de Trafico Esperado .....	61
<b>Figura 30</b> – Ejemplo de llenado de datos de proyecto.....	62
<b>Figura 31</b> – Tensión Equivalente Ejes Simples y Tándem Doble – Sin banquina ....	62
<b>Figura 32</b> – Tensión Equivalente Tándem Triple - Sin banquina.....	63
<b>Figura 33</b> – Tensión Equivalente Ejes Simples y Tándem Doble – Con banquina...	63
<b>Figura 34</b> – Tensión Equivalente Tándem Triple - Con banquina.....	64
<b>Figura 35</b> – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Sin banquina – Sin pasadores.....	65
<b>Figura 36</b> – Factor de Erosión Tándem Triple – Sin banquina – Sin pasadores .....	65
<b>Figura 37</b> – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Con banquina – Sin pasadores.....	66
<b>Figura 38</b> – Factor de Erosión Tándem Triple – Con banquina – Sin pasadores .....	66
<b>Figura 39</b> – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Sin banquina – Con pasadores.....	67
<b>Figura 40</b> – Factor de Erosión Tándem Triple – Sin banquina – Con pasadores .....	67
<b>Figura 41</b> – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Con banquina – Con pasadores.....	68
<b>Figura 42</b> – Factor de Erosión Tándem Triple – Con banquina – Con pasadores....	68
<b>Figura 43</b> – Ábaco para Análisis de fatiga con o sin banquina – Número admisible en base al factor de fatiga .....	69
<b>Figura 44</b> – Ábaco para Análisis de erosión sin banquina – Número admisible en base al factor de erosión.....	70
<b>Figura 45</b> – Ábaco para Análisis de erosión con banquina – Número admisible en base al factor de erosión.....	71
<b>Figura 46</b> – Captura de pantalla de interfaz del software para pavimentos rígidos PCAcálculo.....	72
<b>Figura 47</b> – Junta transversal de retracción serrada (Izquierda) y abierta en hormigón fresco (derecha) .....	74
<b>Figura 48</b> – Espaciamiento entre juntas recomendado para tipo de agregado empleado.....	74

<b>Figura 49</b> – Pavimento de hormigón con juntas oblicuas .....	75
<b>Figura 50</b> – Esquemas de Junta de construcción planeada (arriba), Junta de construcción de emergencia (abajo) .....	76
<b>Figura 51</b> – Junta de expansión con barras de transferencia (arriba) y de encuentro (abajo) .....	77
<b>Figura 52</b> – Junta de articulación con encaje tipo macho-hembra.....	78
<b>Figura 53</b> – Junta de construcción para ejecución por carril (Izquierda) y ejecución total (derecha) .....	79
<b>Figura 54</b> – Factores de forma recomendados para sellante aplicado en el lugar (arriba) y premoldeados (abajo) .....	80
<b>Figura 55</b> – Recomendación Backer Rod (arriba) e implementación (abajo) .....	81
<b>Figura 56</b> – Recomendaciones Barras de Transferencia .....	82
<b>Figura 57</b> – Captura de pantalla del software DowelCAD .....	82
<b>Figura 58</b> – Junta transversal con pasadores.....	82
<b>Figura 59</b> – Junta longitudinal con barras de anclaje sección debilitada (izquierda) y encaje tipo macho-hembra (derecha).....	83
<b>Figura 60</b> – Telas soldadas tipo Q disponibles en Brasil (Acero CA-60) .....	84
<b>Figura 61</b> – Levantamiento de Placas .....	86
<b>Figura 62</b> – Grietas de Esquina .....	86
<b>Figura 63</b> – Placa Dividida.....	87
<b>Figura 64</b> – Escalonamiento de Juntas .....	88
<b>Figura 65</b> – Falla en el sellante de la Junta .....	89
<b>Figura 66</b> – Desnivel Calzada-Banquina .....	89
<b>Figura 67</b> – Grietas Diagonales .....	90
<b>Figura 68</b> – Grietas Transversales .....	91
<b>Figura 69</b> – Grietas Longitudinales.....	91
<b>Figura 70</b> – Grandes y Pequeñas reparaciones (izquierda y derecha respectivamente).....	92
<b>Figura 71</b> – Desgaste Superficial.....	93
<b>Figura 72</b> – Bombeo de Finos .....	93
<b>Figura 73</b> – Quiebres Localizados .....	94
<b>Figura 74</b> – Fisuras Superficiales .....	95
<b>Figura 75</b> – Fisuras por retracción plástica.....	95
<b>Figura 76</b> – Quiebres en las esquinas .....	96

<b>Figura 77</b> – Desportillamiento en las juntas.....	97
<b>Figura 78</b> – Placa Saltarina .....	97
<b>Figura 79</b> – Asentamiento .....	98
<b>Figura 80</b> – Bache .....	99
<b>Figura 81</b> – Interpretación de la Irregularidad Longitudinal .....	100
<b>Figura 82</b> – Equipamiento Pavement Scanner (Izquierda) y Disposición y alcance de los sensores a laser del Pavement Scanner (Derecha) .....	102
<b>Figura 83</b> – Rangos de variación del IRI .....	102
<b>Figura 84</b> – Determinación del número mínimo de muestras (n) ( $e=\pm 5$ ) .....	104
<b>Figura 85</b> – Ficha de Inspección.....	109
<b>Figura 86</b> – Ejemplo de Gráfico de Valor Deducible.....	110
<b>Figura 87</b> –Gráfico de Valor Deducible Corregido.....	111
<b>Figura 88</b> – Escala de evaluación del ICP.....	111
<b>Figura 89</b> – Gráfico para evaluación del desempeño del pavimento .....	112
<b>Figura 90</b> – Laser del Pavement Scanner escaneando el defecto .....	113
<b>Figura 91</b> – Imagen 3D (Izquierda) y profundidad (Derecha) .....	114
<b>Figura 92</b> – Funcionamiento del FWD y cuenco de Deflexiones .....	116
<b>Figura 93</b> – Diagrama del concepto de transferencia de carga .....	118
<b>Figura 94</b> – Cuenco de deflexiones en la pista experimental de la USP .....	118
<b>Figura 95</b> – Valores Típicos de AREA y d0 .....	119
<b>Figura 96</b> – Valores Típicos de AREA y d0 .....	119
<b>Figura 97</b> – Esquema de la relación entre frecuencia, longitud de onda, resolución y profundidad de alcance del GPR.....	120
<b>Figura 98</b> – Ejemplo de las reflexiones causadas por objetos puntuales (Izquierda) y por las capas capas del terreno (Derecha) .....	121
<b>Figura 99</b> – Fluxograma de etapas.....	122
<b>Figura 100</b> – Página del Manual.....	124
<b>Figura 101</b> –Pistas de Acceso entre Margen Derecha y Margen Izquierda.....	125
<b>Figura 102</b> – Sistema de Archivo Técnico (SAT) para búsqueda de documentos..	125
<b>Figura 103</b> – Ejemplo de documento disponible en el Sistema de Archivo Técnico .....	127
<b>Figura 104</b> – PavScan (Arriba) y Falling Weight Deflectometer (Abajo). .....	128
<b>Figura 105</b> – Inventario de Superficie en Excel – Tramo 3B .....	129

<b>Figura 106</b> – Conteo volumétrico de tráfico de las pistas de aguas arriba y aguas abajo. ....	130
<b>Figura 107</b> – Ficha de Inspección.....	130
<b>Figura 108</b> – Captura de Pantalla - Planilla de Datos.....	131
<b>Figura 109</b> – Captura de Pantalla – Planilla de Cálculo .....	132
<b>Figura 110</b> – Captura de Pantalla - Memorial de Cálculo y Proyecto Geométrico..	133
<b>Figura 111</b> – Dibujo en AutoCAD .....	134

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> – Tipos de pavimentos de hormigón en placas .....	31
<b>Tabla 2</b> – Defectos considerados para cálculo del Índice de Condición de Pavimentos (ICP).....	105
<b>Tabla 3</b> – Documentos base de pistas de la elevación 144 m. ....	126

## INDICE

<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>21</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>25</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	25
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
<b>3 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>26</b>
3.1 PAVIMENTOS.....	26
3.1.1 Pavimentos Flexibles.....	27
3.1.2 Pavimentos Rígidos.....	28
3.1.2.1 <i>Historia y contexto de los Pavimentos de Hormigón</i> .....	29
3.1.2.2 <i>Comparativa entre pavimentos rígidos y flexibles</i> .....	30
3.1.2.3 <i>Tipos de Pavimento de Hormigón</i> .....	31
3.1.2.3.1 Pavimento de Hormigón Simple .....	31
3.1.2.3.2 Pavimento de hormigón compactado con rodillo (CCR).....	33
3.1.2.3.3 Pavimento de Hormigón Reforzado.....	33
3.1.2.3.4 Pavimento de Hormigón Protendido.....	34
3.1.2.3.5 Pavimento de Hormigón Pre-fabricado.....	35
3.1.2.3.6 Whitetopping .....	35
3.2 PROYECTO Y DISEÑO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN.....	36
3.2.1 Estudio de Tráfico .....	38
3.2.1.1 <i>Vehículos</i> .....	38
3.2.1.2 <i>Volumen de tráfico</i> .....	39
3.2.1.3 <i>Contaje volumétrico</i> .....	40
3.2.1.4 <i>Proyección de tráfico</i> .....	44
3.2.2 Soporte del Pavimento .....	45
3.2.2.1 <i>Subrasante</i> .....	45
3.2.2.2 <i>Subbase</i> .....	47

3.2.2.3 Incremento del Coeficiente de Asentamiento debido a la presencia de subbase .....	50
3.2.3 Drenaje de Pavimentos .....	51
3.2.4 Métodos de Dimensionamiento .....	51
3.2.4.1 Método de la American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO 93.....	51
3.2.4.1.1 Ecuación AASHTO 93.....	52
3.2.4.1.2 Coeficientes de Entrada .....	52
3.2.4.1.3 Software EqAASHTO 93 .....	58
3.2.4.2 Método de la Portland Cement Association – PCA 84 .....	59
3.2.4.2.1 Modelos de falla .....	59
3.2.4.2.2 Procedimiento .....	60
3.2.4.2.3 Software PCAcálculo.....	72
3.2.5 Proyecto Geométrico.....	73
3.2.5.1 Juntas Transversales .....	73
3.2.5.1.1 Junta transversal de retracción .....	73
3.2.5.1.2 Junta transversal de retracción con pasadores .....	75
3.2.5.1.3 Junta transversal de construcción .....	75
3.2.5.1.4 Junta de expansión .....	76
3.2.5.2 Juntas Longitudinales.....	77
3.2.5.2.1 Juntas longitudinales de articulación .....	77
3.2.5.2.2 Juntas longitudinales de articulación con barras de anclaje.....	78
3.2.5.2.3 Juntas de construcción.....	78
3.2.5.3 Abertura de Juntas .....	79
3.2.5.4 Sellante en Juntas.....	80
3.2.6 Barras de Transferencia, Anclaje y Armadura de Retracción.....	81
3.2.6.1 Barras de Transferencia.....	81
3.2.6.2 Barras de Anclaje .....	83

3.2.6.3 Armadura de retracción .....	83
3.3 MANIFESTACIONES PATOLÓGICAS E IRREGULARIDADES EN PAVIMENTOS .....	84
3.3.1 Levantamiento de Placas .....	85
3.3.2 Grietas de Esquina .....	86
3.3.3 Placa Dividida.....	86
3.3.4 Escalonamiento de Juntas .....	87
3.3.5 Deficiencias en el Sellado de las Juntas .....	88
3.3.6 Desnivel Calzada-Banquina .....	89
3.3.7 Grietas Lineares .....	89
3.3.7.1 Grietas Transversales .....	90
3.3.7.2 Grietas Longitudinales.....	91
3.3.8 Grandes o Pequeñas Reparaciones .....	91
3.3.9 Desgaste Superficial.....	92
3.3.10 Bombeo .....	93
3.3.11 Quiebres Localizados.....	94
3.3.12 Pasos a Nivel .....	94
3.3.13 Fisuras Superficiales (tipo malla) y Descascaramiento .....	94
3.3.14 Fisuras por Retracción Plástica.....	95
3.3.15 Desportillamientos o Quiebres en las Esquinas .....	96
3.3.16 Desportillamiento en los Bordos de las Juntas.....	96
3.3.17 Placa Saltarina .....	97
3.3.18 Asentamiento .....	98
3.3.19 Baches o Agujeros. ....	98
3.4 INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS .....	99
3.4.1 Índice de Irregularidad Internacional (IRI) .....	100
3.4.2 Índice de Condición del Pavimento (ICP) .....	103

3.4.2.1 Definición de Trecho para Inspeccionar .....	103
3.4.2.2 Levantamiento de Defectos .....	104
3.4.2.3 Cálculo del ICP .....	110
3.4.2.4 Evaluación del Pavimento .....	112
3.4.2.5 Levantamiento Automatizado – Scanner de Pavimento .....	113
3.4.3 Deflexión en Pavimentos .....	115
3.4.3.1 Medición .....	115
3.4.3.2 Retroanálisis .....	116
3.4.4 Evaluación Estratigráfica .....	119
3.5 MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN .....	121
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>122</b>
4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ELABORACIÓN DE MANUAL DE INSPECCIÓN .....	122
4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS DE PROYECTO, REPAROS Y ESTADO ACTUAL .....	124
4.3 ANÁLISIS Y COMPARATIVA DE LOS DATOS .....	131
4.4 PROPUESTA DEL PROYECTO DE RESTAURACIÓN .....	132
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>135</b>
<b>6 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>137</b>
6.1 CONCLUSIONES .....	137
6.2 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS .....	138
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>
<b>APÉNDICE A – MANUAL UNIFICADO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE DEFECTOS PRESENTES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS .....</b>	<b>143</b>
<b>APÉNDICE B – ANÁLISIS DE DEFECTOS E HISTÓRICO DE LA PISTA DE ÁGUAS ABAJO.....</b>	<b>175</b>
<b>APÉNDICE C – PROPUESTA DE PROYECTO DE PISTA DE AGUAS ABAJO – MEMORIAL DE CÁLCULO Y PROYECTO GEOMÉTRICO Y DE JUNTAS .....</b>	<b>255</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

La construcción de carreteras tuvo inicio miles de años atrás con el objetivo de facilitar el transporte de personas y bienes, con los años, se implementaron técnicas de planeamiento y proyecto, se han desarrollados mejores procesos constructivos y se hizo han venido utilizando materiales innovadores a fin de mejorar las condiciones ofrecidas al usuario tanto en seguridad como en comodidad.

En base al comportamiento estructural del material empleado en la capa de rodadura es posible identificar dos tipos de pavimentos. Según el Departamento Nacional de Infraestructura y Transporte (DNIT, 2006) los pavimentos flexibles consisten en estructuras multicapas, que sufren deformaciones elásticas y distribuyen las cargas aplicadas en valores equivalentes. En Brasil, según Santos (2011) este tipo de pavimento ha sido por décadas una alternativa técnico económico más viable con respecto a los pavimentos de hormigón rígido.

Por su parte, los pavimentos rígidos o de hormigón, absorben las cargas aplicadas debido a su elevada rigidez cuando comparados con las capas inferiores (DNIT, 2006); pudiendo ser simples o reforzados con acero, los cuales, según Bianchi, et al (2008) destacan entre otros aspectos, por su mayor seguridad ofrecida al usuario en términos de distancia de frenado y menor difusión de luz además de mejor durabilidad y baja necesidad de mantenimiento en comparación con pavimentos flexibles que están caracterizados por aglutinantes. Estas características no eximen al pavimento rígido de presentar manifestaciones patológicas, las cuales pueden deberse, entre otros factores, a las propiedades de los materiales, detalles de proyecto, procesos constructivos y errores en la ejecución.

Según Bianchi, et al (2008) la vida útil de los pavimentos rígidos es relativamente alta superando los 20 años en comparación con la vida útil de pavimentos flexibles en los cuales tienden a ser inferior a 10 años.

En el trabajo será analizada la pista de pavimento rígido de aguas abajo de la elevación 144,00 m del Área Industrial de la Usina de Itaipu, la cual es de vital importancia para el buen desenvolvimiento de las actividades en la entidad y la integración de ambas márgenes. Esta pista, bajo una concepción estructural consiste en un pavimento de hormigón simple, con armadura distribuida de carácter no estructural para retracción, cuya construcción fue realizando en etapas culminando la primera que abarca del Área de Montaje Derecha (AMD) al Área de Montaje Central

(AMC) en 1985 y la segunda culminando en 1989 completando su extensión desde AMC hasta Trecho I.

Para el análisis, fueron consideradas las irregularidades y manifestaciones patológicas en un pavimento, que nos permiten conocer el estado actual del mismo y la seguridad y comodidad que ofrece al usuario. La condición del pavimento puede ser obtenida por medio de la inspección visual detallada del mismo, por medio de la metodología descrita en la normativa *DNIT 062/2004*. Esta norma contempla la ocurrencia de defectos en las juntas, fisuras, grietas, defectos superficiales y levantamiento de placas, reparaciones, asentamiento, bombeo, entre otros. Para esto, el grado de deterioro de un pavimento es caracterizado por el Índice de Condición de Pavimentos (ICP) determinando el estado de la pista en base al concepto preestablecido para cada rango de valores del ICP.

BALBO (2009) menciona la carta desenvuelta por la USACE (1982) para determinación de la tasa de degradación del pavimento la cual nos permite determinar si el pavimento se encuentra arriba de lo esperado o debajo de lo esperado conforme el par IPC/Edad, habiendo obtenido valores de ICP medio de 73 y teniendo una edad de 34 años en el momento de la inspección visual, el pavimento se encuentra dentro de lo esperado.

Otro factor indicativo del deterioro de un pavimento es el Índice de Irregularidad Internacional (IRI) que puede ser obtenido a través de la medición de desvíos de una superficie en relación con un plano de referencia por perfilómetros acoplados en un vehículo a velocidad constante y representa el confort o comodidad al transitar por la ruta. Santos (2011) menciona que la irregularidad superficial junto con otros factores como características geométricas de la vía, tipo de capa de revestimiento, entre otros influyen en el costo de operación de los vehículos. Además, menciona que el tiempo de trayecto se puede ver afectado por el estado del pavimento.

Por su parte, el DNIT (2011) menciona que para pavimentos antiguos es común valores de IRI entre 2,5 y 6,0 mientras que pavimentos deteriorados poseen valores entre 4,0 y 11,0.

Levantamientos recientes en la usina de Itaipu indican un gran porcentaje de pistas que causan molestias al usuario, el levantamiento no destructivo de las condiciones actuales del pavimento existente del área industrial las condiciones de confort al transitar en base al arroja un 37% de pistas en estado mal a pésimo, lo que se traduce en desconfort al transitar por el pavimento y puede derivar en mayores

gastos operacionales de los vehículos. Los valores medidos de IRI en la pista se encajan dentro de la clasificación de pavimento antiguo y/o con bajo nivel de deterioro.

Otro factor importante para tener en cuenta son el histórico de la pista y levantamientos anteriores, de gran importancia para poder evaluar la condición de esta. Brevemente, dos años después de la culminación del tramo correspondido entre las unidades 1 y 15 conforme ITAIPU BINACIONAL (1988) se presentaron importantes defectos entre los cuales se destacan fisuras debido a cura inadecuada, fisuras longitudinales, fisuras transversales, desportillamiento de juntas, desplazamientos de placas, entre otros, que fueron subsanados en gran medida mediante reparos puntuales.

No obstante, la condición superficial no es única en el momento de calificar el estado del deterioro de un pavimento. Un análisis más completo conlleva la evaluación estructural del pavimento sea por ensayos destructivos o no destructivos. La implementación de ensayos no destructivos como el Falling Weight Deflectometer (FWD) permite conocer la condición de soporte estructural de la subrasante y la rigidez ante las cargas impuestas del hormigón del pavimento por medio de un retroanálisis de los valores de deflexión medidos tras la aplicación de una carga que simula condición de tráfico. En la pista evaluada se denota heterogeneidad en los factores previamente mencionados con valores variando en un rango amplio algunas veces por debajo de su rango usual.

Otro ensayo no destructivo, pero que permite conocer la estructura del pavimento, es el Ground Penetrating Radar (GPR), útil en la verificación de las capas presentes y sus espesores, nivel freático, y otros elementos que puedan estar presentes, pudiendo ser estos en los pavimentos rígidos barras de anclaje o barras de transferencia de carga. La determinación de las capas u objetos se obtiene mediante el análisis de la reflexión de la señal emitida.

Un factor de gran influencia en el estado del pavimento es el correcto sellado de las juntas, resumidamente, la destrucción de los materiales sellantes abre camino a infiltraciones que pueden propiciar daños en la fundación, el mantenimiento del sellado es vital para la durabilidad de la estructura considerando que la vida útil de los sellantes es menor en relación con la prevista para el pavimento (DNIT, 2010). En este caso particular el pavimento tiene como subbase la estructura de hormigón armado de la losa de cobertura de la casa de fuerza, seguida por una capa de regularización y luego una capa de impermeabilizante, y antes de la placa se

encuentra una capa de amortiguamiento, el fin de la vida útil de la impermeabilización ejecutada propició infiltraciones puntuales las cuales fueron detectadas en la losa de cobertura.

Según sea la condición del pavimento y de otros factores de importancia particulares a cada pista se determinará las acciones que deban ser ejecutadas. Según DELATTE (2014) cuando la condición del pavimento es buena, usualmente es suficiente un mantenimiento, sin embargo, si la condición es mala puede ser necesario la aplicación de estrategias de rehabilitación, pudiendo ser necesaria reconstrucción si el pavimento se encuentra en malísimas condiciones.

Particularmente, la presencia de infiltraciones cobra importancia considerable en esta pista, justificando la restauración de la capa impermeabilizante lo que conlleva la necesidad de un nuevo pavimento atendiendo el nivel de intervención necesario para poder recuperar la capa impermeabilizante, por lo que será abordado la elaboración de un nuevo proyecto considerando el volumen de tráfico actual en base a normativas internacionales y atendiendo recomendaciones de normativas nacionales de Brasil y Paraguay.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Desenvolver un nuevo proyecto o un proyecto de restauración de la pista de aguas abajo de la elevación 144 m. del Área Industrial de la Usina de Itaipu

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fin de alcanzar los objetivos generales de este trabajo, los siguientes objetivos específicos deberán ser cumplidos:

- a) Recopilar información disponible en la bibliografía correspondiente a pavimentos rígidos abarcando clasificación, proyecto, manifestaciones patológicas, levantamientos e inspección y restauración.
- b) Elaborar un manual unificado para inspección visual de pavimentos rígidos teniendo como base la normativa DNIT.
- c) Recopilar levantamientos existentes e histórico (proyecto y reparaciones ejecutadas anteriormente) de la pista de pavimento rígido.
- d) Evaluar el estado de las pistas por medio del análisis de datos obtenidos a través del uso de tecnologías de punta como escáner a láser y equipamiento Falling Weight Deflectometer (FWD).
- e) Comparar levantamientos automatizados y levantamiento manuales en base a diferencias en cantidad de defectos y grado de severidad de estos, e índice de condición de pavimentos obtenidos en cada uno.
- f) Analizar los proyectos de las pistas existentes y efectuar una comparación entre ambas teniendo en cuenta el estado, las manifestaciones patológicas, detalles de proyecto e informe de reparos.
- g) Elaborar un documento que contenga un resumen del análisis de la condición de la pista.
- h) Proponer un proyecto de restauración o recuperación de las pistas de pavimento rígido basado en los ítems arriba mencionados.

### 3 MARCO TEÓRICO

En este capítulo será presentada una breve revisión bibliográfica referente a pavimentos, con un enfoque en pavimentos de hormigón, criterios de proyecto y diseño de este tipo de pavimentos, manifestaciones patológicas o irregularidades que puedan ocurrir en los mismos, bien como los métodos que pueden ser empleados para su identificación y las posibles soluciones.

#### 3.1 PAVIMENTOS

Bernucci, et al (2010) define a los pavimentos como estructuras compuestas de varias capas con espesor finito, construida sobre una superficie de terraplén cuya función es resistir a los esfuerzos generados por el tráfico proporcionando comodidad, economía y seguridad.

Para Mathew & Rao (2007) la estructura del pavimento debe proporcionar una superficie con buena calidad de conducción, resistencia al deslizamiento adecuada, buena reflexión de luz y baja polución sonora.

Mathew & Rao (2007) establecen los siguientes requisitos para que un pavimento sea considerado ideal:

- Estructuralmente capaz de resistir todo tipo de esfuerzos aplicados y con espesor suficiente para distribuir las cargas a valores aceptables en el suelo.
- Superficie con fricción adecuada para evitar que los vehículos derrapen, que pueda mantenerse libre de polvo para mantener buena visibilidad.
- Superficie capaz de proveer comodidad a sus usuarios inclusive a altas velocidades y emitir la menor cantidad de ruido posible.
- Superficie impermeable para una mejor protección del suelo.
- Gran vida útil con costos mínimos de mantenimiento.

Desde el punto de vista estructural, los pavimentos pueden ser clasificados en rígidos y flexibles, en donde los pavimentos rígidos poseen el comportamiento de una placa rígida que transfiere las cargas al suelo por esfuerzos de flexión y en los flexibles la distribución de esfuerzos se realiza por medio del contacto entre agregados (MATHEW & RAO, 2007). Usualmente se utiliza la nomenclatura de pavimentos de hormigón o pavimentos asfálticos indicando así el tipo de cubrimiento que poseen los pavimentos (BERNUCCI et al, 2010).

Según DNIT (2006) los pavimentos pueden ser flexibles, semirrígidos y rígidos:

- Flexibles: compuesto por varias capas que sufren deformaciones elásticas significativas y en las cuales se distribuyen las cargas aplicadas en valores equivalentes.
- Semirrígidos: la base de este tipo de pavimentos posee propiedades del cemento y está revestida por una capa asfáltica.
- Rígidos: Usualmente losas de hormigón, estos pavimentos absorben las cargas aplicadas debido a la elevada rigidez que poseen en comparación por las capas inferiores.

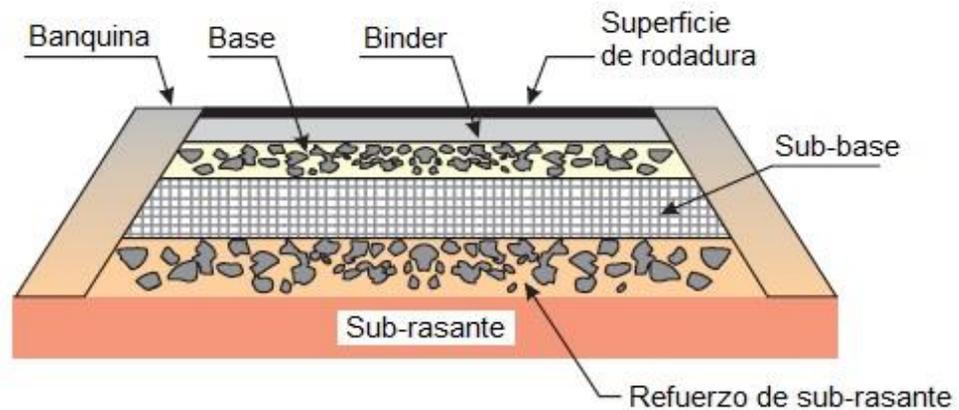
### 3.1.1 Pavimentos Flexibles

Usualmente su estructura se divide en cuatro capas: revestimiento, base, subbase y refuerzo de la subrasante, dependiendo del tráfico y materiales disponibles algunas capas pueden ausentarse (BERNUCCI et al, 2010).

El revestimiento corresponde a la capa de rodadura y debe por lo tanto resistir directamente a los esfuerzos provenientes del tránsito de vehículos, transmitir a capas inferiores e impermeabilizar el pavimento (BERNUCCI, 2010). La capa de Binder o de ligación distribuye los esfuerzos a la base y usualmente consiste en una capa con mayor cantidad de agregado y menor cantidad de ligante por lo que su uso puede resultar en un proyecto más económico caso se sustituya parte de la superficie de rodadura por esta capa (MATHEW & RAO, 2007).

La base tiene como función distribuir los esfuerzos a la subbase la cual a su vez debe proveer soporte estructural, evitar la intrusión de finos de la subrasante a la base y transmitir esfuerzos a la subrasante, que consiste en la fundación de la estructura y debe ser compactado o tratado para resistir a los esfuerzos transmitidos por las capas superiores (MATHEW & RAO, 2007).

**Figura 1** - Corte transversal de un pavimento asfáltico



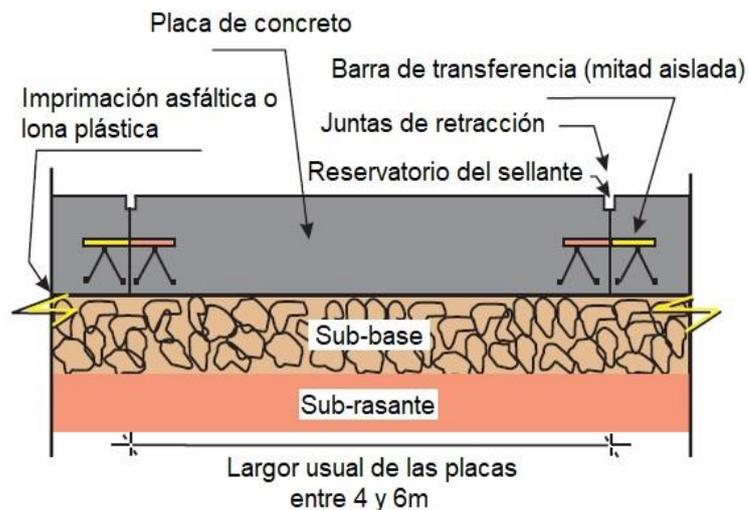
**Fuente:** Adaptado de Bernucci et al (2010).

### 3.1.2 Pavimentos Rígidos

En los pavimentos de hormigón la superficie de rodadura está elaborada por hormigón (agregados y cemento) y pueden ser moldados in loco o prefabricados (BALBO, 2009).

Estas placas de hormigón pueden ser armadas o no con barras de acero, la subcapa de estos pavimentos posee comportamiento equivalente a la subbase en los pavimentos asfálticos (BERNUCCI et al, 2010).

**Figura 2** - Corte longitudinal de un pavimento de hormigón



**Fuente:** Adaptado de Bernucci et al. (2010).

El comportamiento de los pavimentos rígidos es similar al de una placa elástica en un medio viscoso, por lo que el análisis se realiza mediante teoría de placas (MATHEW & RAO, 2010).

### *3.1.2.1 Historia y contexto de los Pavimentos de Hormigón*

Según Balbo (2009) a pesar de que algunos libros sitúen el origen de la pavimentación en hormigón en la ciudad de Grenoble, próxima a los Alpes Franceses, en 1876, a falta de informaciones que lo confirmen es posible afirmar que dicha tecnología tuvo sus comienzos en Estados Unidos de América, en el año 1891 y corresponde a Main Street, en Bellafontaine, Ohio. Senso (1997) apud Silva & Carneiro (2014) sitúa a los ingleses como precursores de los pavimentos rígidos iniciando su construcción en 1865.

Silva & Carneiro (2014) indican que la construcción de pavimentos de hormigón en América Latina tuvo un fuerte desarrollo inicial entre las décadas de 1920 a 1950 seguido de una estagnación en las décadas de 1960-1990 debido al crecimiento de la industria del petróleo y consecuentemente la pavimentación asfáltica.

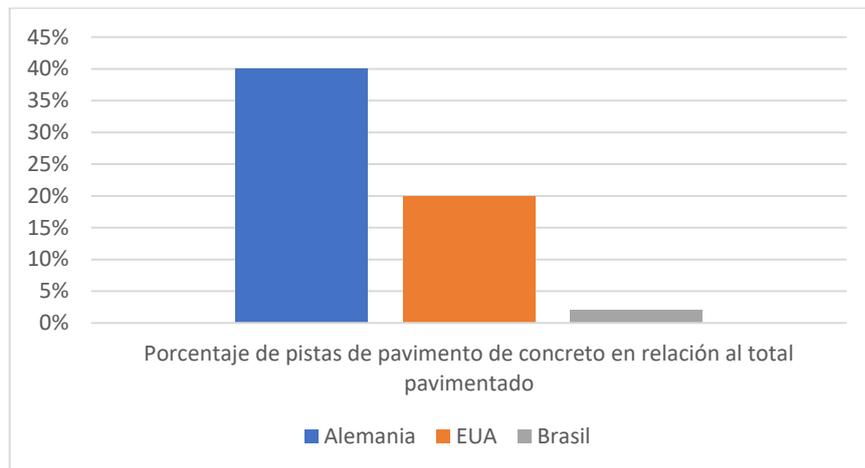
Según Balbo (2009) es probable que el Caminho do Mar, entre Riacho Grande y Cubatão, localizado en Brasil y concluido en 1926 sea el primer camino pavimentado en hormigón de América Latina. La primera carretera de Brasil, la Via Anchieta, tuvo inicio en 1939, esta seguía el padrón alemán con placas de 20 cm de espesor y estaban apoyadas sobre arena compactada. Como resultado de la escasez de acero en lugar de las barras de transferencia fueron implementadas vigotas de Hormigón posicionadas bajo las juntas transversales. Las intensas lluvias y declividad del terreno provocaron inestabilidad en la base dejando a las placas descalzadas y al no tener apoyo central fallaron por flexión.

Al término de la segunda guerra mundial, al ser destinado la producción nacional del cemento en Brasil a la industria de la construcción civil, el sector de pavimentación se vió obligado a recurrir a emprendimientos que no dependiesen enteramente de este producto, esto, sumado al desarrollo de nuevas tecnologías en pavimentación asfálticas en EUA y al bajo precio de los derivados del petróleo gracias a las varias refinerías instaladas al largo del país, favoreció la pavimentación asfáltica (SILVA & CARNEIRO, 2014).

Balbo (2009) apud Salles & Balbo (2015) indican un incremento gradual por el interés en construcción de pavimentos haciendo uso de tecnologías en hormigón en un país donde anteriormente la construcción de pavimentos estaba enteramente basada en pavimentos asfálticos. Según Salles & Balbo (2015) pistas de pavimento de hormigón son más comunes en países altamente industrializados, como naciones de Europa y de América del Norte, gracias a la mayor durabilidad que ofrecen estas estructuras. Además, mencionan a Chile e Indonesia como países en desarrollo con una vasta malla vial en hormigón.

La figura 4 representa el porcentaje de pistas en hormigón en comparación al total pavimentado conforme lo expresado por Salles & Balbo (2015).

**Figura 3** - Porcentaje de pistas de pavimento de hormigón en relación con el total pavimentado



**Fuente:** El autor (2020).

### 3.1.2.2 Comparativa entre pavimentos rígidos y flexibles

A través de datos de agencias (DELATTE, 2014) menciona que la vida útil de pavimentos de hormigón oscila entre 25 y 40 años o usualmente 1½ a 2 veces más que la de los pavimentos asfálticos diseñados y construidos bajo los mismos estándares. El hormigón es mayormente usado en pavimentos que soportan tráfico pesado, el cual usualmente, es cuatro veces mayor que el tráfico en pavimentos asfálticos, y, además, el costo inicial de construcción de los pavimentos de hormigón es mayor, sin embargo, el mantenimiento es inferior.

### 3.1.2.3 Tipos de Pavimento de Hormigón

Diversos son los tipos de pavimento de hormigón dependiendo de sus características estructurales o procesos constructivos empleados.

La tabla 1 muestra los tipos más comunes de pavimentos de hormigón, no se incluyen en ella los pavimentos de bloques de hormigón inter trabados por poseer estos un comportamiento estructural diferente.

**Tabla 1 – Tipos de pavimentos de hormigón en placas**

<b>Denominación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Principales características estructurales y constructivas</b>
Pavimento de hormigón simple	PHS	Al no tener armaduras que resistan los esfuerzos de tracción generados en la estructura el hormigón empleado debe ser capaz de resistir dichos esfuerzos requiriendo mayor resistencia en comparación con hormigón usualmente utilizados en edificios. Las juntas de contracción son usualmente poco espaciadas.
Pavimento de hormigón armado	PHA	Hormigón armado convencional, las armaduras resisten a los esfuerzos de tracción y el hormigón a los esfuerzos de compresión. Mayor espacio entre juntas.
Pavimento de hormigón con armadura continua	PHAC	Tolera fisuras de retracción transversales aleatorias, la armadura continua es colocada un poco arriba de la línea neutra y tiene como función mantener las partes fisuradas fuertemente unidas. No es necesario juntas de contracción, solo juntas constructivas.
<b>Denominación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Principales características estructurales y constructivas</b>
Pavimento de hormigón pretensado	PHPRO	Grandes dimensiones de placas y trabajo en régimen elástico, requiere hormigón de alta resistencia por los pre-esfuerzos inducidos.
Pavimento de hormigón prefabricado	PHPF	Fabricadas sobre medida con elevado control y precisión, permite una rápida sustitución de placas deterioradas.
Whitetopping	WT	Nueva capa de revestimiento de un antiguo pavimento asfáltico puede ser PHS, PHA, PHAC, PHPRO, o PHPF.
Withetopping Ultrafino	WTUD	Fina capa de hormigón de alta resistencia en placas de pequeñas dimensiones lanzadas sobre la superficie asfáltica fresada trabaja por flexión y deflexión Juntas con poco espacio entre sí.

**Fuente:** Elaborado a partir de (BALBO, 2009).

#### 3.1.2.3.1 Pavimento de Hormigón Simple

En estos pavimentos no armados pueden ser empleados hormigón convencional, hormigón de alta resistencia, hormigón compactado con rodillo. Las

juntas deben ser serradas para control de la retracción debido a las condiciones ambientales (sol, lluvia, vientos). El acero es únicamente utilizado para barras de transferencia de carga, las cuales se posicionan en las juntas transversales y permiten que parte de la carga sea absorbida por la placa subsecuente. Son también empleadas barras de conexión que puedan evitar el deslizamiento horizontal entre placas lateralmente dispuestas, además pueden ser empleadas armadura en forma de mallas soldadas situadas arriba de la línea neutra como armadura de retracción (BALBO, 2009).

Al no tener armadura con función estructural el hormigón es responsable de soportar los esfuerzos de tracción sin romperse, de forma que es necesario considerar que trabaja en régimen elástico en el análisis de tensiones cuando calculado el espesor (BALBO, 2009).

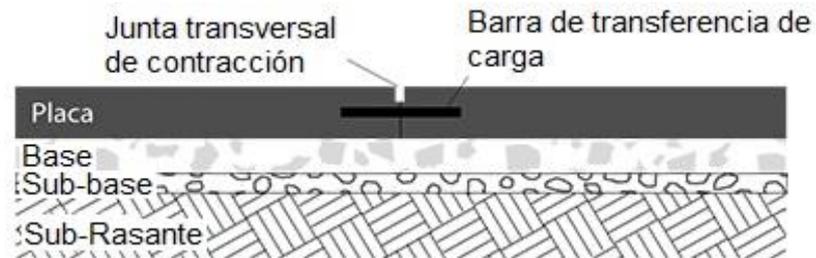
La necesidad de existencia de juntas de retracción surge a raíz de las grandes tensiones generadas durante la hidratación del cemento y tiene como fin evitar la aparición de fisuras aleatorias que puedan comprometer la resistencia a los esfuerzos, con el corte del hormigón lo que se logra es que la concentración de tensiones ocurra en ese punto generando la fisura (SALLES & BALBO, 2015).

Balbo (2009) menciona que el factor limitante más crítico de proyecto para este tipo de pavimentos es la resistencia del hormigón.

Una mayor resistencia a la tensión y consecuentemente a compresión del hormigón implica en un mayor consumo de cemento el cual acentúa los problemas de retracción, motivo por el cual es conveniente una relación baja agua/cemento tornándolo un hormigón de consistencia seco, se debe buscar una buena trabajabilidad para garantizar homogeneidad, densidad e impermeabilidad adecuada (OLIVEIRA, 2000).

En la figura a seguir es posible observar una sección longitudinal de un pavimento de hormigón simple típico, donde el sistema de apoyo está compuesto por la base, subbase y la subrasante.

**Figura 4** - Corte longitudinal de un pavimento de hormigón simple



**Fuente:** Adaptado de BALBO (2009).

### 3.1.2.3.2 Pavimento de hormigón compactado con rodillo (CCR)

Los pavimentos hechos a partir de hormigón compactado con rodillo pueden ser considerados un pavimento de hormigón simple sin acero que sirva para transferencia de carga, el acabado de este tipo de pavimentos usualmente genera irregularidades e incomodidad a los usuarios además que por la imposibilidad de texturización la adherencia puede ser perjudicada (BALBO, 2009).

Este pavimento posee resistencia a la flexión aproximadamente 2 veces menor que la de hormigón simple, son más económicos al consumir menos cemento y con menor retracción por requerir menos agua (OLIVEIRA, 2000).

### 3.1.2.3.3 Pavimento de Hormigón Reforzado

Según Oliveira (2000) es posible distinguir tres tipos de pavimento de hormigón reforzados: los pavimentos que poseen armadura distribuida discontinua, pavimentos con armadura distribuida continua y pavimentos de hormigón armados o reforzados estructuralmente.

Los pavimentos de hormigón armado con armadura distribuida discontinua consisten en placas de hormigón en la que mallas posicionadas arriba de la línea neutra de la sección con por lo menos 5 cm de recubrimiento tienen función de inhibir las fisuras causadas por la retracción y consecuente variación de volumen de la placa debido a las variaciones de temperatura, utilizar estas mallas permite placas de mayores dimensiones llegando hasta 30 metros de largo por 6 de ancho (OLIVEIRA, 2000). Por otro lado, BALBO (2009) sitúa a este tipo de pavimentos como pavimentos de hormigón simple como ya mencionado anteriormente.

Cuando la armadura es continua se hace innecesaria la ejecución de juntas de retracción, por lo que solo son implementadas juntas constructivas. En este tipo de pavimentos, la armadura localizada a un tercio del espesor de la placa en relación con la cara superior tiene la función de unir las fases de las fisuras de retracción regularmente espaciadas que aparecen (OLIVEIRA, 2000). Este tipo de pavimentos es usualmente empleado en la construcción de aeropuertos (SILVA & CARNEIRO, 2014).

Cuando la armadura cumple función estructural se logra una disminución del espesor de la placa y también de la resistencia a compresión del hormigón necesaria, debido a los mayores momentos flectores la estructura entra en régimen de fisuración y los esfuerzos pasan a ser absorbidos por las armaduras. Como la armadura controla las fisuras de retracción especialmente en edades tempranas, es posible proyectar de modo a obtener placas mayores sin riesgo de fisuras de retracción. En este tipo de pavimentos los esfuerzos de tensión son resistidos por completo por la armadura (BALBO, 2009).

Adicionalmente, es posible reforzar los pavimentos con el uso de fibras de distintos materiales, según Oliveira (2000) las características de un hormigón reforzado con fibras son superiores a las del hormigón simple, entre las ventajas se destacan mayor ductilidad, resistencia a la fisuración, al impacto y desgaste.

Para Carnio (1998) apud Oliveira (2000), es posible debido a la redistribución de esfuerzos el uso de fibras como sustitución de armaduras a flexión en estructuras con una de las caras en contacto con medios elásticos (pisos, pavimentos, túneles). Con un análisis elástico se logra el control de la fisuración, sin embargo, si aprovecha la ductilidad que presentan estas estructuras es posible reducir el espesor de la placa.

#### 3.1.2.3.4 Pavimento de Hormigón Pretendido

Según Balbo (2009) uso de pretensión permite disminuir el espesor de las placas como también ejecutar grandes placas sin juntas de contracción en relación con los pavimentos de hormigón simples y al contrario de los pavimentos con armadura pasiva que no requieren elevada resistencia del hormigón. Estos pavimentos requieren elevadas resistencias para soportar los esfuerzos de compresión que es sometido el pavimento previo a la aplicación de las cargas. Según

Oliveira (2000) las juntas de estos pavimentos pueden ser espaciadas de hasta 150 metros, pero poseen una ejecución más sofisticada.

Este tipo de pavimentos tiene como principal aplicación a aeropuertos y pisos industriales pesados (SILVA & CARNEIRO, 2014).

#### 3.1.2.3.5 Pavimento de Hormigón Pre-fabricado

Placas pré-fabricadas pueden ser tanto remplazos temporarios como permanentes. Entre sus ventajas se encuentran, mayor calidad del hormigón, mejor proceso de cura gracias a un mayor control y una normalización del tráfico menos demorada (DELATTE, 2014).

Estas placas al ser posicionadas deben estar perfectamente apoyadas sobre la base que debe ser lo más plana y nivelada posible para evitar vacíos y falta de contacto que generen estado crítico bajo la acción de esfuerzos provenientes del tráfico. Las placas de hormigón pre fabricadas pueden poseer armadura solo para soportar su propio peso durante el transporte o ser dimensionadas con armadura estructural e inclusive pre tensadas, deben además poseer barras de transferencia de cargas y barras de ligación en las juntas con otras placas y las juntas entre las placas deben ser selladas. Un factor importante que limita sus dimensiones es el transporte y la instalación de estas placas (BALBO, 2009).

#### 3.1.2.3.6 Whitetopping

Los pavimentos de hormigón pueden también ser utilizados superpuestos en pavimentos asfálticos o de hormigón, el más antiguo representante de esta técnica es el whitetopping. Estos pavimentos son diseñados y construidos considerando al pavimento asfáltico existente como una base de alta calidad. (DELATTE, 2014).

Cuando el espesor de esta capa es inferior a 100 mm se denomina whitetopping ultra fino, en el cual gracias a la adherencia del hormigón a la superficie asfáltica se consigue reducir las tensiones en la placa de hormigón. Para garantizar buena adherencia es necesario fresar el pavimento asfáltico y ejecutar una limpieza intensa

que garantice la total remoción de partículas sueltas para que no interfiera con la hidratación del cemento, además la capa inferior no debe presentar fisuración, puesto que mezclas asfálticas fisuradas trabajan en compresión y no en flexión que es el comportamiento que se busca (BALBO, 2009).

Balbo (2009) menciona que el hormigón ejecutado debe ser de alta resistencia para resistir los momentos flectores impuestos. Para evitar fisuras de retracción las juntas son menos espaciadas entre sí, por lo tanto, las dimensiones de las placas varían entre 60 y 180 centímetros con 5 a 10 centímetros de espesor (OLIVEIRA, 2000).

### 3.2 PROYECTO Y DISEÑO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

Griffiths & Tom (2007) mencionan que para un diseño satisfactorio el método empleado debe incluir los siguientes elementos:

- Descripción de las cargas;
- Técnica que describa el soporte de la subrasante y el diseño de fundación requerido;
- Método para determinación de la resistencia del pavimento;
- Calibración, relacionar el método con datos empíricos;
- Especificación para control de los materiales de construcción y técnicas constructivas;

Además, Griffiths & Tom (2007) mencionan que los métodos de diseño no son un modelo preciso del mundo real y poseen diferentes formas de cálculo de los espesores de los pavimentos por lo cual si combinados inadecuadamente la precisión del proyecto se ve reducida.

El proyecto de pavimento de hormigón consiste en la selección de diseño, materiales y practicas constructivas para garantizar un desempeño satisfactorio de la estructura durante el tiempo para el que fue proyectado (DELATTE, 2014).

Según Mathew & Rao (2007) los factores que afectan el diseño de un pavimento pueden ser clasificados en cuatro categorías las cuales son: tráfico y cargas, modelo estructural, caracterización de materiales, y el ambiente.

En lo que respecta a tráfico y cargas, Mathew & Rao (2007) citan como factores clave a ser considerados los siguientes:

- Presión de Contacto: La presión de los neumáticos determinan el área de contacto en la que es aplicada la carga proveniente del vehículo y por ende la presión de contacto entre la rueda y la superficie del pavimento.
- Carga por Rueda: Es esencial tener en cuenta este factor para la determinación del espesor del pavimento pues afecta la distribución de esfuerzos y deflexión en el pavimento.
- Eje del Vehículo: Puede ser encontrada en varias configuraciones (Simple, tándem, etc.) y están fuertemente relacionados con la capacidad de carga del vehículo.
- Cargas móviles: los autores citados mencionaron que la velocidad de un vehículo afecta el daño que este provoca en la estructura reduciéndose con el aumento de la velocidad de este.
- Repetición de cargas: La deformación del pavimento a lo largo del tiempo es consecuente de la aplicación repetida de cargas, usualmente para el análisis se considera repeticiones de ejes simples de 80 kN siendo necesario ajustar los demás tipos de ejes por medio de factores de equivalencia.

Al tratar del modelo estructural, Mathew & Rao (2007) mencionan que el modelo más común es el que considerada a las capas como homogéneas, isotrópicas y linealmente elásticas, en otras palabras, las propiedades de los materiales se mantienen constante a lo largo de cada una de las capas. De la misma manera, las propiedades de los materiales varían de acuerdo con el modelo estructural considerado y de esa forma diferentes factores son empleados en el cálculo, a modo de ejemplo en un modelo lineal elástico es considerado el módulo elástico mientras que si es considerado no lineal elástico entonces es necesario considerar el módulo resiliente.

Los factores ambientales que afectan el desempeño de los materiales que componen el pavimento son la temperatura, la cual afecta a los pavimentos rígidos causando esfuerzos que pueden derivar en fisuras, y la precipitación, que se relaciona con la cantidad de agua que puede infiltrarse en la fundación causando diversos problemas (MATHEW & RAO, 2007).

### 3.2.1 Estudio de Tráfico

Como mencionado anteriormente el tráfico es uno de los factores más importantes en el proyecto de un pavimento pues es a partir de el que se definen las cargas actuantes.

#### 3.2.1.1 Vehículos

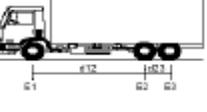
Para analizar el volumen de tráfico en una pista es necesario conocer los vehículos que por ella transitaran, dado la variedad de marcas y modelos existentes en el mercado es necesario estandarizar de cierta manera.

Para ello el DNIT (2006) clasifica los vehículos pesados de acuerdo con algunos factores los cuales son:

- Número de Ejes
- Peso Bruto Máximo
- Caracterización: Incluye tipo del eje (Simple, Tandem, etc) y peso por eje.
- Clase de Vehículo

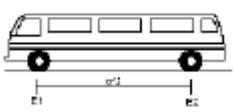
La siguiente figura ilustra algunos de los vehículos adoptados en la clasificación del DNIT tanto para Camiones como para Buses:

**Figura 5** – Algunos vehículos pertenecientes a la clasificación (Camiones)

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16(16,8)	<b>CAMINHÃO</b> E1 = eixo simples (ES), rodagem simples (RS), carga máxima (CM) = 8t ou capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ES, rodagem dupla (RD), CM = 10t d12 ≤ 3,50m	2C
	3	23(24,2)	<b>CAMINHÃO TRUCADO</b> E1 = ES, RS, CM = 8t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t d12 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3C

Fuente: Adaptado de DNIT (2006).

**Figura 6** – Algunos vehículos pertenecientes a la clasificación (Buses)

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	2	16(16,8)	ONIBUS E1 = ES, RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t d12 ≤ 3,50m	2CB
	3	19,5(20,5)	ONIBUS TRUCADO E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t d12 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40m	3CB

Fuente: Adaptado de DNIT (2006).

### 3.2.1.2 Volumen de tráfico

El volumen de tráfico puede ser definido como la cantidad o el número de vehículos que transitan por una sección de la vía o un carril en una unidad de tiempo la cual puede ser vehículos por día (vpd) o vehículos por hora (vph) (DNIT, 2006).

El Volumen Medio Diario (VMD) consiste en la media de los volúmenes vehículos que circulan un tramo de la vía en 24 horas calculado para un periodo representativo de tiempo que suele ser 1 año, este valor es el que mejor representa la utilización de la vía y además indica la necesidad de mejoras o ampliaciones, estimativa de lucros en peajes, entre otras cosas (DNIT, 2006).

El Valor Medio Diario Anual (VMDa) o Transito Medio Diario Anual (TMDA) que consiste en el total de vehículos transitando en un año dividido por 365 días es el de mayor importancia. Otros valores como el Volumen Medio Diario mensual (VMDm), Volumen Medio Diario Semanal (VMDs) y Volumen Diario en un Día de la Semana (VMDd) son utilizadas normalmente como muestras para determinación del VMD.

El volumen de tráfico varía dependiendo de la hora del día, día de la semana, mes, año, e inclusive puede variar entre carriles de la misma pista. Esta variación presenta máximos denominados picos que son fundamentales para el entendimiento del comportamiento del tránsito en un lugar. El horario de pico representa el mayor flujo de vehículos en una pista en el día el cual se mantiene constante variando únicamente el volumen de vehículos (DNIT, 2006).

El volumen de tráfico puede variar también entre sentidos de una misma pista dependiendo del lugar y normalmente se encuentra relacionado con los picos de mañana y tarde invirtiéndose el sentido principal con mayor volumen (DNIT, 2006).

En pistas con más de un carril para cada sentido también puede presentarse una distribución desigual entre los carriles del mismo sentido, esta variación se debe a diversos factores entre ellos el tránsito o restricción de tránsito de vehículos pesados en los carriles (DNIT, 2006).

Finalmente, la variación puede darse durante épocas del año como por ejemplo en épocas de temporada alta en regiones turísticas o variaciones ocasionadas por eventos especiales en la región (DNIT, 2006).

### *3.2.1.3 Contaje volumétrico*

Por medio del contaje volumétrico se logra determinar aspectos como el sentido, la cantidad y la composición de este flujo de vehículos en uno o varios puntos de un sistema vial en una unidad de tiempo determinada. (DNIT, 2006)

La información adquirida por medio del contaje volumétrico puede emplearse para el dimensionamiento del pavimento, evaluación de vida útil, o en otros aspectos relacionados al diseño vial del lugar (canalización de tráfico, evaluación de causas de embotellamientos, ampliaciones) (DNIT, 2006).

El contaje puede ser manual o automático:

El contaje manual es ideal para clasificar vehículos (es común agrupar en base a características similares de operación, por ejemplo, autos, camiones, buses), analizar el movimiento en intersecciones y contaje en pistas con muchos carriles y es efectuado por investigadores normalmente empleando contadores manuales mecánicos presos a un plancheta que además lleva consigo la ficha de contaje disponible en el “Manual de Estudios de Tráfico” para transcripción de los datos, las fichas I y II presentes en el manual incluyen los vehículos previstos para el tramo estudiado, la ficha I es adecuada para bajos volúmenes de tráfico ya que no requiere de un contador mecánico pudiendo efectuarse el contaje mediante trazos de lápiz para cada vehículo; la ficha II por otro lado está diseñada para la utilización de contadores mecánicos, en ambos casos el contaje se realiza para un intervalo de tiempo previamente seleccionado. Los contadores pueden ser también del tipo electrónico con capacidad de almacenar datos transferibles a computadores (DNIT, 2006)



Por otra parte, los contajes automáticos emplean equipamientos de diversos tipos ya sean portátiles o permanentes para la detección de vehículos como, por ejemplo: tubos neumáticos, dispositivos magnéticos, radar, cámaras, etc. Los contadores automáticos poseen dos componentes básicos los cuales son una unidad captadora que detecta el paso de los vehículos y una unidad encargada de almacenar los datos.

Entre los contadores portátiles se encuentran de dos tipos: los que utilizan tubos neumáticos extendidos transversalmente al pavimento, los más comunes registran apenas el paso de los ejes sin clasificar por tipo de vehículo, entre tanto, los más sofisticados como el Marksman 400 posibilitan determinar el tipo del vehículo, la velocidad, largo y número de ejes; y los que utilizan sensor magnético se encuentra el Hi-Star registra el paso del vehículo, pero no de sus ejes (DNIT, 2006).

Los contadores permanentes poseen un uso extendido en locales en los cuales se desean efectuar contajes continuos y de larga duración para ello se emplean sensores más estables en relación con los captadores portátiles, algunos de los tipos de unidades captadoras son: inductores en loop, dispositivos magnéticos, radar, células fotoeléctricas (DNIT, 2006).

Otro método que también puede ser empleado además de los ya mencionados contajes manual y automático es el de la filmación con cámaras de video. Este procedimiento posee una instalación demorada, no obstante, brinda ciertas ventajas como ser la posibilidad de ejecutar el levantamiento apenas por un observador de todos los movimientos simultáneos, es un levantamiento más confiable pues permite la posibilidad de comprobación de los datos, otro aspecto que resaltar es estar protegido de la intemperie brindando una mayor comodidad al investigador (DNIT, 2006).

Este último ha sido objeto de estudios y mejorías durante los últimos años, buscando obtener los datos de forma autónoma a partir de las filmaciones y su avance será mencionado brevemente a continuación.

Los avances en machine learning o aprendizaje automático traen consigo avances en el conteo de vehículos, esto surge como posible respuesta al rápido desenvolvimiento y crecimiento de las áreas urbanas y llevando en consideración la disponibilidad de cámaras en ciudades inteligentes que pueden ser implementadas en el análisis de congestionamiento de vehículos, como ejemplo de ciudades inteligentes

se menciona la Ciudad de Curitiba del Estado de Paraná, el cual según la Secretaria Municipal de Defensa Social e Tránsito (2021) posee una estructura con 1742 cámaras, 191 locales con 804 franjas de radares, 185 botones de pánico en escuelas como parte de un proyecto que contempla la gestión del tránsito, del transporte colectivo, la defensa civil y la asistencia social con dispositivos inteligentes interconectados.

Zhang et al (2019) mencionan que el rastreo automático de los vehículos es crucial en el análisis de datos de tráfico en tiempo real, los autores a partir de la adquisición de datos en formato de video efectuaron el reconocimiento y rastreo de vehículos mediante la implementación de MaskRCNN, que consiste en una red neuronal profunda que permite separar diferentes objetos en una imagen o video, logrando separar y efectuar el conteo de motocicletas, automóviles y pedestres en periodos de 1 minuto. Como resultados obtuvieron valores de conteo bastante aproximados para las tres clases, en la que el no reconocimiento de vehículos se debió a modelos inusuales y en motocicletas al amontonamiento de ellas.

**Figura 9** – Detección de las clases (arriba) y comparación entre conteo manual y automático por deep learning (abajo)

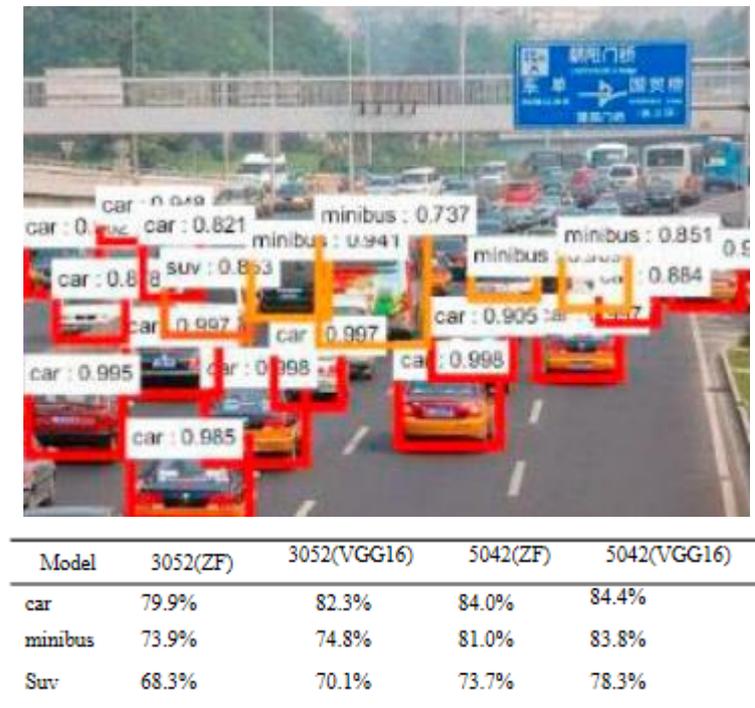


	Motorbike	Vehicle	Pedestrian
Our method	70 – 72 – 89	5 – 8 – 12	6 – 6 – 8
Manual detection	75 – 75 – 92	7 – 8 – 12	6 – 6 – 8

**Fuente:** Zhang et al (2019).

Suhao et al (2018) en un proceso similar obtuvieron resultados variados en la detección de los tipos de vehículos, en este caso siendo automóviles, suv's y minibuses con una precisión en la detección de más de 65 % dependiendo las muestras y el método empleados.

**Figura 10** – Detección de las clases (arriba) y precisión del conteo en diferentes muestreos y métodos (abajo)



**Fuente:** Zhang et al (2019).

Los valores obtenidos a partir del conteo pueden ser representados de forma analítica por medio de tablas en la que constan los datos necesarios para el análisis de los volúmenes o de forma gráfica por medio de histogramas (Volumen medio diario por unidad de tiempo), flujogramas lineares o gráficos que muestren la variación estacional, diaria u horaria del volumen (DNIT, 2006).

#### 3.2.1.4 Proyección de tráfico

La proyección del volumen de tráfico futuro mediante extrapolación de la tendencia presenta limitaciones en la consideración de variables que afectan la evolución del tránsito en un determinado lugar. Existen tres tipos de proyección: Linear, Geométrica o exponencial, curvas del tipo logístico (DNIT, 2006) Se abordarán brevemente las proyecciones linear y geométrica o exponencial:

- **Proyección Linear:** Utilizado en periodos inferiores a 5 años, modela el crecimiento del volumen de tráfico mediante una progresión aritmética, se calcula mediante la fórmula indicada a continuación (DNIT, 2006):

$$V_n = V_0(1 + na)$$

Donde  $V_n$  corresponde al volumen en el año “n”;  $V_0$  al volumen en el año base,  $a$  es la tasa de crecimiento, y  $n$  es el número de años.

- Proyección Geométrica o Exponencial: Uso en periodos corta a media duración, como su nombre lo indica, modela el crecimiento del volumen de tráfico mediante una progresión geométrica, la representación matemática más frecuente está indicada a continuación (DNIT, 2006):

$$V_n = V_0(1 + a)^n$$

Donde  $V_n$  corresponde al volumen en el año “n”;  $V_0$  al volumen en el año base,  $a$  es la tasa de crecimiento en %, y  $n$  es el número de años.

La AASHTO recomienda el uso de la siguiente ecuación para determinación del factor de crecimiento total (Huang, 2004)

$$\text{Factor de crecimiento} = \frac{(1 + a)^n - 1}{a}$$

### 3.2.2 Soporte del Pavimento

#### 3.2.2.1 Subrasante

Es importante el estudio de la subrasante en los proyectos de pavimentos rígidos para identificar variaciones bruscas en las características del suelo, la presencia de suelos expansivos o de capas espesas de arcilla blanda (DNIT, 2006)

Uno de los factores a llevar en consideración en el dimensionamiento del espesor de la placa de un pavimento rígido es el soporte de la subrasante, este es cuantificado mediante el módulo de reacción de la subrasante ( $k$ ) también denominado Coeficiente de Asentamiento o Módulo de Westergaard el cual varía dependiendo del tipo de suelo y es determinado en un prueba de carga estática siguiendo el método de la normativa DNIT 055/2004-ME que correlaciona las presiones transmitidas al suelo por medio de una placa rígida de al menos 76 centímetros de diámetro y los desplazamientos verticales correspondientes (DNIT, 2005).

Los valores correspondientes a los tipos de suelo encontrado en la subrasante y el valor  $k$  correspondiente se encuentran indicados a continuación:

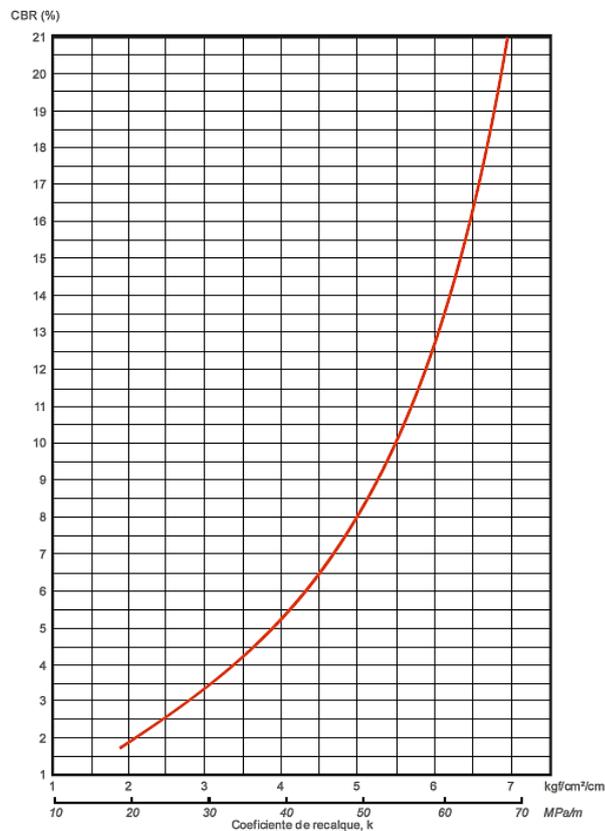
**Figura 11** – Relación entre el tipo de suelo encontrado en la subrasante y el valor k correspondiente

Tipo de suelo (AASHTO M 145)	Coeficiente de asentamiento	
	MPa/m	kgf/cm <sup>2</sup> /cm
A1-a	>110	>11.0
A1-b	70-165	7.0-16.5
A2-4, A2-5	>80	>8.0
A2-6, A2-7	50-90	5.0-9.0
A3	55-90	5.0-9.0
A4	25-80	2.5-8.0
A5	<50	<5.0
A6	<60	<6.0
A7-5, A7-6	<60	<6.0

Fuente: DNIT (2005).

El Módulo de reacción de la subrasante o coeficiente de recalque (k) se puede relacionar con el índice de Soporte California (CBR) como indicado en la imagen a continuación:

**Figura 12** – Correlación entre el CBR y el Coeficiente de recalque



Fuente: DNIT (2005).

### 3.2.2.2 Subbase

Según AASHTO (1993) apud Delatte (2014) la subbase se ubica entre la subrasante y la placa de hormigón del pavimento y está compuesta por una o más capas compactadas de material granular o estabilizado. Algunas de las razones para el uso de subbase proporcionan soporte estable, uniforme y permanente, aumenta el módulo de reacción de la subrasante ( $k$ ), previene el bombeo, minimiza el daño producido por heladas, sirve como plataforma de trabajo para los equipamientos de construcción.

Huang (2004) menciona que el uso de subbase puede disminuir el stress crítico en la placa, pero que esta es una práctica antieconómica puesto que el mismo efecto se obtiene al incrementar ligeramente el espesor de la placa. Sin embargo, también menciona que los motivos por lo cual es implementado son otros como el control del bombeo en las juntas, grietas y bordes de la placa, control del efecto dañino de las heladas, la posibilidad de ser utilizada como una plataforma de trabajo para equipamientos de construcción pesados, mejora del drenaje (cuando la graduación es abierta) e impermeabilización (cuando la graduación del densa).

No es necesario la implementación de subbases cuando el tráfico es relativamente ligero y la calidad del suelo es igual al de una subbase, cabe resaltar que su uso solo para incrementar el valor  $k$  es antieconómico (DELATTE, 2014).

La DNIT (2005) clasifica a las subbases conforme:

**Figura 13** – Tipos de subbase para pavimentos de hormigón

<b>Subbase para pavimentos de concreto</b>	Subbases Granulares	Granulometria densa	
		Granulometria abierta	
	Subbases Tratadas o Estabilizadas	Con cemento	Suelo cemento
			Suelo mejorado con cemento
			Grava graduada tratada con cemento
			Concreto rolado
	Con otros aditivos	Asfalto	
		Cal	
		Puzolana	

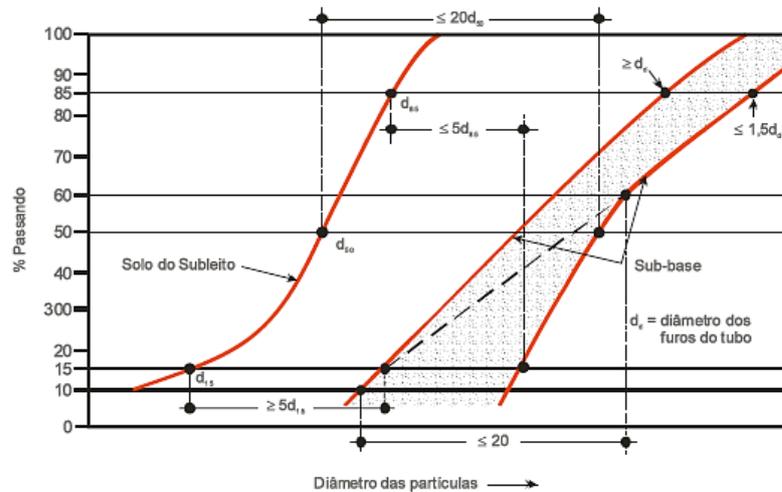
**Fuente:** Adaptado de DNIT (2005).

Las recomendaciones para selección de subbases se encuentran detalladas en el Manual de Pavimentos Rígidos de la DNIT (2005) y se encuentran resumidas a continuación

Para subbases granulares la DNIT (2005) recomienda un espesor de entre 15 a 40 cm pudiendo adoptarse 10 cm dependiendo del tráfico del pavimento, otras recomendaciones se encuentran a continuación:

**Figura 14 – Recomendaciones de la DNIT para subbases granulares**

Apertura de tamiz	Porcentaje que pasa (%)					
	A	B	C	D	E	F
50,0	100	100	-	-	-	-
25,0	-	75-95	100	100	100	100
9,5	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-
4,750	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
2,0	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
0,425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
0,075	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25



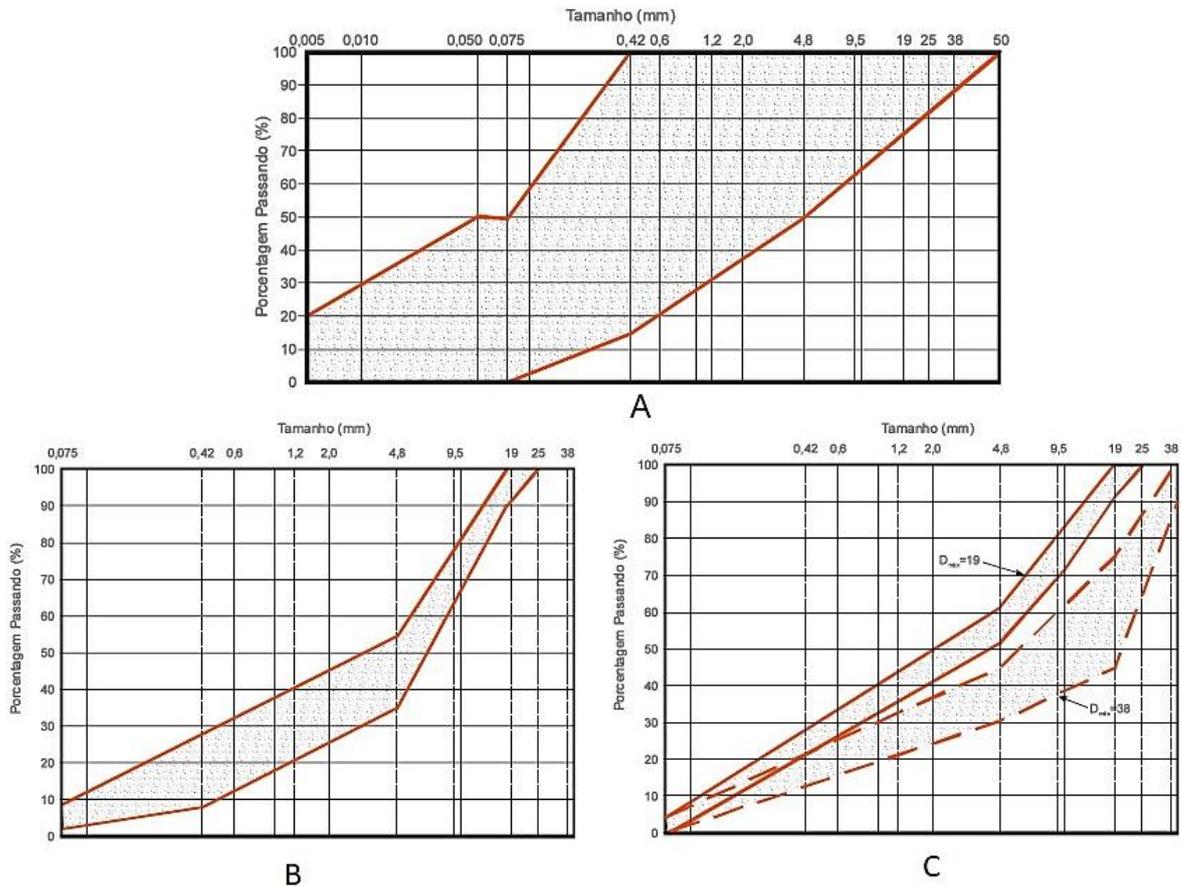
<b>Para asegurar el drenaje</b>	$\frac{\text{diámetro de 15 \% del material}}{\text{diámetro del 15 \% del suelo de la subrasante}} \geq 5$
<b>Para impedir la infiltración</b>	$\frac{\text{diámetro de 15 \% del material}}{\text{diámetro del 85 \% del suelo de la subrasante}} \leq 5$
	$\frac{\text{diámetro de 50 \% del material}}{\text{diámetro del 50 \% del suelo de la subrasante}} \leq 25$
	$\frac{\text{diámetro de 60 \% del material}}{\text{diámetro del 10 \% del suelo de la subrasante}} < 20$
<b>Cuando sirve como material circundante de drenos profundos</b>	$\frac{\text{diámetro de 85 \% del material}}{\text{diámetro del 10 \% del suelo de la subrasante}} \geq 1$

Fuente: Adaptado de DNIT (2005).

Para subbases estabilizadas las recomendaciones son las siguientes:

**Figura 15** – Recomendaciones de la DNIT para subbases tratadas

Tipos de Estabilización	Requisitos mínimos de Granulometría	Requisitos de Dosaje	Espesuras Usuales
Suelo-cemento	A)	1) Resistencia mínima a la compresión simple a los 7 días entre 1,4 y 2,1 Mpa 2) Consumo mínimo de cemento igual a 5% en masa	10 a 20 cm
Grava tratada con cemento	B)	1) Resistencia mínima a la compresión simple a los 7 días entre 3,0 y 5,0 Mpa 2) Consumo mínimo de cemento igual a 3% en masa	10 a 20 cm
Concreto pobre o rolado	C)	1) Resistencia mínima a la compresión simple a los 7 días entre 3,0 y 7,0 Mpa 2) Relación cemento:agregado entre 1:15 y 1:22	7,5 a 15 cm
Suelo mejorado con cemento	DNER-ESP09-71	1) CBR igual o mayor a 30% 2) Consumo mínimo de cemento igual a 3% en masa	10 a 20 cm

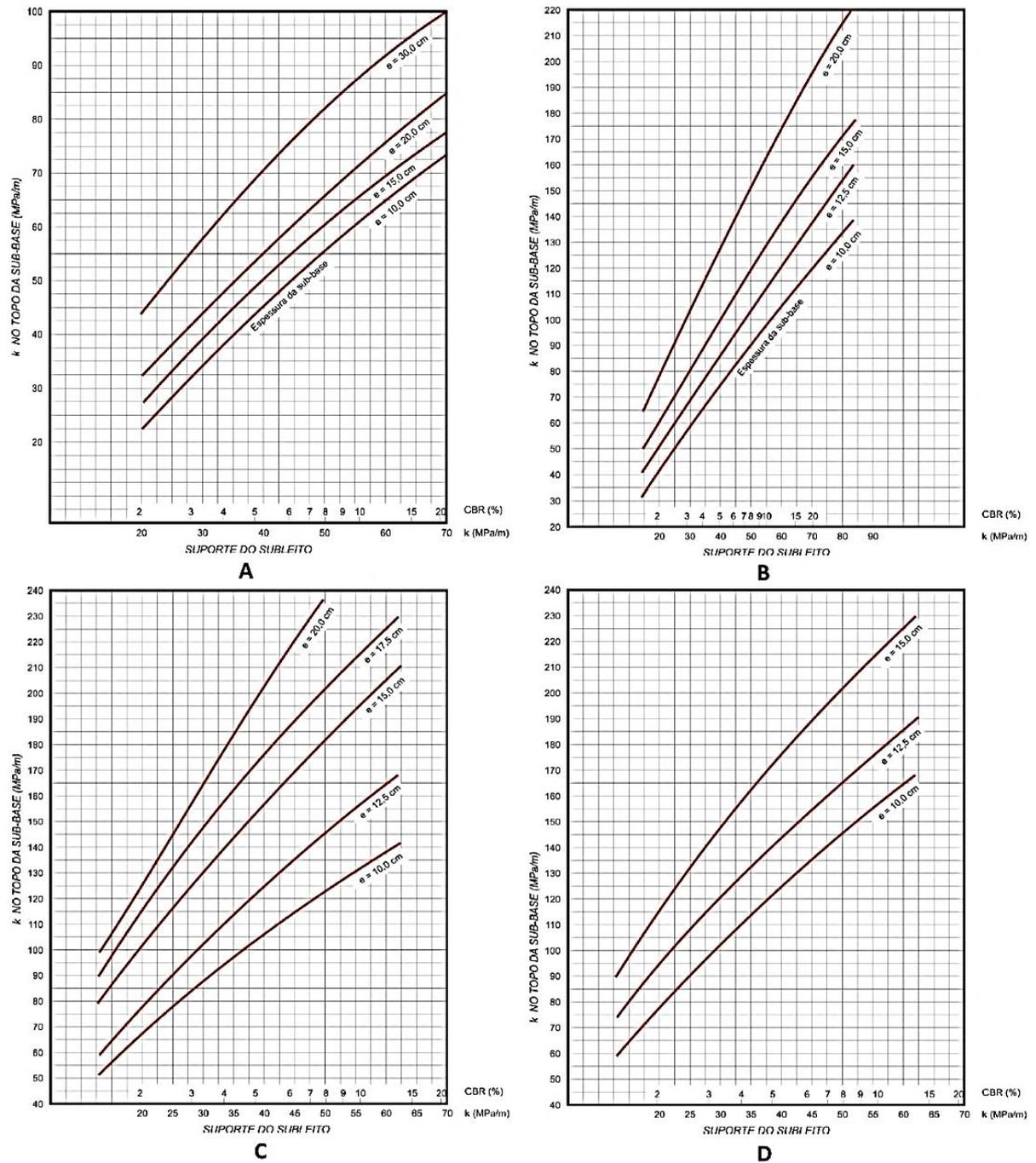


Fuente: Adaptado de DNIT (2005).

3.2.2.3 Incremento del Coeficiente de Asentamiento debido a la presencia de subbase

El incremento del valor de k varía dependiendo del tipo de subbase empleada y el espesor de esta:

**Figura 16** – Aumento de k debido a la presencia de A) subbase granular (Superior izquierda), B) subbase de grava tratada con cemento (superior derecha), C) subbase de suelo cemento (Inferior izquierda) y D) subbase de hormigón compactado con rodillo (Inferior derecha)



Fuente: Adaptado de DNIT (2005).

### 3.2.3 Drenaje de Pavimentos

Está constituido por el drenaje superficial, cuyo objetivo es captar e interceptar el agua de la lluvia y conducir a un lugar seguro para evitar comprometer la estabilidad y la erosión, el drenaje transversal que se encarga de transportar el agua de un lado para el otro de la pista y pueden ser de tubulares de hormigón o metal, y el drenaje profundo que intercepta y rebaja el nivel freático del suelo para evitar el deterioro de las capas soporte del pavimento (DNIT, 2005).

### 3.2.4 Métodos de Dimensionamiento

Los métodos de dimensionamiento de pavimentos pueden ser empíricos, los cuales se basan en la observación del comportamiento de los pavimentos bajo distintas circunstancias de carga de tráfico, o mecanicistas que consideran el cálculo de estrés y tensiones (DELATTE, 2014).

El método desarrollado por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) comúnmente denominado AASHTO 93 en base a la Guía de 1993 es un método empírico y por lo tal sus limitaciones quedan expuestas cuando de nuevas condiciones se habla (nuevos ambientes, nuevos pavimentos, nuevos tipos de vehículos). Mientras que, el método desarrollado por la Portland Cement Association en 1984 (PCA-1984) es un método mecanicista en el cual se trata dos métodos de falla (Erosión y Fatiga) en el que el espesor es determinado para garantizar que no se presenten esos modos de falla previo al fin de la vida útil del pavimento en cuestión (DELATTE, 2014).

Pavimentos de mayor espesor pueden soportar mayores repeticiones de cargas o cargas más pesadas debido a la reducción de las tensiones de flexión y el aumento de la resistencia a la fatiga (DELATTE, 2014).

#### *3.2.4.1 Método de la American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO 93*

Las ecuaciones se basan en regresión de los resultados obtenidos tras la aplicación de un test acelerado en Ottawa, Illinois, en 1950 en el que fue aplicado el

tráfico correspondiente a 20 años de distintos camiones con pesos y configuración de ejes variados en un periodo de 2 años, posteriormente fueron adicionados factores de corrección basados en principios mecanicistas (DELATTE, 2014 apud HUANG, 2004).

### 3.2.4.1.1 Ecuación AASHTO 93

La ecuación que debe ser resuelta es la siguiente, en unidades americanas (AASHTO, 1993):

$$\log_{10}W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$

$$+ (4.22 - 0.32p_t) \log_{10} \left[ \frac{S'_c C_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 J \left[ D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right]$$

Donde  $W_{18}$  es el tráfico en Equivalent Simple Axial Load ESAL,  $Z_R$  es la desviación estándar para la confiabilidad deseada  $R$ ,  $S_0$  es el desvío estándar,  $D$  es el espesor de la placa en pulgadas,  $\Delta PSI$  es la variación del índice de serviciabilidad (serviciabilidad final – serviciabilidad inicial),  $S'_c$  es la resistencia a la flexotracción del hormigón en psi,  $C_d$  es el coeficiente de drenaje,  $J$  es el coeficiente de transferencia de carga,  $E_c$  es el módulo de elasticidad del hormigón en psi y  $k$  es el módulo de reacción de la subrasante en psi/pulgada.

### 3.2.4.1.2 Coeficientes de Entrada

#### Trafico de Diseño (W18)

Consiste en el número de ejes equivalentes de 18 kilopondios (8,2 toneladas) que circularán por la vía durante el periodo de diseño, se obtiene mediante la aplicación de factores de equivalencia de daño que varían con relación al eje (simple, tándem o trídem).

El ESALF (Equivalent Standard Axle Load Factor) consiste en el número de repetición de un eje simple de 18 kilopondios que causaría los mismos daños que el vehículo considerado (DNIT, 2006).

**Figura 17** – Valores de equivalencia de carga ESALF

<b>Valores de ESALF para diferentes ejes</b>	
Simple Rueda Simple	$ESALF = (P/8,6)^4$
Simple Rueda Doble	$ESALF = (P/8,16)^4$
Tandem Doble Rueda Doble	$ESALF = 2(P/7,55)^4$
Tandem Triple Rueda Doble	$ESALF = 3(P/7,63)^4$
P = Peso por ejes en toneladas Peso Total del Conjunto Tandem, dividido por 2 para Tandem Dupla y por 3 Para Tandem Triple	

**Fuente:** Adaptado de DNIT (2006).

La determinación de ejes equivalentes se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{18} = D_D \times D_L \times W_{18}^{\wedge}$$

Donde  $D_D$  es el factor de distribución direccional que toma en cuenta la distribución de las cargas por dirección;  $D_L$  es el factor de distribución por carril que considera la distribución de cargas cuando hay más de un carril en el mismo sentido;  $W_{18}^{\wedge}$  es el tránsito acumulado previsto en ambas direcciones para el periodo de diseño dado por:

$$W_{18}^{\wedge} = TMDA_{horizonte\ de\ diseño} \times \frac{[(1+i)^n - 1]}{i} \times 365$$

Donde TMDA corresponde al Tránsito Medio Diario Anual,  $i$  es la tasa de crecimiento y  $n$  es el número de años o periodo de diseño.

### **Confiabilidad $Z_R$ , $S_0$**

Si fuese posible predecir la vida media de los pavimentos y diseñar en base a eso, el 50 % de los pavimentos fallaría antes de lo previsto (DELATTE, 2014).

La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento cumpla con su función prevista para el periodo de diseño y condiciones proyectadas e impacta en el costo del pavimento.

Para minimizar el riesgo de que el pavimento no se comporte adecuadamente deberá ser seleccionado niveles de confiabilidad más altos (AASHTO, 1993).

**Figura 18** – Valores de confiabilidad recomendados

Tipo de Vía	Confiabilidad R (%)	
	Zona Urbana	Zona Rural
Rutas Interestatales y Autopistas	85-99,9	80-99,9
Arterias Principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993).

**Figura 19** – Valores de desviación estándar normal  $Z_R$ 

Confiabilidad R(%)	Desviación Estándar Normal ZR
50	-0,000
60	-0,253
70	-0,524
75	-0,674
80	-0,841
85	-1,037
90	-1,282
91	-1,340
92	-1,405
93	-1,476
94	-1,555
95	-1,645
96	-1,751
97	-1,881
98	-2,054
99	-2,327
99.9	-3,090
99.99	-3,75

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993).

La desviación estándar es seleccionada en base a conficiones locales.

**Figura 20** – Valores de desviación estándar  $S_0$ 

Variación del comportamiento del tránsito	Desvío Estándar $S_0$	
	Rígido	Flexible
Con variación	0,39	0,49
Sin variación	0,34	0,44

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993).

### Serviciabilidad inicial y final $p_0$ , $p_t$

La habilidad para servir al tipo de tráfico (Automóviles y camiones) que usa la vía es denominada serviciabilidad. Su unidad de medida es el Present Serviciability Index (PSI) que varía entre 0 (camino imposible) y 5 (camino en perfecto estado).

Es posible determinar los niveles mínimos de serviciabilidad en base a la aceptación pública (AASHTO, 1993):

**Figura 21** –Serviciabilidad y Valores de Aceptabilidad

Nivel de Serviciabilidad Final	% de personas que lo considera inaceptable
3,0	12
2,5	55
2,0	85

**Fuente:** Adaptado de AASHTO (1993).

Los valores de serviciabilidad para pavimentos recomendados por el Ministerio de Obras Públicas (MOPC) de Paraguay son:

**Figura 22** –Recomendaciones de Serviciabilidad  $p_0$ ,  $p_t$

Índice de Serviciabilidad Inicial ( $p_0$ )	4,2
Índice de Serviciabilidad Final ( $p_t$ )	2,0

**Fuente:** Adaptado de MOPC (2011).

La variación del índice de serviciabilidad está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta PSI = p_i - p_f$$

### Resistencia a la flexotracción $S'_c$

Es la resistencia a la flexotracción del hormigón promedio, medida a los 28 días. Los valores recomendados para los distintos tipos de vías por el Manual de Carreteras del Paraguay son:

**Figura 23** –Valores de Resistencia a la Flexotracción S'c

Tipo de Via	Resistencia a la Flexotracción (Mpa)
Vías principales y Autopistas	4,8 - 5,4
Vías Colectoras	4,6 - 5,0
Caminos Secundarios	4,2 - 4,8

Fuente: Adaptado de MOPC (2011).

### Coeficiente de Drenaje C<sub>d</sub>

Basado en la calidad de drenaje varia de 0,7 (Drenaje muy pobre) a 1,25 (Drenaje excelente) y funciona de manera a compensar el mal drenaje aumentando el espesor del pavimento, no obstante, cuando el drenaje es muy malo, es recomendable resolver el problema de drenaje antes que tratar de compensar aumentando el espesor (DELATTE, 2014)

**Figura 24** –Coeficiente de Drenaje C<sub>d</sub>

Calidad de Drenaje	Porcentaje de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	<1%	1 a 5%	5 a 25%	>25%
Excelente	1,25 a 1,20	1,20 a 1,15	1,15 a 1,10	1,10
Buena	1,20 a 1,15	1,15 a 1,10	1,10 a 1,00	1,00
Regular	1,15 a 1,10	1,10 a 1,00	1,00 a 0,90	0,90
Pobre	1,10 a 1,00	1,00 a 0,90	0,90 a 0,80	0,80
Muy pobre	1,00 a 0,90	0,90 a 0,80	0,80 a 0,70	0,70

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993).

### Coeficiente de Transferencia de Carga J

Este coeficiente engloba tres ítems: la existencia de barras de transferencia de carga, material de la banquina o berma, tipo de pavimento de hormigón.

Su impacto en el espesor del pavimento es considerable, en pavimentos con alta velocidades de tránsito y gran volumen de tráfico pesado es recomendable implementación de barras de transferencia (DELATTE, 2014).

**Figura 25** –Coeficiente de Transferencia de Carga J

Berma	Asfalto		PCC unido	
Dispositivos de Transferencia de Cargas	Si	No	Si	No
<b>Tipo de Pavimento</b>				
<b>1. Simple con juntas y reforzado con juntas</b>	3,2	3,8 - 4,4	2,5 - 3,1	3,6 - 4,2
<b>2. CRCP</b>	2,9 - 3,2	N/A	2,3 - 2,9	N/A

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993).

### **Módulo de Elasticidad del Hormigón $E_c$**

No tiene fuerte influencia en el espesor de la placa debido a su estrecha variación en el rango de hormigón para pavimentación (DELATTE, 2014)

La ecuación que puede ser empleada para el cálculo es la recomendada por la American Concrete Institute (ACI):

$$E_c = 4,730\sqrt{f'_c} [MPa] = 57000\sqrt{f'_c} [psi]$$

Donde  $f'_c$  es la resistencia a la compresión del hormigón.

### **Módulo de Reacción de la Subrasante k**

El módulo de reacción de la subrasante varía dependiendo de diversos factores y deberá ser ajustado como corresponda: empleo de k ponderado dependiendo de las estaciones del año, aumento del valor k dependiendo del tipo y espesor de la subbase, disminución del valor k para perdida potencial de soporte debido a erosión de la subbase, aumento del k si se da la existencia de roca sana a menos de 3,05m de profundidad en relación con la subbase (DELATTE, 2014).

Las tablas para determinar el incremento de la capacidad portante mediante el empleo de diferentes tipos de subbase ya fueron abordadas en la sección 3.2.2.3 del presente documento.

### 3.2.4.1.3 Software EqAASHTO 93

El dimensionamiento puede ser ejecutado con auxilio de softwares disponibles. El software EqAASHTO93 fue desarrollado por el ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela de la Universidad de Colombia y puede ser encontrado en la web.

Este freeware tiene por objetivo principal la resolución de las ecuaciones presentadas en la Guía AASHTO de Diseño de Pavimentos de 1993 para dimensionamiento de pavimentos rígidos y flexibles (VASQUEZ, 2004).

**Figura 26** – Captura de pantalla de interfaz del software para pavimentos rígidos EqAASHTO93

**Fuente:** El autor (2021).

Su uso es sencillo y requiere la inserción de los parámetros necesarios para el cálculo mencionados en la sección 3.2.4.1.2 de este documento, tras hacer clic en diseñar el programa proporciona los resultados, adicionalmente, es posible imprimir un informe del diseño clicando en el botón Ver informe.

### 3.2.4.2 Método de la Portland Cement Association – PCA 84

Este método se basa en los estudios teóricos del comportamiento de placas de hormigón por Westergaard (1926), Pickett y Ray (1951) y análisis computacionales con métodos de elementos finitos por Tayabji y Colley (1984), ensayos de laboratorio sobre la influencia de juntas, subbases y banquetas en el comportamiento del pavimento, pistas experimentales y observación de pavimentos en uso (DNIT, 2005)

Sirve para la determinación del espesor de placas en pavimentos de hormigón simples con y sin barras de transferencia, pavimentos de hormigón armado continuo o discontinuo (DNIT, 2005).

#### 3.2.4.2.1 Modelos de falla

Este método lleva en consideración dos modelos de falla: por bombeo y erosión y fisuración por fatiga. En el análisis por fatiga se considera que los pavimentos se pueden romper a causa de la fatiga del hormigón, mientras que en el análisis por erosión el bombeo, erosión y escalonamiento de juntas son los responsables de la rotura del pavimento.

##### **Falla por bombeo y erosión**

La pérdida de material en la capa que da soporte al pavimento debido a la acción combinada del agua y paso de cargas se denomina erosión. Este fenómeno genera importantes deformaciones verticales en las esquinas y bordes de la placa causando escalonamiento de juntas (DNIT, 2005).

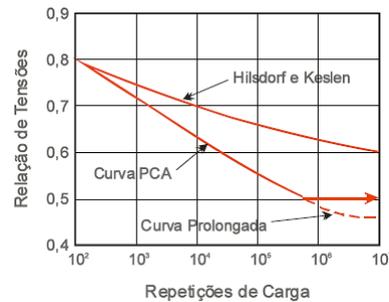
El criterio de erosión depende de la correlación entre las deformaciones verticales calculadas en la esquina de las placas y de las presiones verticales en la interfaz entre la placa y su fundación. El factor de erosión ( $P$ ) mide el poder que tiene una carga de imponer una cierta deformación a la placa y es producto de la presión vertical en la interfaz ( $p$ ) por la deformación vertical ( $w$ ) dividido por el radio de rigidez relativo ( $l_c$ ) de la cuenca de deformación de la fundación por unidad de área (DNIT, 2005).

##### **Falla por fatiga**

Las tensiones producidas por la carga tangente al borde longitudinal producen las tensiones de tracción por flexión que serán consideradas en el cálculo. La curva de fatiga se encuentra implícita en los ábacos de dimensionamiento, se hace uso de

la Ley de Miner que establece que el porcentaje de resistencia a la fatiga no consumida por una determinada clase de carga queda disponible para el consumo por otras cargas, siendo que el daño total es la suma de los daños o consumos individuales, el consumo total admisible de fatiga es de 100% (DNIT, 2005).

**Figura 27 – Curvas de fatiga**



**Fuente:** DNIT (2005).

#### 3.2.4.2.2 Procedimiento

El procedimiento y las informaciones descritas se basan en las informaciones disponibles en el Manual de Pavimentos Rígidos de la DNIT (2005):

Primeramente, se definen los parámetros iniciales:

##### **Tipo de banquina**

La banquina de hormigón tiene un efecto de reducción de deformaciones verticales a lo largo del borde, su uso puede contribuir en una reducción de hasta 4 cm en el espesor del pavimento.

##### **Uso de pasadores**

La contribución de los pasadores es grande en la reducción del espesor, logrando hasta 5 cm de reducción en pavimentos sin banquina y subbase sujetos a tráfico pesado.

##### **Resistencia a la tracción en la flexión**

Similar al método AASHTO esta resistencia es la medida a los 28 días.

##### **Factor de seguridad**

Depende del tipo de pavimento y características de tráfico:

**Figura 28 – Factor de seguridad de carga**

Tipo de Pavimento	FSC
Para rutas con tráfico con pequeño porcentaje de camiones y pisos en condiciones semejantes de tráfico (estacionamientos, por ejemplo)	1,0
Para carreteras y vías con moderada frecuencia de camiones	1,1
Para altos volúmenes de camiones	1,2
Pavimentos que necesiten de un desempeño encima de lo normal	hasta 1,5

Fuente: DNIT (2005).

**Tráfico esperado para la vida de proyecto:**

Consiste en la cantidad de ejes solicitantes para el periodo de diseño por peso y tipo de eje (simple, tándem doble o triple), solo serán considerados buses y camiones, se calculará el total de ejes solicitantes para cada tipo de eje y rango de carga para todos los vehículos considerados.

**Figura 29 – Ejemplo de Trafico Esperado**

EXEMPLO DE CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)							
Faixa da Carga (tf)	Ônibus (T = 723)		Caminhões de 2 eixos (T = 460)		Caminhões de mais de 2 eixos (T = 1113)		Total de Eixos Solicitantes
	Eixos por 1000 veículos	Nº de Eixos	Eixos por 1000 veículos	Nº de Eixos	Eixos por 1000 veículos	Nº de Eixos	
<b>Eixos Simples</b>							
< 5	1348	974.804	1452	667.920	1463	1.628.319	3.270.843
5 - 6	130	93.990	50	23.000	78	86.814	203.804
6 - 7	174	124.802	65	29.900	122	135.786	290.488
7 - 8	130	93.920	57	26.220	106	117.978	238.118
8 - 9	87	62.901	57	26.220	138	153.594	242.715
9 - 10	87	62.901	77	35.420	191	212.583	310.904
10 - 11	43	31.089	96	44.160	186	207.018	282.267
11 - 12			77	35.420	186	207.018	242.438
12 - 13			50	23.000	165	183.645	206.645
13 - 14			15	6.900	53	58.989	65.889
14 - 15			8	3.680	32	35.616	39.296
15 - 16					5	5.565	5.565
<b>Eixos Tandem Duplos</b>							
< 13					164	182.532	182.532
13 - 14					5	5.565	5.565
14 - 15					11	12.243	12.243
15 - 16					11	12.243	12.243
16 - 17					16	17.808	17.808
17 - 18					27	30.051	30.051
18 - 19					21	23.373	23.373
19 - 20					16	17.808	17.808
20 - 21					16	17.808	17.808
21 - 22					11	12.243	12.243
22 - 23					5	5.565	5.565
23 - 24					5	5.565	5.565
<b>Eixos Tandem Triplos</b>							
< 24					27	30.051	30.051
24 - 26					16	17.808	17.808
26 - 28					11	12.243	12.243
28 - 30					17	18.921	18.921

Fuente: DNIT (2005).

Luego, una vez determinados los parámetros se establece un espesor tentativo (h) y se llenan los datos de proyecto.

**Figura 30** – Ejemplo de llenado de datos de proyecto

Projeto: Pesquisa IPR / Pavimentos Rígidos  
 Espessura-tentativa: 25 cm Juntas com BT: sim  não   
 $K_{cb}$  100 MPa/m Acostamento de concreto: sim  não   
 Resistência característica à tração na flexão 4,8 Mpa Período de projeto 20 anos  
 Fator de segurança de cargas,  $F_{sc}$  1,2

Fuente: DNIT (2005).

A continuación, se determina la tensión equivalente en base al espesor tentativo establecida (h) y el coeficiente de asentamiento (k) teniendo en cuenta la presencia de banquina para cada tipo de eje (simple, tándem doble o triple) y se anotan en los lugares correspondientes para cada tipo de eje con base a las figuras a continuación:

**Figura 31** – Tensión Equivalente Ejes Simples y Tándem Doble – Sin banquina

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		180	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	4,30	3,56	3,78	3,01	3,51	2,81	3,31	2,68	3,17	2,57	2,91	2,43	2,74	2,35
13	3,84	2,33	3,38	2,73	3,14	2,53	2,97	2,40	2,84	2,30	2,61	2,16	2,46	2,08
14	3,46	2,96	3,05	2,49	2,83	2,29	2,68	2,16	2,56	2,08	2,37	1,94	2,23	1,85
15	3,14	2,72	2,27	2,29	2,57	2,09	2,44	1,97	2,33	1,88	2,16	1,75	2,04	1,67
16	2,87	2,52	2,53	2,12	2,35	1,93	2,23	1,81	2,13	1,73	1,97	1,60	1,87	1,52
17	2,63	2,35	2,33	1,97	2,16	1,79	2,05	1,67	1,96	1,60	1,81	1,47	1,72	1,39
18	2,43	2,20	2,15	1,84	1,99	1,66	1,89	1,55	1,81	1,48	1,68	1,36	1,59	1,28
19	2,25	2,07	1,99	1,72	1,85	1,56	1,75	1,45	1,68	1,38	1,56	1,26	1,48	1,19
20	2,10	1,95	1,85	1,62	1,72	1,46	1,64	1,36	1,56	1,29	1,45	1,18	1,38	1,11
21	1,96	1,85	1,73	1,53	1,61	1,38	1,52	1,29	1,46	1,22	1,36	1,11	1,28	1,04
22	1,83	1,75	1,62	1,45	1,50	1,31	1,42	1,22	1,37	1,15	1,28	1,05	1,20	0,98
23	1,72	1,67	1,52	1,38	1,41	1,24	1,33	1,15	1,28	1,09	1,20	0,99	1,13	0,92
24	1,62	1,59	1,43	1,31	1,33	1,18	1,25	1,10	1,21	1,04	1,13	0,94	1,07	0,88
25	1,53	1,52	1,35	1,25	1,26	1,12	1,19	1,05	1,14	0,99	1,07	0,89	1,01	0,83
26	1,45	1,45	1,28	1,20	1,19	1,07	1,13	1,00	1,08	0,94	1,01	0,85	0,95	0,80
27	1,83	1,39	1,21	1,15	1,13	1,03	1,07	0,95	1,03	0,90	0,95	0,81	0,90	0,76
28	1,31	1,34	1,15	1,10	1,07	0,99	1,02	0,91	0,98	0,86	0,90	0,78	0,86	0,73
29	1,25	1,29	1,10	1,06	1,02	0,95	0,97	0,88	0,93	0,83	0,86	0,75	0,82	0,69
30	1,19	1,24	1,05	1,02	0,97	0,91	0,92	0,85	0,89	0,80	0,82	0,72	0,78	0,66
31	1,13	1,20	1,00	0,99	0,93	0,88	0,88	0,81	0,84	0,77	0,78	0,69	0,74	0,64
32	1,09	1,16	0,96	0,95	0,89	0,85	0,84	0,78	0,80	0,74	0,75	0,67	0,71	0,62
33	1,04	1,12	0,92	0,92	0,85	0,82	0,80	0,76	0,77	0,71	0,72	0,64	0,68	0,60
34	1,00	1,08	0,88	0,89	0,81	0,79	0,77	0,73	0,73	0,69	0,69	0,62	0,66	0,58

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fuente: DNIT (2005).

**Figura 32 – Tensión Equivalente Tándem Triple - Sin banquina**

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	2,60	2,30	2,20	2,14	2,08	2,07
13	2,35	2,04	1,93	1,87	1,80	1,78
14	2,15	1,83	1,72	1,65	1,58	1,55
15	1,99	1,67	1,55	1,48	1,40	1,37
16	1,85	1,54	1,41	1,34	1,25	1,23
17	1,73	1,43	1,30	1,23	1,14	1,11
18	1,62	1,34	1,21	1,14	1,04	1,01
19	1,53	1,26	1,13	1,06	0,96	0,92
20	1,45	1,19	1,07	0,99	0,89	0,85
21	1,37	1,13	1,01	0,93	0,83	0,79
22	1,30	1,07	0,95	0,88	0,78	0,74
23	1,24	1,02	0,91	0,84	0,73	0,70
24	1,18	0,97	0,87	0,80	0,69	0,66
25	1,13	0,93	0,83	0,76	0,66	0,62
26	1,07	0,89	0,79	0,73	0,63	0,59
27	1,02	0,86	0,76	0,70	0,60	0,57
28	0,98	0,82	0,73	0,67	0,58	0,54
29	0,93	0,79	0,71	0,65	0,55	0,52
30	0,89	0,76	0,68	0,63	0,53	0,50
31	0,85	0,73	0,66	0,60	0,51	0,48
32	0,81	0,70	0,63	0,58	0,50	0,46
33	0,77	0,68	0,61	0,56	0,48	0,45
34	0,73	0,65	0,59	0,55	0,46	0,43

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fuente: DNIT (2005).

**Figura 33 – Tensión Equivalente Ejes Simples y Tándem Doble – Con banquina**

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		180	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,36	2,82	2,95	2,46	2,74	2,31	2,60	2,22	2,49	2,16	2,31	2,08	2,19	2,04
13	3,02	2,56	2,66	2,22	2,47	2,08	2,34	1,99	2,25	1,94	2,09	1,86	1,99	1,81
14	2,74	2,34	2,41	2,02	2,24	1,89	2,13	1,80	2,05	1,75	1,91	1,67	1,82	1,62
15	2,50	2,15	2,20	1,85	2,05	1,72	1,95	1,64	1,88	1,59	1,75	1,51	1,67	1,46
16	2,29	1,99	2,02	1,71	1,88	1,58	1,80	1,51	1,73	1,46	1,61	1,38	1,55	1,33
17	2,11	1,85	1,86	1,58	1,74	1,46	1,66	1,39	1,60	1,34	1,49	1,26	1,43	1,21
18	1,96	1,72	1,73	1,47	1,61	1,35	1,54	1,29	1,48	1,24	1,39	1,16	1,33	1,12
19	1,82	1,62	1,61	1,38	1,50	1,27	1,43	1,20	1,38	1,16	1,29	1,08	1,24	1,04
20	1,70	1,52	1,50	1,29	1,40	1,19	1,34	1,13	1,29	1,08	1,21	1,01	1,16	0,97
21	1,59	1,44	1,40	1,22	1,31	1,12	1,26	1,06	1,21	1,02	1,13	0,95	1,09	0,91
22	1,49	1,36	1,32	1,15	1,23	1,06	1,18	1,00	1,14	0,96	1,07	0,89	1,02	0,86
23	1,40	1,29	1,24	1,09	1,16	1,00	1,11	0,95	1,07	0,91	1,01	0,84	0,97	0,81
24	1,32	1,23	1,17	1,04	1,10	0,95	1,05	0,90	1,01	0,86	0,95	0,80	0,91	0,76
25	1,25	1,18	1,11	0,99	1,04	0,91	0,99	0,85	0,96	0,82	0,90	0,76	0,87	0,73
26	1,19	1,12	1,05	0,95	0,98	0,87	0,94	0,81	0,91	0,78	0,86	0,72	0,82	0,69
27	1,13	1,08	1,00	0,91	0,93	0,83	0,89	0,78	0,86	0,84	0,81	0,69	0,78	0,66
28	1,07	1,03	0,95	0,87	0,89	0,79	0,85	0,74	0,82	0,71	0,78	0,66	0,75	0,63
29	1,02	0,99	0,91	0,84	0,85	0,76	0,81	0,71	0,78	0,68	0,74	0,63	0,71	0,60
30	0,98	0,95	0,87	0,81	0,81	0,73	0,77	0,69	0,75	0,66	0,71	0,61	0,68	0,58
31	0,93	0,92	0,83	0,78	0,77	0,71	0,74	0,66	0,72	0,63	0,68	0,58	0,65	0,55
32	0,90	0,89	0,79	0,75	0,74	0,68,00	0,71	0,64	0,69	0,61	0,65	0,56	0,62	0,53
33	0,86	0,86	0,76	0,72	0,71	0,66	0,68	0,61	0,66	0,59	0,62	0,54	0,60	0,51
34	0,83	0,83	0,73	0,70	0,69	0,63	0,66	0,59	0,63	0,57	0,60	0,52	0,57	0,49

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fuente: DNIT (2005).

**Figura 34 – Tensión Equivalente Tándem Triple - Con banquina**

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	2,60	2,00	1,93	1,89	1,85	1,85
13	1,97	1,78	1,70	1,66	1,61	1,61
14	1,78	1,59	1,52	1,48	1,43	1,42
15	1,62	1,44	1,37	1,30	1,27	1,26
16	1,49	1,32	1,24	1,20	1,15	1,13
17	1,38	1,21	1,14	1,10	1,15	1,03
18	1,28	1,12	1,05	1,01	1,04	0,94
19	1,19	1,04	0,98	0,94	0,96	0,86
20	1,12	0,98	0,91	0,87	0,88	0,80
21	1,05	0,92	0,85	0,81	0,82	0,74
22	0,99	0,86	0,80	0,76	0,76	0,69
23	0,93	0,81	0,76	0,72	0,71	0,65
24	0,88	0,77	0,71	0,68	0,67	0,61
25	0,84	0,73	0,68	0,64	0,63	0,57
26	0,79	0,70	0,64	0,61	0,59	0,54
27	0,75	0,66	0,61	0,58	0,56	0,52
28	0,72	0,63	0,59	0,56	0,53	0,49
29	0,68	0,60	0,56	0,53	0,51	0,47
30	0,65	0,58	0,54	0,51	0,49	0,45
31	0,62	0,55	0,51	0,49	0,46	0,43
32	0,59	0,53	0,49	0,47	0,44	0,41
33	0,57	0,51	0,47	0,45	0,41	0,39
34	0,54	0,49	0,46	0,43	0,39	0,38

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Fuente:** DNIT (2005).

El siguiente factor determinado es el factor de erosión considerando el tipo de junta, si incluye o no barras de transferencia (pasadores) y si posee o no banquina en base al espesor (h) de la placa y el coeficiente de asentamiento (k) para cada tipo de eje y se anota en el lugar correspondiente; las figuras para determinación de este factor proveídas por la DNIT son las siguientes:

**Figura 35 – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Sin banquina – Sin pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		200	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	2,72	3,82	3,69	3,74	3,67	3,69	3,65	3,67	3,64	3,65	3,63	3,61	3,59	3,58
13	3,62	3,75	3,59	3,66	3,57	3,61	3,55	3,59	3,54	3,57	3,52	3,52	3,49	3,49
14	3,53	3,68	3,50	3,59	3,48	3,53	3,46	3,51	3,45	3,49	3,43	3,44	3,40	3,41
15	3,45	3,61	3,41	3,52	3,39	3,46	3,37	3,44	3,36	3,42	3,34	3,37	3,31	3,34
16	3,37	3,55	3,33	3,46	3,31	3,40	3,29	3,37	3,28	3,35	3,26	3,30	3,23	3,26
17	3,30	3,50	3,26	3,40	3,23	3,34	3,21	3,31	3,20	3,29	3,18	3,23	3,16	3,20
18	3,23	3,44	3,18	3,34	3,16	3,28	3,14	3,25	3,13	3,23	3,11	3,17	3,09	3,13
19	3,17	3,39	3,12	3,29	3,09	3,23	3,07	3,19	3,06	3,17	3,04	3,11	3,02	3,07
20	3,11	3,35	3,05	3,24	3,03	3,17	3,01	3,14	3,00	3,12	2,98	3,05	2,96	3,02
21	3,05	3,30	2,99	3,19	2,97	3,13	2,95	3,09	2,94	3,07	2,92	3,00	2,90	2,96
22	3,00	3,26	2,94	3,15	2,91	3,08	2,89	3,04	2,88	3,02	2,86	2,85	2,84	2,91
23	2,94	3,22	2,88	3,11	2,85	3,03	2,83	2,99	2,82	2,97	2,80	2,90	2,78	2,86
24	2,90	3,18	2,84	3,07	2,80	2,99	2,78	2,95	2,77	2,93	2,75	2,86	2,73	2,82
25	2,86	3,14	2,78	3,03	2,76	2,96	2,73	2,91	2,72	2,89	2,70	2,82	2,68	2,78
26	2,81	3,11	2,75	2,99	2,71	2,92	2,69	2,88	2,68	2,86	2,65	2,71	2,63	2,74
27	2,77	3,08	2,70	2,96	2,67	2,89	2,64	2,84	2,63	2,82	2,61	2,75	2,59	2,71
28	2,73	3,05	2,66	3,93	2,62	2,85	2,60	2,81	2,59	2,79	2,56	2,71	2,54	2,67
29	2,70	3,02	2,62	2,90	2,58	2,82	2,56	2,78	2,55	2,75	2,52	2,68	2,50	2,64
30	2,66	2,99	2,59	2,86	2,54	2,79	2,51	2,75	2,50	2,72	2,48	2,64	2,46	2,60
31	2,63	2,96	2,55	2,83	2,50	2,76	2,48	2,72	2,47	2,69	2,44	2,61	2,42	2,57
32	2,59	2,93	2,51	2,81	2,47	2,73	2,44	2,69	2,43	2,66	2,40	2,58	2,38	2,54
33	2,56	2,90	2,48	2,78	2,43	2,70	2,40	2,66	2,39	2,63	2,36	2,55	2,34	2,51
34	2,53	2,88	2,45	2,75	2,40	2,67	2,37	2,63	2,36	2,60	2,32	2,52	2,30	2,48

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fuente: DNIT (2005).

**Figura 36 – Factor de Erosión Tándem Triple – Sin banquina – Sin pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,85	3,75	3,70	3,66	3,57	3,53
13	3,77	3,68	3,62	3,58	3,50	3,45
14	3,70	3,60	3,55	3,51	3,42	3,38
15	3,64	3,54	3,48	3,44	3,36	3,32
16	3,58	3,47	3,42	3,38	3,29	3,25
17	3,52	3,42	3,36	3,32	3,23	3,19
18	3,47	3,36	3,30	3,26	3,18	3,14
19	3,42	3,31	3,25	3,21	3,13	3,09
20	3,37	3,26	3,20	3,16	3,08	3,04
21	3,33	3,22	3,16	3,11	3,03	2,99
22	3,29	3,18	3,11	3,07	2,99	2,95
23	3,25	3,13	3,07	3,03	2,94	2,91
24	3,21	3,10	3,03	2,99	2,90	2,86
25	3,17	3,06	2,99	2,95	2,87	2,83
26	3,14	3,02	2,96	2,91	2,83	2,79
27	3,10	2,99	2,92	2,88	2,79	2,75
28	3,07	2,96	2,89	2,85	2,76	2,72
29	3,04	2,92	2,86	2,81	2,73	2,69
30	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65
31	2,98	2,87	2,80	2,75	2,66	2,62
32	2,96	2,84	2,77	2,72	2,63	2,59
33	2,93	2,81	2,74	2,70	2,61	2,57
34	2,91	2,81	2,72	2,67	2,58	2,54

ETT: Eixos Tandem Triplos

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fuente: DNIT (2005).

**Figura 37 – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Con banquina – Sin pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)													
	20		40		60		80		100		150		200	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,25	3,29	3,20	3,19	3,18	3,13	3,17	3,11	3,16	3,09	3,13	3,04	3,11	3,03
13	3,16	3,23	3,11	3,12	3,09	3,06	3,08	3,04	3,06	3,02	3,03	2,97	3,01	2,95
14	3,08	3,17	3,03	3,06	3,00	2,99	2,99	2,97	2,98	2,95	2,95	2,90	2,93	2,87
15	3,00	3,11	2,95	3,00	2,92	2,93	2,91	2,91	2,90	2,88	2,87	2,83	2,85	2,80
16	2,93	3,06	2,88	2,94	2,85	2,88	2,84	2,85	2,82	2,82	2,79	2,77	2,77	2,74
17	2,87	3,01	2,81	2,89	2,78	2,82	2,77	2,79	2,75	2,77	2,72	2,71	2,70	2,68
18	2,80	2,97	2,74	2,84	2,71	2,77	2,70	2,74	2,69	2,71	2,66	2,65	2,64	2,62
19	2,74	2,92	2,68	2,80	2,65	2,72	2,64	2,69	2,62	2,66	2,59	2,60	2,57	2,57
20	2,69	2,88	2,62	2,76	2,59	2,68	2,58	2,64	2,56	2,62	2,53	2,55	2,51	2,51
21	2,63	2,84	2,57	2,71	2,53	2,64	2,52	2,60	2,51	2,57	2,48	2,50	2,46	2,47
22	2,58	2,80	2,51	2,68	2,48	2,59	2,47	2,56	2,45	2,53	2,42	2,46	2,40	2,42
23	2,53	2,77	2,46	2,64	2,43	2,55	2,42	2,51	2,40	2,48	2,37	2,41	2,35	2,37
24	2,48	2,74	2,42	2,60	2,38	2,52	2,37	2,48	2,36	2,45	2,33	2,31	2,31	2,33
25	2,44	2,71	2,37	2,57	2,34	2,49	2,33	2,45	2,31	2,42	2,28	2,34	2,26	2,29
26	2,40	2,68	2,33	2,54	2,30	2,46	2,28	2,41	2,27	2,38	2,24	2,31	2,22	2,25
27	2,36	2,65	2,29	2,51	2,26	2,43	2,24	2,38	2,22	2,35	2,20	2,27	2,17	2,21
28	2,33	2,62	2,25	2,49	2,22	2,40	2,20	2,35	2,18	2,32	2,16	2,24	2,13	2,18
29	2,29	2,60	2,22	2,46	2,18	2,37	2,16	2,33	2,14	2,30	2,12	2,21	2,09	2,14
30	2,26	2,57	2,18	2,43	2,15	2,53	2,12	2,30	2,11	2,27	2,08	2,18	2,06	2,11
31	2,22	2,55	2,15	2,41	2,11	2,32	2,09	2,27	2,07	2,24	2,04	2,15	2,02	2,07
32	2,19	2,52	2,11	2,38	2,08	2,29	2,05	2,25	2,03	2,22	2,01	2,13	1,98	2,04
33	2,16	2,50	2,08	2,36	2,04	2,27	2,02	2,22	2,00	2,19	1,99	2,10	1,95	2,01
34	2,13	2,48	2,05	2,34	2,01	2,25	1,98	2,20	1,97	2,17	1,94	2,07	1,92	1,98

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

**Fuente: DNIT (2005).****Figura 38 – Factor de Erosión Tándem Triple – Con banquina – Sin pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,29	3,18	3,12	3,09	3,02	2,99
13	3,23	3,11	3,05	3,01	2,94	2,91
14	3,17	3,04	2,98	2,94	2,87	2,83
15	3,12	2,99	2,92	2,88	2,80	2,77
16	3,08	2,94	2,87	2,82	2,74	2,70
17	3,03	2,89	2,82	2,77	2,69	2,65
18	2,99	2,85	2,77	2,72	2,60	2,60
19	2,96	2,81	2,73	2,68	2,59	2,55
20	2,93	2,77	2,69	2,64	2,54	2,50
21	2,89	2,74	2,65	2,60	2,50	2,46
22	2,87	2,71	2,62	2,56	2,47	2,42
23	2,84	2,68	2,59	2,53	2,43	2,38
24	2,81	2,65	2,56	2,50	2,40	2,35
25	2,79	2,62	2,53	2,47	2,37	2,29
26	2,77	2,60	2,50	2,44	2,34	2,26
27	2,74	2,57	2,48	2,39	2,31	2,23
28	2,72	2,55	2,46	2,37	2,28	2,20
29	2,70	2,53	2,43	2,35	2,26	2,20
30	2,68	2,51	2,41	2,33	2,23	2,18
31	2,67	2,49	2,39	2,31	2,21	2,16
32	2,65	2,47	2,37	2,29	2,19	2,13
33	2,63	2,45	2,35	2,27	2,17	2,11
34	2,61	2,43	2,33	2,27	2,15	2,09

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Fuente: DNIT (2005).**

**Figura 39 – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Sin banquina – Con pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		200	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,51	3,61	3,50	3,57	3,49	3,54	3,48	3,52	3,48	3,51	3,47	3,49	3,45	3,47
13	3,41	3,53	3,39	3,48	3,39	3,45	3,38	3,43	3,38	3,41	3,37	3,39	3,35	3,37
14	3,32	3,45	3,30	3,39	3,29	3,36	3,28	3,34	3,28	3,33	3,27	3,30	3,25	3,28
15	3,23	3,45	3,21	3,31	3,20	3,28	3,19	3,26	3,19	3,24	3,18	3,22	3,16	3,20
16	3,15	3,37	3,12	3,24	3,12	3,21	3,10	3,18	3,10	3,17	3,09	3,14	3,08	3,12
17	3,07	3,30	3,05	3,17	3,04	3,14	3,02	3,11	3,02	3,10	3,01	3,07	3,00	3,04
18	2,99	3,24	2,97	3,11	2,96	3,07	2,95	3,05	2,94	3,03	2,93	3,00	2,92	2,97
19	2,93	3,18	2,90	3,05	2,89	3,01	2,88	2,98	2,87	2,97	2,86	2,93	2,85	2,91
20	2,86	3,12	2,83	3,00	2,83	2,95	2,81	2,92	2,80	2,91	2,79	2,87	2,79	2,84
21	2,80	3,06	2,77	2,93	2,76	2,89	2,74	2,86	2,74	2,85	2,73	2,81	2,72	2,78
22	2,74	3,01	2,71	2,88	2,70	2,84	2,68	2,81	2,68	2,80	2,67	2,76	2,66	2,73
23	2,68	2,96	2,65	2,83	2,64	2,79	2,62	2,76	2,62	2,74	2,61	2,70	2,59	2,67
24	2,63	2,91	2,60	2,78	2,59	2,74	2,57	2,71	2,56	2,69	2,55	2,65	2,54	2,62
25	2,58	2,87	2,54	2,74	2,54	2,69	2,52	2,67	2,51	2,65	2,50	2,60	2,49	2,57
26	2,53	2,83	2,50	2,70	2,49	2,65	2,47	2,62	2,46	2,61	2,45	2,56	2,44	2,53
27	2,48	2,79	2,45	2,66	2,44	2,61	2,42	2,58	2,41	2,57	2,40	2,52	2,39	2,49
28	2,43	2,75	2,40	2,63	2,39	2,57	2,37	2,54	2,37	2,53	2,35	2,48	2,34	2,45
29	2,39	2,72	2,36	2,59	2,35	2,54	2,33	2,51	2,32	2,49	2,31	2,44	2,30	2,41
30	2,43	2,69	2,31	2,56	2,30	2,50	2,28	2,47	2,28	2,45	2,26	2,41	2,25	2,37
31	2,30	2,65	2,27	2,52	2,26	2,47	2,24	2,43	2,24	2,43	2,22	2,37	2,21	2,34
32	2,26	2,62	2,23	2,49	2,22	2,43	2,20	2,40	2,19	2,38	2,18	2,33	2,17	2,30
33	2,22	2,59	2,19	2,46	2,18	2,40	2,16	2,37	2,15	2,35	2,14	2,30	2,13	2,27
34	2,18	2,56	2,15	2,43	2,14	2,37	2,12	2,33	2,12	2,32	2,10	2,27	2,09	2,24

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

**Fuente: DNIT (2005).****Figura 40 – Factor de Erosión Tándem Triple – Sin banquina – Con pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (Mpa/m)					
	20	40	60	80	140	180
12	3,68	3,60	3,56	3,52	3,45	3,40
13	3,60	3,51	3,47	3,44	3,37	3,33
14	3,53	3,43	3,39	3,36	3,29	3,26
15	3,47	3,36	3,31	3,28	3,22	3,19
16	3,41	3,30	3,25	3,21	3,15	3,12
17	3,35	3,24	3,19	3,15	3,08	3,05
18	3,30	3,19	3,13	3,09	3,02	2,99
19	3,25	3,14	3,08	3,04	2,96	2,93
20	3,21	3,09	3,03	2,99	2,91	2,88
21	3,16	3,05	2,99	2,94	2,86	2,83
22	3,12	3,01	2,94	2,90	2,82	2,78
23	3,08	2,97	2,90	2,86	2,77	2,74
24	3,05	2,93	2,86	2,82	2,73	2,69
25	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65
26	2,98	2,86	2,79	2,74	2,66	2,62
27	2,94	2,82	2,76	2,71	2,66	2,58
28	2,91	2,79	2,72	2,68	2,59	2,55
29	2,88	2,76	2,69	2,65	2,55	2,51
30	2,85	2,73	2,66	2,62	2,52	2,48
31	2,82	2,70	2,63	2,59	2,49	2,45
32	2,80	2,68	2,61	2,56	2,46	2,42
33	2,77	2,65	2,58	2,53	2,44	2,40
34	2,74	2,62	2,55	2,50	2,41	2,37

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Fuente: DNIT (2005).**

**Figura 41 – Factor de Erosión Ejes Simples y Tándem Doble – Con banquina – Con pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		180	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,07	3,09	3,02	2,99	3,00	2,93	2,97	2,90	2,96	2,88	2,94	2,84	2,92	2,83
13	2,97	3,02	2,92	2,92	2,90	2,86	2,87	2,83	2,86	2,80	2,84	2,76	2,82	2,74
14	2,88	2,96	2,83	2,85	2,81	2,79	2,78	2,76	2,77	2,73	2,75	2,68	2,73	2,66
15	2,80	2,89	2,75	2,79	2,73	2,72	2,70	2,69	2,69	2,66	2,67	2,61	2,65	2,59
16	2,72	2,84	2,67	2,73	2,65	2,66	2,62	2,63	2,61	2,60	2,59	2,55	2,57	2,52
17	2,64	2,78	2,60	2,68	2,58	2,60	2,55	2,57	2,54	2,54	2,52	2,48	2,49	2,45
18	2,57	2,73	2,53	2,62	2,51	2,55	2,48	2,51	2,47	2,48	2,45	2,42	2,42	2,39
19	2,51	2,69	2,47	2,57	2,44	2,50	2,41	2,46	2,40	2,43	2,38	2,73	2,36	2,33
20	2,44	2,64	2,41	2,53	2,38	2,45	2,35	2,41	2,34	2,38	2,32	2,31	2,29	2,28
21	2,38	2,60	2,35	2,48	2,32	2,40	2,29	2,36	2,28	2,33	2,26	2,26	2,23	2,22
22	2,33	2,56	2,30	2,44	2,27	2,36	2,24	2,32	2,23	2,29	2,21	2,21	2,18	2,17
23	2,27	2,52	2,24	2,40	2,21	2,31	2,18	2,27	2,17	2,24	2,15	2,17	2,12	2,12
24	2,23	2,48	2,10	2,36	2,16	2,28	2,13	2,24	2,12	2,20	2,10	2,13	2,07	2,08
25	2,18	2,43	2,14	2,33	2,11	2,24	2,09	2,20	2,08	2,17	2,05	2,09	2,02	2,03
26	2,14	2,39	2,09	2,29	2,06	2,21	2,04	2,17	2,03	2,13	2,01	2,06	1,97	1,99
27	2,19	2,35	2,05	2,26	2,02	2,17	2,00	2,13	1,99	2,10	1,96	2,03	1,93	1,95
28	2,06	2,32	2,01	2,23	1,98	2,14	1,95	2,10	1,94	2,07	1,92	1,99	1,98	1,94
29	2,03	2,28	1,97	2,19	1,94	2,11	1,91	2,07	1,90	2,04	1,88	1,93	1,85	1,87
30	1,99	2,25	1,93	2,16	1,90	2,08	1,87	2,04	1,86	2,01	1,83	1,93	1,81	1,83
31	1,96	2,21	1,89	2,13	1,86	2,05	1,83	2,01	1,82	1,98	1,80	1,90	1,77	1,80
32	1,92	2,18	1,86	2,11	1,83	2,03	1,80	1,99	1,79	1,95	1,76	1,87	1,74	1,76
33	1,89	2,15	1,82	2,08	1,79	2,00	1,76	1,96	1,75	1,92	1,72	1,85	1,70	1,73
34	1,86	2,12	1,79	2,05	1,76	1,97	1,73	1,93	1,72	1,90	1,69	1,82	1,67	1,70

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fuente: DNIT (2005).

**Figura 42 – Factor de Erosión Tándem Triple – Con banquina – Con pasadores**

Espesura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,12	2,99	2,93	2,90	2,85	2,82
13	3,06	2,92	2,85	2,81	2,76	2,73
14	3,00	2,86	2,78	2,74	2,67	2,64
15	2,95	2,80	2,73	2,67	2,59	2,56
16	2,91	2,76	2,67	2,62	2,52	2,49
17	2,86	2,71	2,62	2,57	2,47	2,43
18	2,82	2,67	2,58	2,52	2,41	2,37
19	2,79	2,63	2,54	2,48	2,37	2,32
20	2,75	2,59	2,50	2,44	2,32	2,28
21	2,72	2,56	2,47	2,40	2,28	2,23
22	2,68	2,53	2,43	2,37	2,25	2,20
23	2,65	2,49	2,40	2,34	2,21	2,16
24	2,62	2,46	2,37	2,31	2,18	2,13
25	2,59	2,44	2,34	2,28	2,15	2,10
26	2,57	2,41	2,32	2,25	2,12	2,07
27	2,54	2,38	2,29	2,22	2,10	2,04
28	2,51	2,36	2,26	2,20	2,07	2,01
29	2,49	2,33	2,24	2,17	2,04	1,99
30	2,47	2,31	2,22	2,15	2,02	1,96
31	2,44	2,29	2,19	2,13	2,00	1,94
32	2,42	2,26	2,17	2,10	1,97	1,92
33	2,44	2,24	2,15	2,08	1,95	1,89
34	2,38	2,22	2,13	2,06	1,93	1,87

ETT: Eixos Tandem Triplos

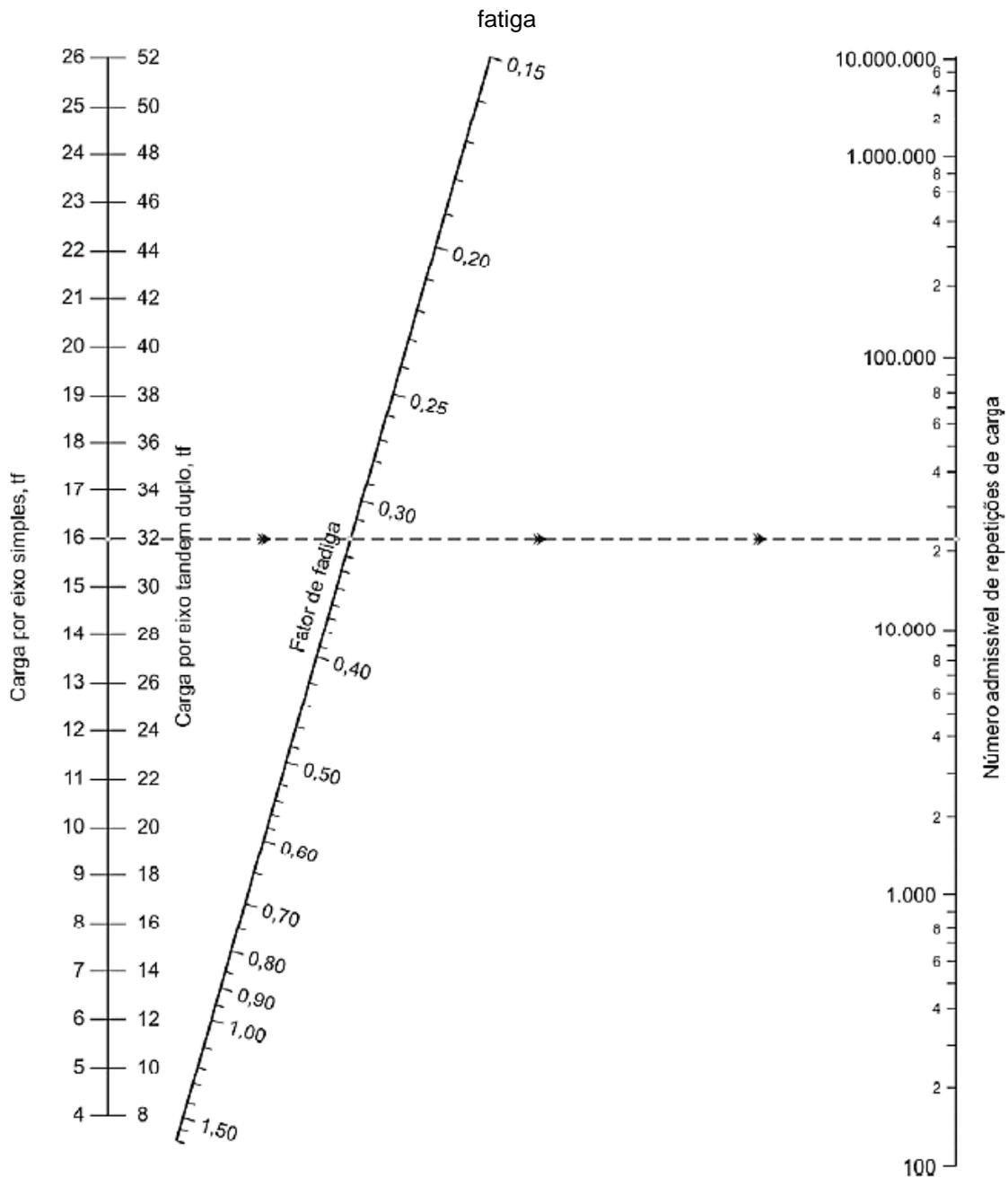
Fuente: DNIT (2005).

El factor de fatiga es calculado y anotado en su lugar correspondiente a partir de la tensión equivalente y la resistencia característica a la tracción en la flexión a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de Fatiga} = \frac{\text{Tensión Equivalente}}{\text{Resistencia a la tracción en la Flexión}}$$

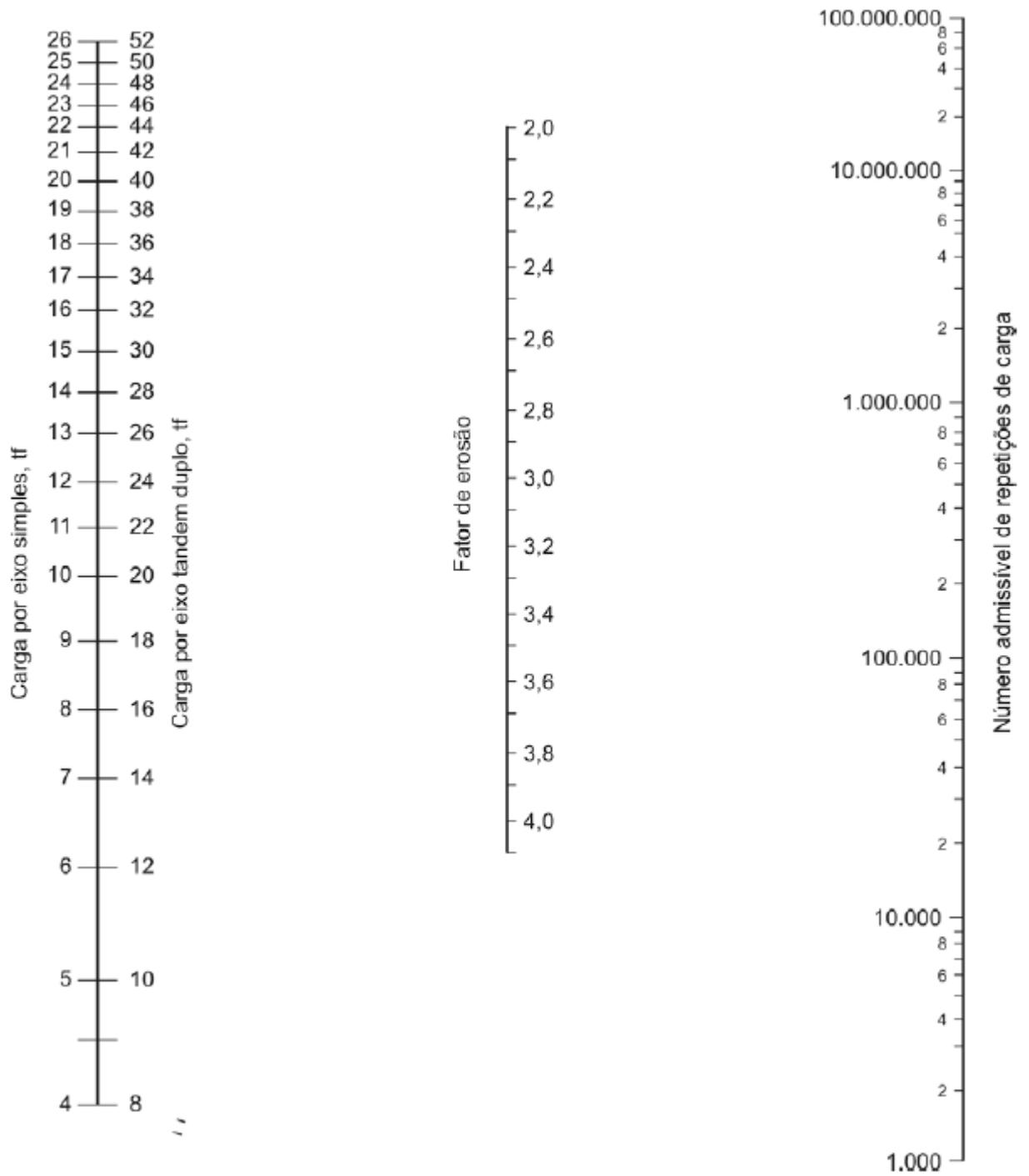
Una vez se tienen estos valores se procede a determinar las repeticiones admisibles por fatiga y por erosión haciendo uso de los siguientes ábacos:

**Figura 43** – Ábaco para Análisis de fatiga con o sin banquina – Número admisible en base al factor de fatiga



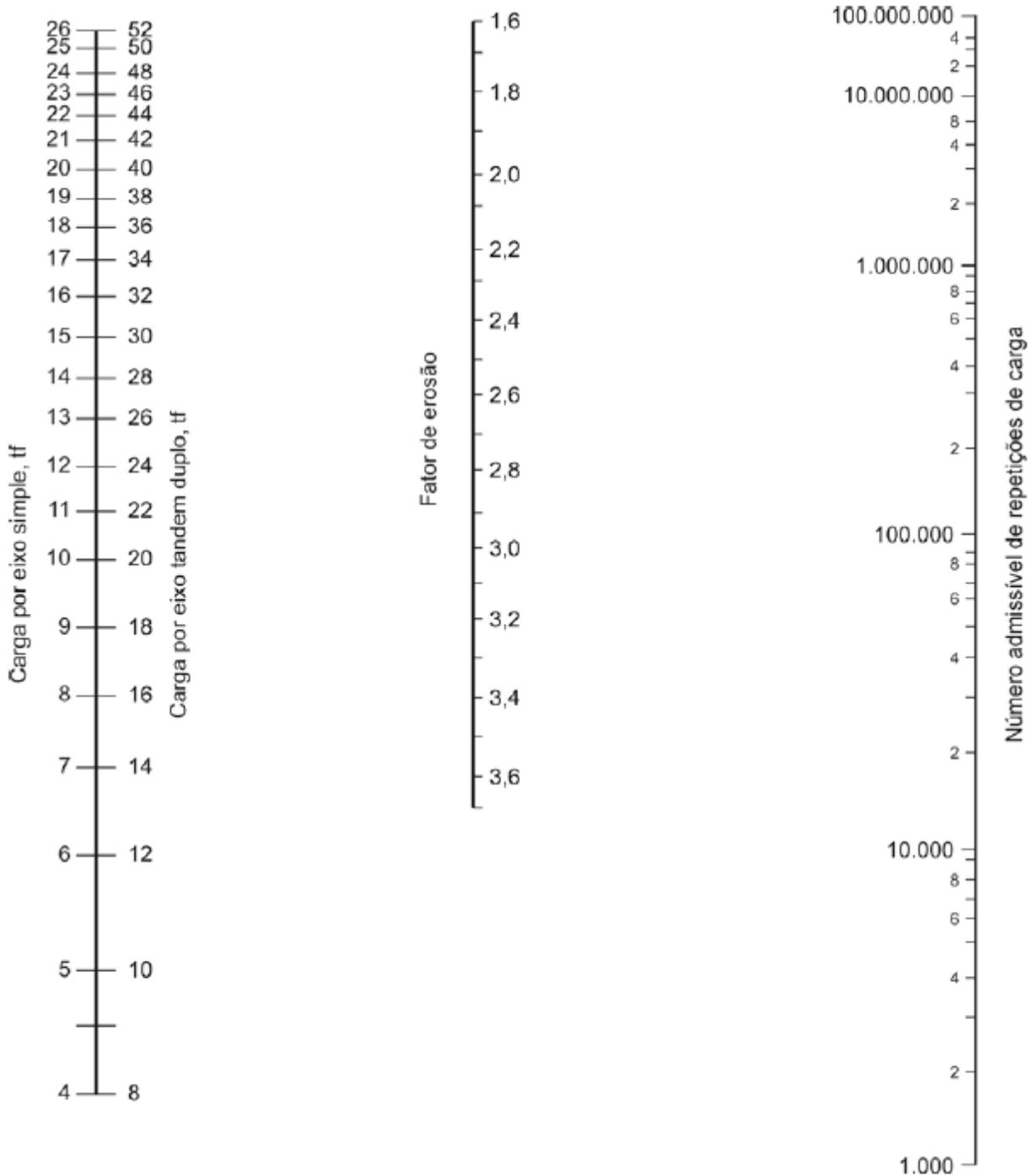
Fuente: DNIT (2005).

**Figura 44** – Ábaco para Análisis de erosión sin banquina – Número admisible en base al factor de erosión



Fuente: DNIT (2005).

**Figura 45** – Ábaco para Análisis de erosión con banquina – Número admisible en base al factor de erosión



Fuente: DNIT (2005).

Para la determinación del número de repeticiones admisibles de ejes tándem triple se considera como 3 ejes simples con  $1/3$  de la carga total cada uno, sin embargo, la tensión equivalente corresponde al conjunto.

Si el número de repeticiones admisible es superior al límite del ábaco se considera que el número de repeticiones de carga es ilimitado.

Se determina el porcentaje de resistencia a la fatiga consumida y el daño por erosión en porcentaje, luego, se suman los valores correspondientes en cada columna para verificar si el espesor cumple con los requisitos solicitados, se considera que cumple si ninguna de la suma de estas columnas es superior a 100%, para obtener un espesor optimizado se busca obtener porcentajes próximos de 100%, cuando el porcentaje es próximo de 0 la placa está sobredimensionada.

### 3.2.4.2.3 Software PCAcálculo

El cálculo por método PCA-84 puede ser ejecutado mediante uso de softwares que realizan las verificaciones necesarias. El software PCAcálculo fue desarrollado por los Ingenieros Armando Orobio y Jefferson Castro de la Universidad del Valle – Colombia en Matlab.

**Figura 46** – Captura de pantalla de interfaz del software para pavimentos rígidos PCAcálculo

**Datos generales**

Proyecto:

Descripción:

Período de diseño:  años

Espesor de la losa:  in

Módulo de rotura:  psi

Dovelas:  Sí  No

Bermas:  Sí  No

**Módulo de reacción de la subrasante (K)**

Subrasante

Ingreso directo K =  pci

Correlación con CBR CBR =

Subbase

Espesor:  in

Sin tratar  Tratada con cemento

**Tránsito**

Factor de seguridad: 1.0

Tipo de Ejes: Ejes Simples

**Ejes Simples kips**

Carga	Repeticiones
30	6310
28	14690
26	30140
24	64410
22	106900
20	235800
18	307200
16	422500
14	586900
12	1837000
0	0
0	0
0	0

**Barras de anclaje**

Diámetro de barra: 3/8" in

Acero (fy): 280 MPa

Ancho de carril: 3.05 m

**Análisis**

**Calcular**

Espesor de losa: in

Módulo de rotura: psi

K del conjunto: pci

Período de diseño: años

**Porcentaje de fatiga**

**Porcentaje de erosión**

**Recomendación para barras de anclaje:**

Longitud: in

Separación entre barras: in

**Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):**

Longitud: in

Separación entre barras: in

Diámetro de barras: in

**Análisis de sensibilidad**

**Guardar** **Abrir**

**TXT** **Salir**

Sistema de unidades:  SI  Inglés

Fuente: El autor (2021).

El proceso de dimensionamiento consiste en ingresar los valores previamente mencionados necesarios por el programa, clicar en calcular, el programa tiene como salida el análisis de sensibilidad y el documento .txt de resumen del dimensionamiento.

### 3.2.5 Proyecto Geométrico

Los pavimentos de hormigón están sujetos a la aparición de fisuras transversales y longitudinales, estas aumentan de tamaño debido a factores externos deteriorando la superficie del pavimento y su estructura, adicionalmente, las fisuras abren paso a infiltración de agua y de materiales incompresibles perjudicando así la capacidad de soporte de la subbase y provocando un aumento considerable de las tensiones en los pavimentos, este fenómeno puede ser controlado de dos maneras: una de ellas consiste en el empleo de secciones debilitadas espaciadas de manera uniforme a lo largo del pavimento, estas secciones permiten que las fisuras ocurran en lugares previamente determinados, mientras que la otra es el empleo de armadura distribuida sin función estructural para impedir la separación de las caras de las fisuras (DNIT, 2005).

Las juntas ejecutadas en los pavimentos pueden ser transversales o longitudinales:

#### 3.2.5.1 Juntas Transversales

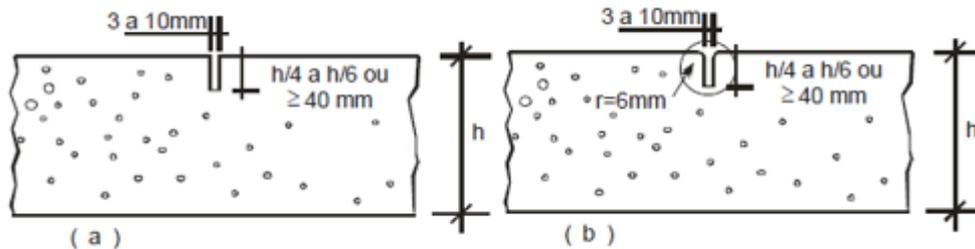
Las juntas transversales son usualmente perpendiculares al eje de la vía y se clasifican en juntas transversales de retracción (o contracción), de retracción con pasadores, de construcción y de expansión:

##### 3.2.5.1.1 Junta transversal de retracción

Es una junta formada por una sección debilitada en la placa mediante un corte o ranura en la superficie hasta una determinada profundidad que puede ser ejecutada cuando el hormigón está plástico insertando un perfil metálico o de plástico rígido, o por medio de un corte con una sierra circular con disco diamantado. La abertura de la junta varía entre 3 a 10 mm dependiendo si es serrada o abierta en el hormigón fresco,

y su profundidad es usualmente 1/4 a 1/6 del espesor de la placa, pero no menos de 4 centímetros o el mayor tamaño de los agregados para ambos casos (DNIT, 2005).

**Figura 47** – Junta transversal de retracción serrada (Izquierda) y abierta en hormigón fresco (derecha)



Fuente: DNIT (2005).

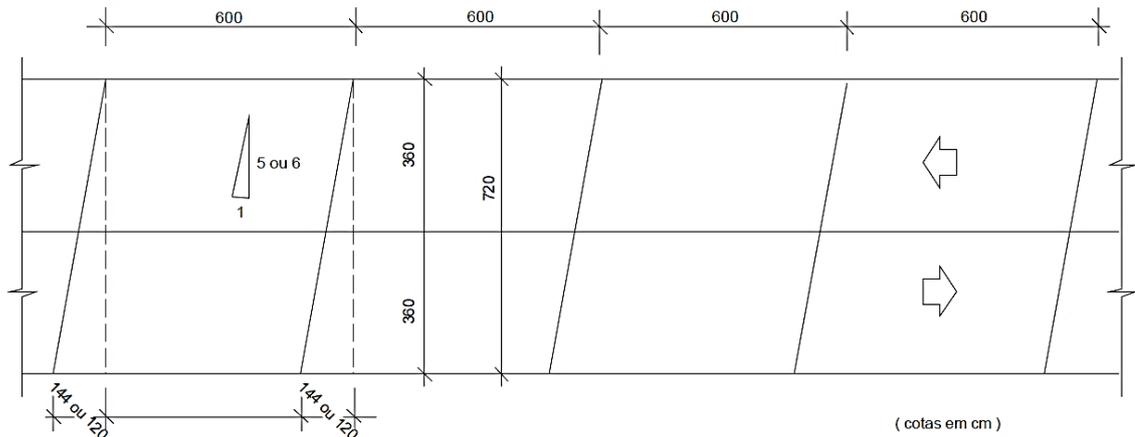
El espaciamiento de las juntas varía dependiendo de varios factores como el tipo de agregado grueso empleado en el hormigón, condiciones ambientales, fricción placa-subbase, una recomendación basada en el tipo de agregado se encuentra a continuación (DNIT, 2005):

**Figura 48** – Espaciamiento entre juntas recomendado para tipo de agregado empleado

Tipo de agregado grueso	Espacio Recomendado entre Juntas transversales
Piedra granítica	hasta 7,5
Piedra triturada calcarea, silico-calcarea, roca de piedra caliza	hasta 6,0
Canto rodado, grava o escoria con dimensión máxima menor que 19 mm	hasta 4,5

Fuente: DNIT (2005).

Las juntas transversales pueden también ser levemente inclinadas u oblicuas (1:5 o 1:6) de forma a reducir el impacto en el vehículo tras su paso por las juntas proporcionando un transitar más confortable, algunos cuidados deben ser tenidos en consideración como la marcación rigurosa de la posición de la junta, el aumento de la profundidad de la junta en aproximadamente 1 cm con relación a la profundidad de las juntas perpendiculares y disponer las juntas en de modo a reducir las tensiones en el borde de la placa, la imagen a continuación ilustra un pavimento con juntas oblicuas (DNIT, 2005).

**Figura 49** – Pavimento de hormigón con juntas oblicuas

Fuente: DNIT (2005).

### 3.2.5.1.2 Junta transversal de retracción con pasadores

Según DNIT (2005) la decisión de adoptar o no barras transferencia se basa en el tráfico de proyecto, magnitud de las cargas y en el tipo de fundación del pavimento.

La Federal Highway Administration (FHWA) recomienda el uso de pasadores en todas las autopistas independiente de si el volumen de camiones pesado es bajo (DELATTE, 2014).

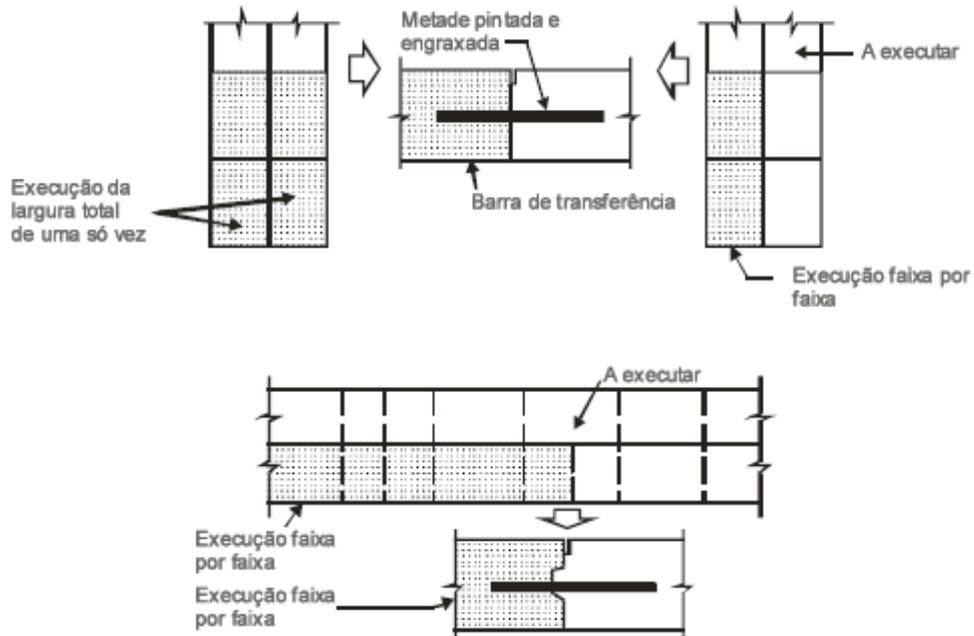
Las recomendaciones para las aberturas son iguales que en las juntas sin pasadores, las recomendaciones para los pasadores se encuentran indicados en la sección 3.2.6.1 de este documento.

### 3.2.5.1.3 Junta transversal de construcción

Empleada cuando el ciclo de trabajo finaliza donde debería haber una junta de retracción o en el caso de imprevistos como fuertes lluvias, problemas con el equipamiento, problemas en el lanzamiento de hormigón antes de alcanzar la junta transversal proyectada (DNIT, 2005).

Deben poseer barras de anclaje y de transferencia de carga para garantizar la transferencia de carga y prevenir traspase de fisuras de una placa a otra adyacente (DNIT, 2005).

**Figura 50** – Esquemas de Junta de construcción planeada (arriba), Junta de construcción de emergencia (abajo)

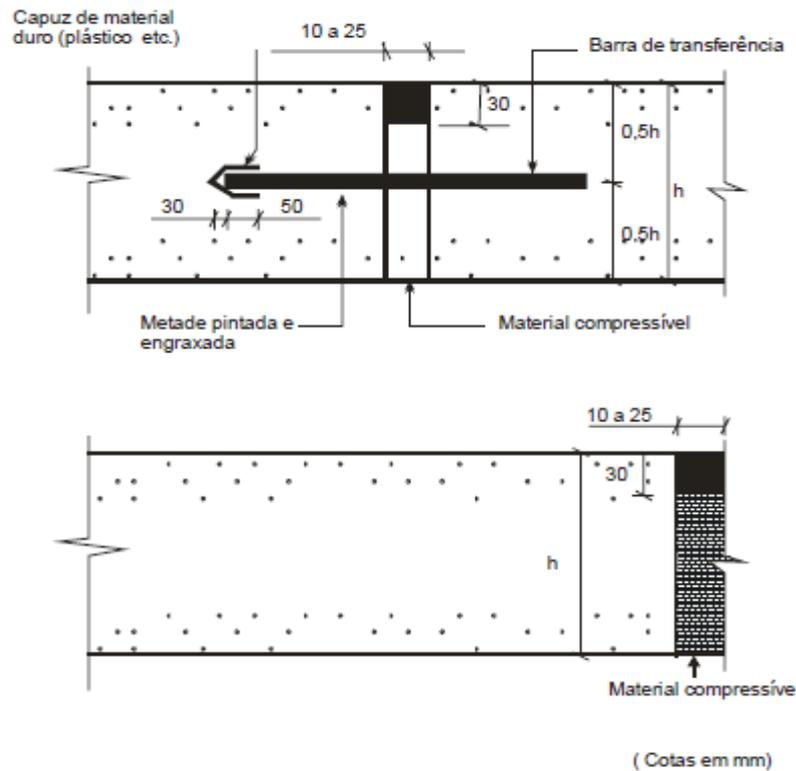


Fuente: DNIT (2005).

#### 3.2.5.1.4 Junta de expansión

Utilizada en cruzamientos asimétricos de vías, encuentro del pavimento con edificios, puentes, u otras estructuras, la abertura de esta junta varía entre 10 y 25 milímetros. Deben recibir sellado adecuado para impedir infiltración. Debe ser empleado un capucho para proveer un espacio libre de aproximadamente 3 centímetros para el movimiento de las barras cuando se dilatan las placas, el material empleado entre las placas debe ser un material compresible (Ej: Isopor) (DNIT, 2005).

**Figura 51** – Junta de expansión con barras de transferencia (arriba) y de encuentro (abajo)



Fuente: DNIT (2005).

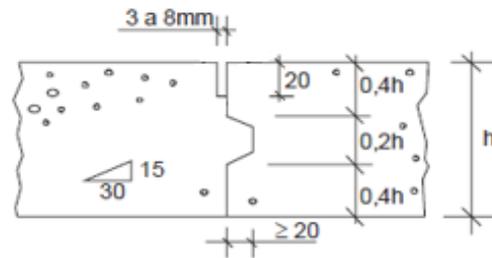
### 3.2.5.2 Juntas Longitudinales

Las juntas longitudinales pueden clasificarse en:

#### 3.2.5.2.1 Juntas longitudinales de articulación

Son empleadas para control de las fisuras longitudinales, la distancia entre juntas longitudinales recomendada entre 3,5 a 3,6 m. La abertura varía entre 3 a 8 mm y la profundidad varía entre  $1/4$  y  $1/6$  del espesor de la placa, pero no menor a 4 cm o al tamaño mayor del agregado empleado Un esquema de las juntas longitudinales de articulación se muestra a continuación (DNIT, 2005).

**Figura 52** – Junta de articulación con encaje tipo macho-hembra



Fuente: DNIT (2005).

### 3.2.5.2.2 Juntas longitudinales de articulación con barras de anclaje

La función de las barras de anclaje es la de prevenir movimientos laterales de los carriles mejorando la transferencia de carga entre las placas mediante el encaje macho-hembra o encastramiento entre agregados (DNIT, 2005).

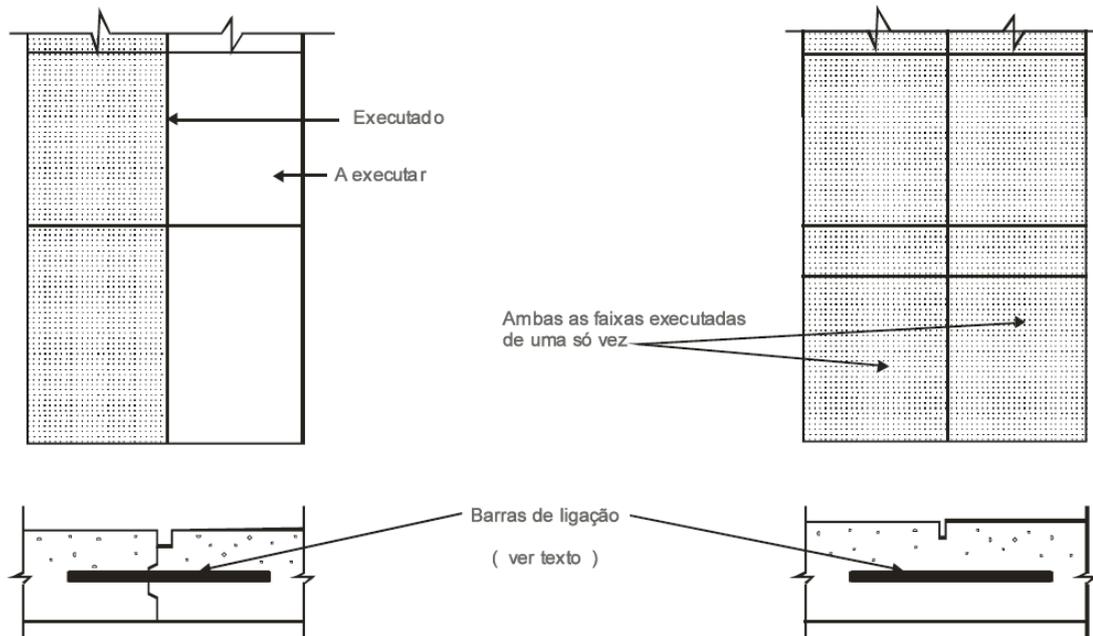
En este caso las barras de anclaje son calculadas para resistir la fuerza de fricción entre la junta considerada y el borde libre más próximo a ella, el cálculo de las barras de anclaje se encuentra indicado en la sección 3.2.6.2 de este documento.

La abertura puede variar entre 3 a 10 mm y la profundidad sigue los criterios que las juntas sin barras de anclaje.

### 3.2.5.2.3 Juntas de construcción

Cuando es posible ejecutar más de un carril por vez la junta de construcción será la misma junta longitudinal de articulación con sección debilitada con barras de anclaje, sin embargo, cuando se ejecutará por faja de tráfico entonces la junta será del tipo encaje macho-hembra con barras de anclaje para posibilitar la transferencia de carga, la imagen a continuación representa la junta de construcción dependiendo del método empleado para construir (DNIT, 2005).

**Figura 53** – Junta de construcción para ejecución por carril (Izquierda) y ejecución total (derecha)



Fuente: DNIT (2005).

### 3.2.5.3 Abertura de Juntas

El espaciamiento de juntas depende de la contracción/ expansión del hormigón, grandes espaciamientos disminuyen la eficiencia de la transferencia de carga, la abertura de las juntas puede ser determinada por medio de la siguiente ecuación (HUANG, 2004):

$$\Delta L = CL(\alpha_t \Delta T + \varepsilon)$$

Donde  $\Delta L$  es la abertura de las juntas, C es el coeficiente de ajuste debido a la fricción generada por la subbase (0,65 para bases estabilizadas y 0,8 para bases granulares), L es el espaciamiento entre juntas (largo de la placa),  $\alpha_t$  es el coeficiente de expansión térmica ( $5$  a  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$  o  $9$  a  $10,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),  $\varepsilon$  es el coeficiente de retracción por secado ( $0.5$  a  $2.5 \times 10^{-4}$ ),  $\Delta T$  es la variación de la temperatura (Temperatura al momento de ejecución menos menor temperatura mensual)

### 3.2.5.4 Sellante en Juntas

El material empleado deberá poseer propiedades definidas como fluidez, periodo de cura, viscosidad, adhesividad, dureza, resistencia a la oxidación, compresibilidad, elasticidad, resistencia a la fisuración y cohesión interna (DNIT, 2005).

**Figura 54** – Factores de forma recomendados para sellante aplicado en el lugar (arriba) y premoldeados (abajo)

Espacio entre Juntas Transversales (m)	Forma del reservatório del Sellador	
	Ancho (mm)	Profundidad mínima (mm)
4,5	3,0	12,7
6,0	6,0	12,7
7,5	10,0	12,7
12,0	12,7	12,7

Espacio entre Juntas Transversales (m)	Apertura de Juntas (mm)	Ancho del Sellante (mm)
7,5 o menor	6,0	14,3
9,0	10,0	20,7
12,0	12,7	25,4

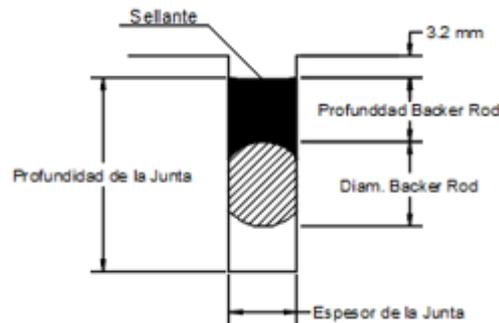
**Fuente:** Adaptado de DNIT (2005).

Puede ser implementado una varilla de respaldo o backer rod para formación del reservatorio del sellante, el cual es necesario para garantizar un mejor comportamiento de este mediante la relación abertura y profundidad (factor de forma), las recomendaciones para los factores de forma se encuentran a continuación (DNIT, 2005):

El diámetro del backer rod cuando empleado será mayor al espesor del reservatorio, el Florida Department of Transportation FDOT proporciona una tabla con valores recomendados para implementación de controlador de profundidad backer rod para juntas hormigón-hormigón (FDOT, 2019):

**Figura 55** – Recomendación Backer Rod (arriba) e implementación (abajo)

CONTROLADOR DE PROFUNDIDAD BACKER ROD (JUNTA CONCRETO - CONCRETO)				
Dimensiones de la junta (mm)				
Ancho de la junta	Espesor de aplicador de sellante	Diámetro Backer ROD	Profundidad mínima de la junta	Profundidad de colocación del Backer Rod
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
6	6	10	25	13
10	6	13	32	13
13	6	16	32	13
16	8	19	38	14
19	10	25	45	16
22	11	29	45	18
25	13	32	50	19
>25	13	32+	50+	19



**Fuente:** Adaptado de FDOT (2005).

### 3.2.6 Barras de Transferencia, Anclaje y Armadura de Retracción

#### 3.2.6.1 Barras de Transferencia

El empleo de pasadores o barras de transferencia de carga en las juntas transversales tiene como objetivo mejorar la transferencia de carga entre placas adyacente. Caso no sean implementados pasadores la transferencia de carga se realizará únicamente por contacto entre agregados en la fisura formada en la junta. La implementación de estas conlleva tensiones menores en la placa en relación con las consideradas en el dimensionamiento, proporcionando un mayor margen de seguridad (DNIT, 2005).

Los pasadores son usualmente barras lisas del tipo CA-25 dispuestos en la mitad del espesor de la placa paralelas al eje longitudinal de la pista y las recomendaciones para su implementación son como siguen (DNIT, 2005):

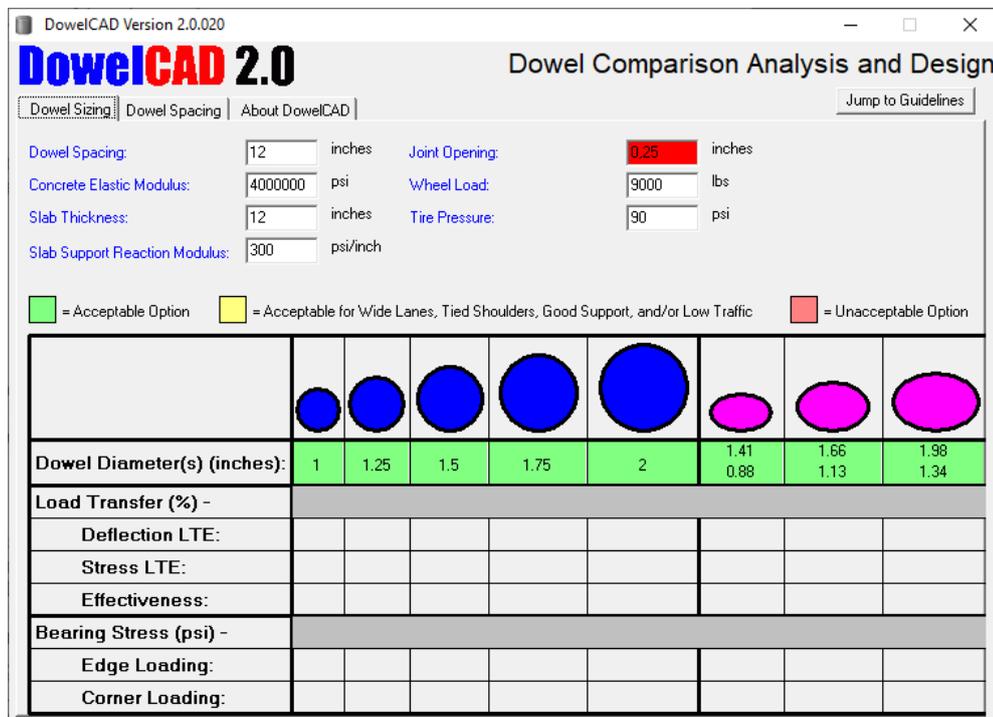
**Figura 56 – Recomendaciones Barras de Transferencia**

Espesor de la placa	Diametro (cm)	Largo (mm)	Espaciado (mm)
Hasta 17,0	20	460	300
17,5 - 22,0	25	460	300
22,5 - 30,0	32	460	300
> 30,0	40	460	300

Fuente: Adaptado de DNIT (2005).

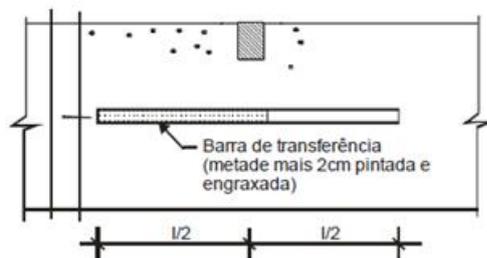
Adicionalmente, el cálculo de los pasadores puede ser empleado mediante el uso del software DowelCAD desarrollado por la ACPA disponible gratuitamente:

**Figura 57 – Captura de pantalla del software DowelCAD**



Fuente: El autor (2021).

**Figura 58 – Junta transversal con pasadores**



Fuente: DNIT (2005).

Las barras de transferencia estarán pintadas y engrasadas para permitir el libre movimiento en la contracción o expansión (DNIT, 2005)

### 3.2.6.2 Barras de Anclaje

La ecuación para cálculo del área de acero necesario para las barras de anclajes es (DNIT, 2005):

$$A_s = \frac{b \times f \times \gamma_c \times h}{100 \times S}$$

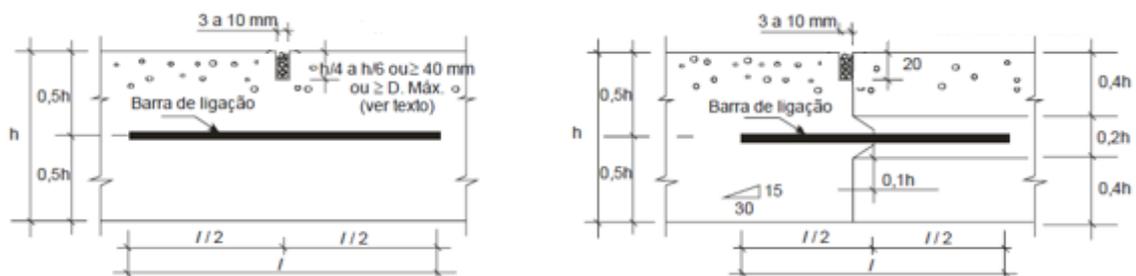
Donde  $A_s$  es el área de acero necesaria por metro de la junta en  $\text{cm}^2/\text{m}$ ,  $b$  es la distancia al borde libre del pavimento,  $f$  es el coeficiente de fricción placa – subrasante (1 a 2,0),  $\gamma_c$  es la masa específica del hormigón,  $h$  es el espesor de la placa,  $S$  es la tensión admisible del acero.

Mientras que la ecuación para cálculo de la longitud de la barra es la siguiente (Huang, 2004):

$$l = \frac{1}{2} \times \frac{S \times d}{t_b} + 7,5$$

Donde  $S$  es la tensión admisible del acero,  $d$  es el diámetro de la barra,  $t_b$  es la tensión de adherencia hormigón-acero.

**Figura 59** – Junta longitudinal con barras de anclaje sección debilitada (izquierda) y encaje tipo macho-hembra (derecha)



Fuente: DNIT (2005).

### 3.2.6.3 Armadura de retracción

Pueden ser implementadas telas soldadas de acero tipo Ca-60 las cuales tienen como objetivo el de combatir las tensiones internas provocadas por la variación volumétrica del hormigón debido a las variaciones de temperatura, unir el hormigón

fisurado y mantener la transferencia de carga por encastre entre agregados. La fórmula para cálculo del área de acero necesario para un hormigón de masa específica de  $24\text{kN/m}^3$  es (DNIT, 2005):

$$A_s = \frac{f \times L \times h}{333}$$

Donde  $f$  es el coeficiente de fricción placa-subrasante,  $L$  es la mayor dimensión de la placa y  $h$  es el espesor de la placa.

Las telas soldadas tipo Q disponibles en el Brasil son:

**Figura 60** – Telas soldadas tipo Q disponibles en Brasil (Acero CA-60)

Designación (CA-60)	Espaciamiento entre varilla (cm)		Diámetro de las varillas (mm)		Sección de las varillas ( $\text{cm}^2/\text{m}$ )		Masa $\text{kg/m}^2$	Rollos		Paneles	
	Long. ET	Trans. ET	Long. DL	Trans. DL	Long. $A_{SL}$	Trans. $A_{ST}$		Comp. (m)	Masa kg	Comp. (m)	Masa kg
Q47	15	15	3,0	3,0	0,47	0,47	0,75	120	222,0		
Q61	15	15	3,4	3,4	0,61	0,61	0,97	230	285,1		
Q75	15	15	3,8	3,8	0,75	0,75	1,21	120	356,1		
Q92	15	15	4,2	4,2	0,92	0,92	1,48	60	217,5		
Q113	10	10	3,8	3,8	1,13	1,13	1,80	60	264,4		
Q138	10	10	4,2	4,2	1,38	1,38	2,20	60	323,0	6	32,3
Q159	10	10	4,5	4,5	1,59	1,59	2,52			6	37,1
Q196	10	10	5,0	5,0	1,96	1,96	3,11			6	48,8
Q246	10	10	5,6	5,6	2,46	2,46	3,91			6	57,4
Q283	10	10	6,0	6,0	2,83	2,83	4,48			6	65,9
Q335	15	15	8,0	8,0	3,35	3,35	5,37			6	78,9
Q396	10	10	7,1	7,1	3,96	3,96	6,28			6	92,3
Q503	10	10	8,0	8,0	5,03	5,03	7,97			6	117,2
Q636	10	10	9,0	9,0	6,36	6,36	10,09			6	148,3
Q785	10	10	10,0	10,0	7,85	7,85	12,46			6	183,2

Nota: Se corrigió el espaciamiento d la tela Q335 de 10 cm para 15 cm conforme diámetros comerciales en Brasil

**Fuente:** DNIT (2005).

### 3.3 MANIFESTACIONES PATOLÓGICAS E IRREGULARIDADES EN PAVIMENTOS

Según Delatte (2014) desempeño estructural del pavimento no es tan perceptible al usuario en comparación al desempeño funcional, es decir, la suavidad y resistencia al deslizamiento. Usualmente las irregularidades surgen con el tiempo consecuencia de la aplicación de esfuerzos y condiciones climáticas y su temprana aparición puede deberse a materiales de baja calidad, malas prácticas constructivas o defectos en el diseño.

Además de lo descrito arriba, la ausencia de un mantenimiento de rutina es causante de defectos en pavimentos rígidos (DNIT, 2010).

Defectos localizados consecuentes de deficiencia en el proyecto o de la fatiga del hormigón son más frecuentes en vez de degradación uniforme en pavimentos rígidos (DNIT, 2010).

La DNIT (2004) define a los defectos como anomalías observadas en el pavimento causados por problemas en la fundación, mala ejecución o consecuentes del uso.

Deficiencia en la capacidad de soporte de la fundación, drenaje mal proyectado o ejecutado, ejecución deficiente o falta de mantenimiento del material sellante de las juntas y exceso de carga de vehículos comerciales son los principales factores que causan degradación en un pavimento rígido (DNIT, 2010).

Según DNIT (2004) los defectos que se presentan en pavimentos rígidos son: Levantamiento de placas, fisuras de esquina, placa dividida, escalonamiento en las juntas, falla en el sellante de las juntas, desnivel calzada-banquina, fisuras lineares, grandes o pequeñas reparaciones, desgaste superficial, bombeo, quiebras localizadas, pasos de nivel, fisuras superficiales (tipo malla), fisuras de retracción plástica, quiebres en las esquinas, desportillamiento en los bordes de las juntas, placa saltarina, asentamiento y baches o agujeros.

### 3.3.1 Levantamiento de Placas

Cuando ocurre una sobreelevación abrupta de las placas en juntas o fisuras transversales y eventualmente en la proximidad de canaletas de drenaje y obstáculos fijos (DNIT, 2010).

También denominado *blow up* en la literatura tradicional, era un defecto común en locales de frenado de vehículos pesados en pavimentos que empleaban dos capas de hormigón para la placa (BALBO, 2009).

Son ocasionadas debido a esfuerzos de compresión elevados entre placas con escasa libertad de expansión bastante solicitadas por esfuerzos horizontales (BALBO, 2009).

El Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica (DIRCAIBEA) (2002) establece como causas posibles las variaciones térmicas excesivas sumadas a la falta de juntas de expansión, a una transferencia de cargas deficiente debido a una mala colocación de barras de elementos para tal fin, o a la presencia de suelos expansivos a poca profundidad.

**Figura 61** – Levantamiento de Placas



**Fuente:** BALBO (2009).

### 3.3.2 Grietas de Esquina

Es la grieta que intercepta a las juntas a una distancia máxima de 1,8 m de los bordes o juntas del pavimento (longitudinal y transversal) midiendo desde su esquina (DNIT, 2010).

Ocurren en forma de semicírculo y afecta al espesor total de la placa, cuando afecta a todas las placas contiguas por su forma recibe la denominación de *diamond cracking* (BALBO, 2009).

Están asociadas a la fatiga del hormigón en la región o a un espesor insuficiente de la placa frente a los esfuerzos generados por el tránsito real (BALBO, 2009).

**Figura 62** – Grietas de Esquina



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.3 Placa Dividida

Cuando la placa presenta fisuras o grietas que la divide en cuatro o más partes (DNIT, 2010). Entre tanto, Balbo (2009) considera como partición de placa a aquella

que se encuentre dividida en tres o más partes, o que un área de ella este subdividida en pedazos.

Está asociado a un surgimiento previo de fisuras longitudinales y transversales (BALBO, 2010).

La causa de este defecto está relacionada con las causas que originan a las fisuras, por lo tanto, puede ser consecuencia de anomalías como deficiencia en el soporte de la fundación, tamaño de espesor de pavimento insuficiente o fatiga del hormigón (DNIT, 2010).

**Figura 63** – Placa Dividida



**Fuente:** DNIT (2004).

#### 3.3.4 Escalonamiento de Juntas

Causado por desplazamientos verticales diferenciales permanentes entre placas adyacentes, este defecto reduce la seguridad y provoca incomodidad al transitar, además afecta a la vida útil del pavimento (DNIT, 2010).

El escalón generado por estas placas sucesivas desniveladas genera bastante inconveniente al desplazamiento de vehículos (BALBO, 2009).

Según Balbo (2009) es consecuencia de la disminución del soporte de la fundación de la losa y del asentamiento diferencial entre dos placas, puede además manifestarse en grietas. Además, la DIRCAIBEA (2002) menciona al drenaje insuficiente y deficiencia en traspaso de cargas como causas posibles.

La ausencia de dispositivos de transferencia de carga en las juntas como barras de transferencia o encaje tipo macho-hembra

**Figura 64** – Escalonamiento de Juntas



**Fuente:** BALBO (2009).

### 3.3.5 Deficiencias en el Sellado de las Juntas

Según DNIT (2010) es cualquier avería en el sellante que posibilite la acumulación de material incompresible en la junta o permita infiltración de agua.

La DNIT (2010) cita como principales fallas a las siguientes:

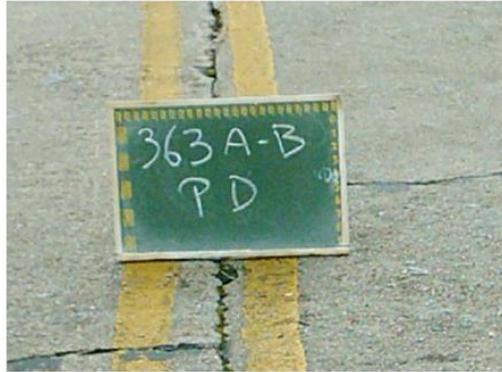
- Mala calidad del material;
- Material inadecuado;
- Rompimiento, por tracción o compresión;
- Crecimiento de vegetación;
- Endurecimiento (oxidación) del material;
- Pérdida de adherencia a las placas de hormigón;
- Cantidad deficiente de sellante.

Según Balbo (2009) este defecto está normalmente relacionado al clima, es decir, efectos de humedad, calor y secado de los elementos sellantes.

Para DIRCAIBEA (2002) entre las posibles causas de algunas deficiencias arriba citadas están:

- Endurecimiento: envejecimiento o producto de mala calidad;
- Pérdida de adherencia a las placas de hormigón: mala ejecución de sellado, caja mal diseñada o producto de mala calidad.

**Figura 65** – Falla en el sellante de la Junta



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.6 Desnivel Calzada-Banquina

Es el escalón formado entre la banquina y el borde de la calzada, acompañada de una separación del borde (DNIT, 2010).

Muchas veces se trata de un defecto constructivo como consecuencia de la falla en el nivelado entre las pistas y la banquina. Puede ocurrir también entre carriles debido a asentamientos diferenciales por pérdida de soporte de la fundación (BALBO, 2009).

**Figura 66** – Desnivel Calzada-Banquina



**Fuente:** BALBO (2009).

### 3.3.7 Grietas Lineares

Estas fisuras afectan por completo la placa de hormigón, dividiéndola en dos o tres partes, caso esté dividida en más partes se denomina placada dividida al defecto (DNIT, 2010).

Según la DNIT (2010) las grietas pueden ser:

- Transversales: cuando ocurren en dirección del ancho de la losa y perpendicular al eje longitudinal del pavimento.
- Longitudinales: caso ocurran paralelamente al eje longitudinal y en la dirección del largo de la placa.
- Diagonales: son fisuras inclinadas que interceptan las juntas del pavimento a una distancia mayor que la mitad del largo de esas juntas.

**Figura 67** – Grietas Diagonales



**Fuente:** BALBO (2009).

#### *3.3.7.1 Grietas Transversales*

Se posicionan más al centro de las losas y pueden ser causadas por fatiga del hormigón a largo plazo, baja resistencia del hormigón, espesor menor al requerido, losas de longitud excesiva. Cuando posicionadas próximas a las juntas transversales son resultado de la retracción por atraso del serrado de la junta o serrado de profundidad insuficiente (BALBO, 2009).

**Figura 68** – Grietas Transversales



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.7.2 Grietas Longitudinales

Son fisuras asociadas a la fatiga del hormigón y entre sus causas está el atraso en serrado de la junta o serrado de profundidad insuficiente (BALBO, 2009).

Además, pueden ser causantes de estas grietas el asentamiento de la base y/o subrasante, ancho excesivo de la losa (DIRCAIBEA, 2002).

**Figura 69** – Grietas Longitudinales



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.8 Grandes o Pequeñas Reparaciones

Los reparos ejecutados en el pavimento pueden dividirse según el área del pavimento que fue removida y posteriormente llenada con material de relleno siendo denominados pequeños reparos a aquellos que dicha área sea menor o igual a 0,45 metros cuadrados y grandes a los que sean superior a ese valor (DNIT, 2010).

Los reparos o remiendos son correcciones de defectos preexistentes, no obstante, su incorrecta ejecución puede presentar inconvenientes como fisuras o hundimiento resultando en incomodidad al usuario y perjudicando la calidad de rodadura (BALBO, 2009).

**Figura 70** – Grandes y Pequeñas reparaciones (izquierda y derecha respectivamente).



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.9 Desgaste Superficial

El desgaste superficial está caracterizado por el afloramiento de los agregados gruesos en la superficie de pavimento debido a la remoción de la argamasa superficial, con el tiempo estos agregados también quedarán con la superficie pulida (DNIT, 2010).

Según DNIT (2010) el desgaste superficial del pavimento puede ser causado por el empleo de hormigón de baja calidad, agregados sucios o con polvo, cantidad excesiva de agua en la mezcla, deficiencia de finos en la mezcla que implica en hormigón con exudación elevada o despegue de la argamasa de recubrimiento causado por acumulo de agua después del acabado.

Este defecto causa incomodidad al usuario y puede causar baches en el pavimento conforme evolución (DNIT, 2010).

**Figura 71 – Desgaste Superficial**



**Fuente:** BALBO (2009).

### 3.3.10 Bombeo

El bombeo o surgencia de finos se da cuando finos plásticos existentes en la fundación del pavimento son expulsados en forma de barro fluido a través de las juntas o grietas cuando pasan los vehículos. Este proceso puede ser identificado por la aparición de manchas terrosas en las juntas, grietas o bordes (DNIT, 2010).

La ejecución inadecuada de la subbase o la ausencia de esta, bien como la ausencia de tela plástica entre la misma y la placa influyen en la aparición de bombeo (DNIT, 2010).

La intrusión de finos plásticos en las juntas tiene como consecuencia el ablandamiento de la fundación y posterior descalce de las placas, aumentando así la tensión de tracción en el pavimento a niveles superiores para lo que fue proyectado, por lo que se acelera el proceso de fatiga pudiendo llegar a la ruptura (DNIT, 2010).

**Figura 72 – Bombeo de Finos**



**Fuente:** BALBO (2009).

### 3.3.11 Quiebres Localizados

Son áreas de la losa que se encuentran agrietadas y partidas, de forma variada y se sitúan generalmente entre una grieta y una junta o entre dos grietas próximas entre si (DNIT, 2010).

**Figura 73** – Quiebres Localizados



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.12 Pasos a Nivel

Son los defectos que comúnmente suceden en pasos a nivel tales como elevaciones o depresiones próximas a los rieles. Su causa se debe a fallas en el proyecto o ejecución deficiente (DNIT, 2010).

### 3.3.13 Fisuras Superficiales (tipo malla) y Descascaramiento

Son fisuras capilares, superficiales de profundidad de entre 6 mm y 13 mm con tendencia a interceptarse formando ángulos de  $120^\circ$  entre sí (DNIT, 2010).

Según la DNIT (2010) el descascaramiento se caracteriza por el despegue de la capa superficial fisurada, puede también ser proveniente de otros defectos como desgaste superficial.

**Figura 74 – Fisuras Superficiales**



**Fuente:** DNIT (2004).

#### 3.3.14 Fisuras por Retracción Plástica

Fisuras de incidencia aleatoria, superficiales poco profundas, de pequeña abertura (inferior a 0,5 mm) y de longitud limitada que forman ángulos de entre 45° y 60° en relación con el mayor eje longitudinal de la placa (DNIT, 2010).

Son fisuras pequeñas y conectadas entre sobre la superficie de la placa y son consecuencias de fallas de construcción (BALBO, 2009).

Tiene como origen la retracción plástica que ocurre en el hormigón previo al inicio del fraguado, se forma sin necesidad de energía puesto que el hormigón aún no posee resistencia (DNIT, 2010).

**Figura 75 – Fisuras por retracción plástica**



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.15 Desportillamientos o Quebres en las Esquinas

Los desportillamientos en las esquinas poseen forma de cuña y ocurren en una distancia inferior a 60 cm de la esquina, su diferencia en relación con las fisuras o grietas de esquina recae en el ángulo que intercepta a la junta (en forma de cuña) mientras que las fisuras de esquina son verticales en todo el espesor de la placa (DNIT, 2010).

Puede ocurrir debido a la baja resistencia del hormigón o a la retirada brusca de las formas o por tránsito de vehículos con peso superior para el cual fue proyectada la vía (DNIT, 2010).

**Figura 76** – Quebres en las esquinas



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.16 Desportillamiento en los Bordes de las Juntas

El desportillamiento en las juntas no afecta a la placa en todo su espesor y posee una longitud de máximo 60 cm, el quiebre ocurre en forma de cuña en las juntas. (DNIT, 2010).

Este defecto está fuertemente relacionado a la acción del tráfico en proximidades de las juntas, más aún cuando se realiza corte en estado fresco, que puede propiciar la aparición de pequeños quiebres que pueden agravarse. La ausencia de agregados resistentes o el exceso de argamasa también influyen (BALBO, 2009).

Además de la remoción precipitada de las formas o el serrado prematuro del hormigón cuando aún no posee la resistencia adecuada, el desportillamiento puede también ser causado por la infiltración de materiales incompresibles en la junta que

presenta deficiencias en el sellado cuando esta está contraída que posteriormente irán comprimir los bordes de la junta cuando esta se dilate (DNIT, 2010).

**Figura 77** – Desportillamiento en las juntas



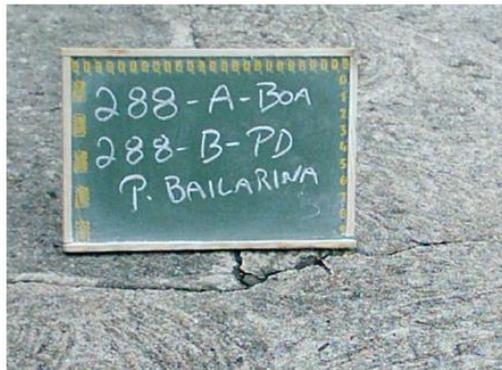
**Fuente:** BALBO (2009).

### 3.3.17 Placa Saltarina

La placa cuyo movimiento vertical es visible bajo la acción del tráfico y principalmente en la región de las juntas recibe el nombre de placa bailarina o placa saltarina (DNIT, 2010).

La pérdida de soporte de la fundación, sumado a juntas ineficientes y al tráfico pesado son causantes de las placas saltarina. Este tipo defecto facilita el bombeo de finos y puede evolucionar con el tiempo provocando la aparición de fisuras y grietas en la placa (DNIT, 2010).

**Figura 78** – Placa Saltarina



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.18 Asentamiento

Ondulaciones superficiales de gran extensión provocadas por el hundimiento del pavimento, puede ocurrir que el pavimento permanezca íntegro (DNIT, 2010).

Un proyecto de subbase ineficiente o una mala ejecución de esta, bien como una deficiencia desigual soporte de la fundación pueden provocar el surgimiento de este defecto (DNIT, 2010).

**Figura 79** – Asentamiento



**Fuente:** DNIT (2004).

### 3.3.19 Baches o Agujeros.

Los baches son provocados por la pérdida del hormigón en el local de forma cóncava con relación a la superficie y de área y profundidad bien definida (DNIT, 2004).

Consisten en cavidades de diámetros que varían entre 25 mm y 100 mm y profundidades superiores a 15 mm (DIRCAIBEA, 2002).

Resultan de evolución de otros defectos, como la desagregación de fisuras o partición de hormigón en pequeñas piezas, además asentamientos debido a fundaciones o capas inferiores inestables, defectos constructivos y la acción de los vehículos (BALBO, 2009).

**Figura 80** – Bache



**Fuente:** BALBO (2009).

### 3.4 INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

El control de los defectos y el acompañamiento de su evolución con los mantenimientos y reparos necesarios para mantener la condición estructural es fundamental para garantizar el funcionamiento satisfactorio del pavimento (DNIT, 2010).

Debe ser efectuado un levantamiento del histórico de un pavimento previo a la inspección de este de manera a obtener el mayor número de informaciones sobre el proyecto, ejecución, operación, reparos y restauraciones de este (DNIT, 2010).

Conforme el manual de recuperación de pavimentos de la DNIT (2010) las principales informaciones a ser levantadas son:

- Espesor medio de las placas de la pista y de la banquina;
- Material y espesor de la subbase;
- Resistencia característica a la tracción en flexión ( $f_{ctM,k}$ ) del hormigón del pavimento (pista y banquina) definida en el proyecto;
- Fecha de inicio de servicio (entrega al tráfico);
- Fecha de recuperaciones anteriores realizadas en partes del pavimento;
- Evolución de tráfico de vehículos comerciales desde la construcción hasta la determinación de la ICP.

Balbo (2009) menciona que la evaluación de pavimentos puede ser destructiva o no destructiva, de los cuales un ejemplo de evaluación destructiva consiste en la extracción de cuerpos de prueba por sondaje rotativo, tras la extracción de la muestra se somete a ensayos en laboratorio para determinar entre otras cosas resistencia a la

compresión, módulo de elasticidad, etc. En el caso de evaluación no destructiva puede servir para identificar y evaluar las capas en el pavimento o bien para conocer la capacidad de soporte del pavimento por medio de prueba de carga.

En pavimentos rígidos determinar la respuesta estructural, los valores de la eficiencia de carga en juntas y el módulo de reacción de la subrasante en centros de placas y juntas es lo más importante para proceder a la evaluación. La identificación de la variabilidad del espesor realizada por georradar es un factor menos crítico (BALBO, 2009).

### 3.4.1 Índice de Irregularidad Internacional (IRI)

El International roughness index (IRI) fue desarrollado por el Banco Mundial como medida de regularidad superficial, (Delatte, 2014). Consiste en la relación del movimiento acumulado de la suspensión con la distancia recorrida obtenida de un modelo matemático de un cuarto de coche estándar que atraviesa un perfil medido a una velocidad de 80 km/h y se expresa en metros/kilómetros (Huang, 2004 apud Delatte, 2014).

El sumatorio de los desvíos de la superficie de un pavimento en relación con un plano de referencia ideal de proyecto geométrico que afecta la dinámica de los vehículos, el efecto dinámico de las cargas, calidad de rodadura y drenaje superficial de la vía se denomina irregularidad longitudinal (DNIT, 2011).

La irregularidad longitudinal afecta negativamente la calidad de rodadura y aumenta los costos operacionales de los vehículos debido al desgaste y el tiempo de transporte.

El concepto asociado a cada valor de IRI se encuentra a continuación:

**Figura 81** – Interpretación de la Irregularidad Longitudinal

<b>Irregularidad Superficial</b>	<b>Concepto</b>
$IRI \leq 2,7$	Bueno
$2,7 < IRI \leq 3,5$	Regular
$3,5 < IRI \leq 5,5$	Malo
$IRI > 5,5$	Pésimo

**Fuente:** DNIT (2011)

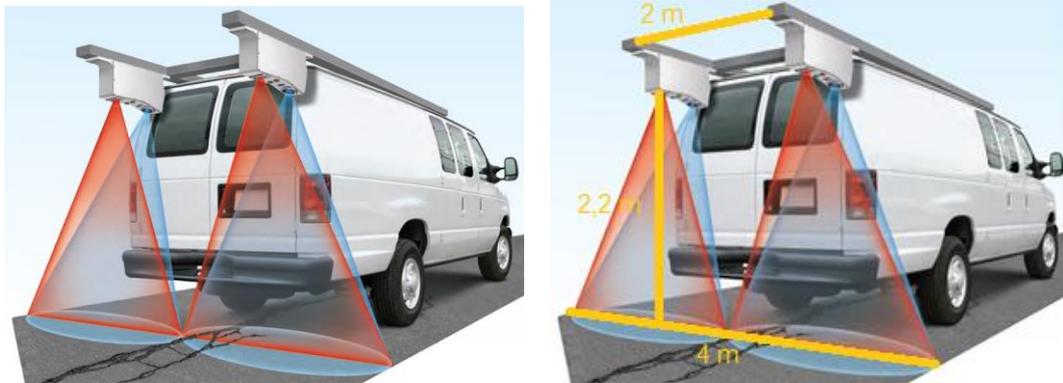
La medición del IRI se efectúa paralela al eje de la carretera usualmente coincidente con las regiones de huella de ruedas (DNIT, 2011).

Uno de los primeros equipamientos empleados para medir fue el perfilografo del Departamento de Transporte de Illinois en Estados Unidos de América en la década de 1920, este valor puede ser levantado con medidas topográficas o por equipamientos medidores del perfil longitudinal con o sin contacto (DNIT, 2011).

El IRI puede ser medido también por medio de un equipamiento fijado sobre un vehículo conocido como Pavement Scanner (Scanner de Pavimento) compuesto por dos laser 3D de alto desempeño (uno en cada lado del vehículo) el cual mide el perfil longitudinal a través de la integración de una señal vertical (acelerómetro) para medir el desplazamiento vertical entre el vehículo y el perfil de la ruta descontando las variaciones de distancia entre el vehículo y la ruta medidas directamente por los sensores 3D para remover las variaciones en el perfil longitudinal causadas por la suspensión del vehículo cuando este pasa por baches en la carretera. Este equipamiento utiliza para el cálculo del IRI dos perfiles longitudinales, siendo uno por cada huella de rueda, mediante los puntos 3D y aceleraciones verticales. Este equipamiento requiere que los sensores 3D y la unidad de medición inercial (IMU), compuestas por tres ejes acelerómetros y giroscopios con su eje vertical alineado al mismo plano que los láseres del sensor 3D, estén sincronizados para garantizar precisión del proceso (SCABELLO, 2018).

El equipamiento cuenta con una altura nominal de 2,2 m por encima de la superficie del pavimento, los sensores están ubicados a una distancia de 2 metros entre sí y la línea proyectada por el láser presenta 2 metros de largo y cerca de 1 milímetro de ancho permitiendo la obtención de imágenes en un largo de pista máximo de 4 m (SCABELLO, 2018).

**Figura 82** – Equipamiento Pavement Scanner (Izquierda) y Disposición y alcance de los sensores a laser del Pavement Scanner (Derecha)

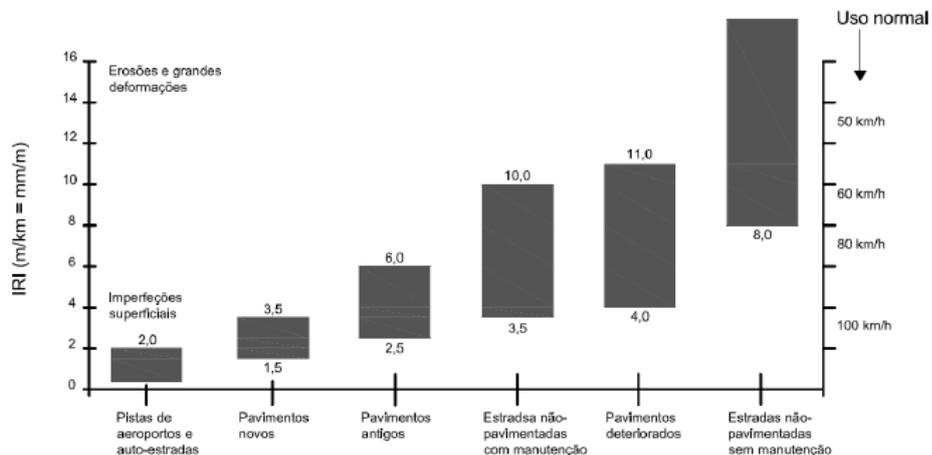


**Fuente:** DNIT (2017)

Khazampvich et al. (1998) apud Delatte (2014) indican que la mejor manera de obtener un pavimento suave es construirlo de esa manera puesto que el IRI inicial u el IRI a lo largo del tiempo están correlacionados. Facilitan la construcción de un pavimento más liso una subbase estabilizada, precauciones relacionadas con el uso de barras de transferencia previniendo así falla en la junta, implementación de altos porcentajes de acero en pavimentos de hormigón armado.

Los pavimentos poseen un rango de IRI dependiendo del estado en el que se encuentren (nuevos, viejos, deteriorados) o su propósito (autopistas, sin pavimentación) o su mantenimiento (con y sin mantenimiento). Además, el IRI condiciona la velocidad de uso normal y también puede indicar el estado superficial, estos valores y correlaciones pueden apreciarse en la imagen a continuación:

**Figura 83** – Rangos de variación del IRI



**Fuente:** DNIT (2011)

### 3.4.2 Índice de Condición del Pavimento (ICP)

El índice de condición de pavimentos (ICP) que fue desarrollado por la *U. S. Army Corps of Engineers* (USACE) en 1982 es uno de los índices más consistentes para la evaluación de la integridad funcional y estructural de pavimentos de hormigón y se determina en base a inspecciones visuales de los defectos presentes en la superficie y posterior evaluación de estos (BALBO, 2009).

Como tarea inicial para determinación del ICP es necesario realizar una criteriosa inspección visual en el pavimento (extensión total o parcial) identificando los defectos o anomalías presentes en el pavimento asociadas a las informaciones obtenidas en el levantamiento inicial de datos (DNIT, 2010).

Las normas asociadas son DNIT 062/2004 – PRO "Pavimento Rígido – Avaliação objetiva – Procedimento" y DNIT 060/2004 – PRO "Pavimento Rígido – Inspeção visual – Procedimento".

#### 3.4.2.1 Definición de Trecho para Inspeccionar

La DNIT (2010) recomienda la inspección en la extensión total de pavimentos a aquellos de pequeña extensión o caso estén destinados para fines específicos como peajes debido al tiempo y cantidad de personal disponible que supone.

Caso la inspección tenga por objetivo la recopilación de datos para la implementación y ejecución de proyectos de recuperación es necesario realizar un levantamiento exacto de la cantidad, tipo y extensión de defectos existentes (DNIT, 2010).

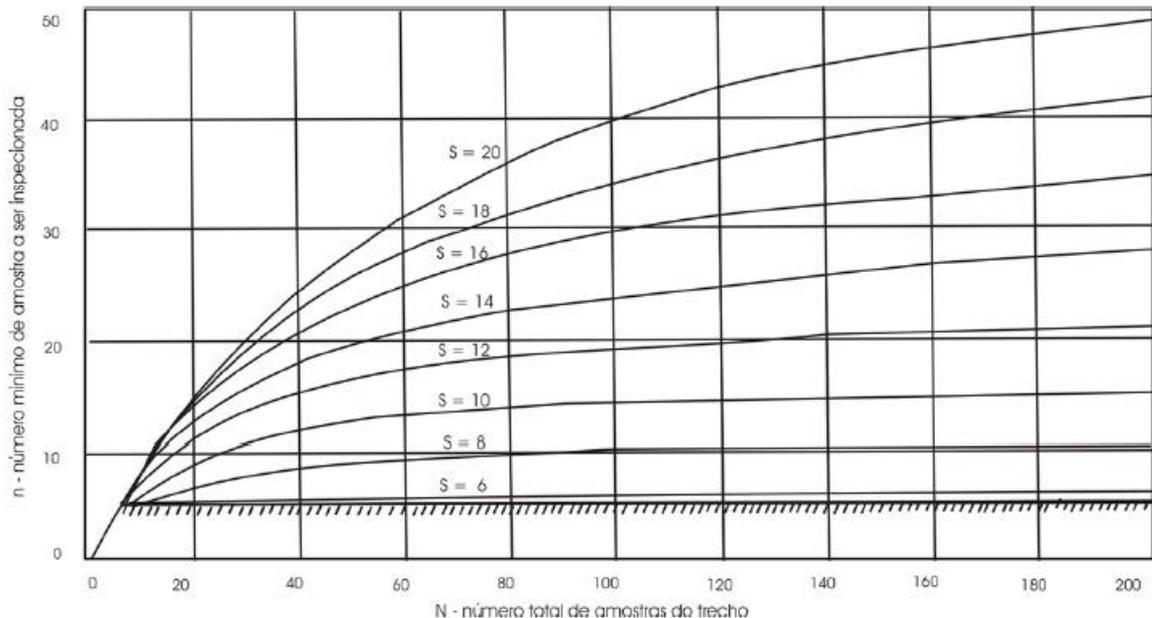
La inspección parcial del pavimento se caracteriza por una mayor economía y rapidez, para su ejecución debe determinarse el número mínimo de muestras para que la inspección obtenga el grado de confiabilidad necesario (DNIT, 2010).

Según DNIT (2010) para garantizar un 95% de confiabilidad de que el margen de error en la evaluación se encuentre dentro de lo admisible es posible obtener el número de muestras a ser inspeccionadas ( $n$ ) en función del total de muestras ( $N$ ), del error admisible ( $\pm e$ ) y de la desviación estándar ( $S$ ) de la media de resultados individuales del índice de ICP utilizando la ecuación a seguir:

$$n = \frac{NS^2}{\frac{e^2}{4}(N - 1) + S^2}$$

Según DNIT (2010) también es posible obtener el número de muestras ( $n$ ) a ser inspeccionadas para un desvío ( $e$ ) de  $\pm 5$  conociendo el total de muestras y la desviación estándar (valores entre 8 y 14, siendo 10 el recomendado) a partir de curvas del siguiente gráfico:

**Figura 84** – Determinación del número mínimo de muestras ( $n$ ) ( $e=\pm 5$ )



**Fuente:** DNIT (2004)

El número de muestras debe ser mayor o igual a cinco y debe garantizarse una selección aleatoria de las mismas, para un total de muestras en el trecho superior a 10 la representatividad de las muestras se puede dar siguiendo un procedimiento denominado “Muestreo Sistemático” que consiste en encontrar el intervalo entre las muestras al dividir el número total de muestras ( $N$ ) por el número de muestras que deben ser evaluadas ( $n$ ), el valor encontrado debe ser redondeado al número entero inmediatamente anterior obteniendo así el valor de espaciado entre muestras ( $i$ ), por este medio se obtiene un intervalo  $[1, i]$  dentro del cual será aleatoriamente seleccionada la muestra inicial, las demás muestras serán seleccionadas al adicionar sucesivamente el valor del intervalo previamente calculado (DNIT, 2004).

### 3.4.2.2 Levantamiento de Defectos

Previo a la ejecución del levantamiento de los defectos, algunas medidas preliminares deben ser tomadas en cuenta tales como el reconocimiento del lugar,

planeamiento de la inspección con cronogramas de trabajo, equipos para la misma y materiales necesarios, además, deben ser contactadas las autoridades para garantizar la seguridad de los equipos y menor interferencia posible del libre tránsito (DNIT, 2010).

Seguidamente se realiza la inspección de forma a obtener los tipos de defectos, grados de severidad y el número de placas afectadas por cada tipo de defecto (DNIT, 2010).

En la inspección defectos son clasificados de acuerdo con el grado de severidad en alto, medio o bajo. Los criterios que tomar en cuenta para determinación del grado de severidad pueden verse en la tabla a continuación:

**Tabla 2 – Defectos considerados para cálculo del Índice de Condición de Pavimentos (ICP).**

<b>Nº</b>	<b>Defecto</b>	<b>Nivel de Severidad</b>	<b>Descripción de las condiciones y estándares del defecto</b>	<b>Conteo de los Defectos</b>
1	Levantamiento de Placa (Blow-Up)	Bajo (B)	El defecto causa bajo desconfort al transitar.	Si ocurre en fisura, se cuenta una placa Si se localiza en junta afectando dos placas, ambas placas deben ser contadas
		Medio (M)	El defecto causa un desconfort medio al transitar, no se perjudica el tráfico.	
		Alto (A)	La seguridad se ve comprometida, interrupciones en el flujo del tráfico, necesidad urgente de reparo.	
2	Grietas de Esquina	Bajo (B)	El área comprendida entre la fisura de esquina y la junta no está fisurada.	Se cuenta una placa cuando esta posee: - Una única fisura de esquina; - Más de una fisura de igual nivel de severidad; - Dos o más fisuras de diferente grado de severidad (se cuenta el mayor grado).
		Medio (M)	El área comprendida entre la fisura de esquina y la junta presenta como máximo dos fisuras.	
		Alto (A)	Hay más de dos fisuras entre la junta y la fisura de esquina.	
3	Placa Dividida	Bajo (B)	Placa dividida en menos de cuatro pedazos, cuatro a 8 pedazos con fisuras leves.	Cuando la placa tiene un grado de severidad de este defecto medio o alto no se debe registrar ningún otro defecto.
		Medio (M)	Placa dividida en más de 8 pedazos con fisuras no tan severas, entre 4 a 8 con fisuras de severidad media o entre 4 a 5 con fisuras de alta severidad.	
		Alto (A)	Placa dividida en más de 8 pedazos con fisuras de severidad media, o en más de 6 pedazos con fisuras de severidad alta.	
4	Escalonamiento de Juntas	Bajo (B)	Desnivel entre 3 a 10 milímetros.	Se cuenta una única placa cuando el defecto tiene lugar en una junta. No se considera desnivel en fisura para este defecto.
		Medio (M)	Desnivel entre 10 y 20 milímetros.	
		Alto (A)	Desnivel mayor a 20 milímetros.	

5	Deficiencias en el sellado de juntas	Bajo (B)	Buen estado y desempeño del sellante, mínimo de defectos en áreas localizadas.	Se tiene en cuenta para el conteo la relación entre las condiciones generales del sellante y del área global considerada.
		Medio (M)	Condición del sellante razonable, uno o más defectos ocurriendo en grado moderado.	
		Alto (A)	Sellante en malas condiciones, necesita sustitución inmediata.	
6	Desnivel Calzada-Banquina	Bajo (B)	Desnivel entre 25 a 50 milímetros.	El desnivel esta caracterizado por la media entre el mayor y menor valor observado en una misma placa, se debe registrar cada placa separadamente con su respectivo nivel de severidad.
		Medio (M)	Desnivel entre 50 y 100 milímetros.	
		Alto (A)	Desnivel mayor a 100 milímetros.	
7	Grietas Lineares	Bajo (B)	Fisuras sin tratamiento con ancho inferior a 12 mm, o fisuras con cualquier abertura que hayan recibido tratamiento y estén en buenas condiciones. Sin escalones.	Las fisuras de alto y medio grado de severidad son consideradas defectos estructurales. El número de defectos depende del grado de severidad de este defecto, dos fisuras de grado medio implican en alto grado de severidad.
		Medio (M)	Aquellas con abertura entre 12 y 50 mm con escalones menores a 10 mm, y fisuras con tratamiento de cualquier abertura y escalones menores a 10 mm.	
		Alto (A)	Fisuras sin tratamiento con abertura superior a 50 mm, fisuras que presenten escalones de más de 10 mm con o sin tratamiento.	
8	Grandes Reparaciones (Área > 0,45 m <sup>2</sup> )	Bajo (B)	Reparo con buen desempeño, poco o nada deteriorado.	Cuando haya más de un reparo se considera el de mayor nivel de severidad, cuando sean iguales los grados de severidad debe ser considerado apenas un reparo. Si la causa del reparo es más grave, es anotado únicamente el defecto original.
		Medio (M)	Reparo parcialmente deteriorado o con fragmentación o quiebre en los bordes, puede removerse el material con esfuerzo.	
		Alto (A)	Reparo deteriorado y necesidad de sustitución inmediata.	
9	Pequeñas Reparaciones (Área ≤ 0,45 m <sup>2</sup> )	Bajo (B)	Reparo con buen desempeño, poco o nada deteriorado.	Cuando haya más de un reparo se considera el de mayor nivel de severidad, cuando sean iguales los grados de severidad debe ser considerado apenas un reparo. Si es más grave el defecto que causo el reparo, es anotado el defecto original
		Medio (M)	Reparo parcialmente deteriorado pudiendo, con esfuerzo ser removido.	
		Alto (A)	Reparo deteriorado y necesidad de sustitución inmediata.	

10	Desgaste Superficial	No hay grados de severidad definidos, sin embargo, el defecto deberá ser anotado.		Se anota cada placa que presente este defecto.
11	Bombeo	No hay grados de severidad definidos, sin embargo, el defecto deberá ser anotado.		Cuando ocurre en una junta, se consideran ambas placas; Si las demás juntas de esas placas presentan bombeo, serán anotadas también las placas contiguas.
12	Quiebres localizados	Bajo (B)	Placa dividida en 2 a 5 pedazos con fisuras de baja severidad, placa dividida en 2 a 3 pedazos con fisuras de severidad media.	Si en la placa hay más de un área afectada por este tipo de defecto, será considerado el área con mayor nivel de severidad.
		Medio (M)	Placa dividida en más de 5 pedazos por fisuras de baja severidad, dividida en 4 a 5 pedazos por fisuras de media severidad, dividida en 2 a 3 pedazos con fisuras de alta severidad.	
		Alto (A)	Dividida en más de 5 pedazos y fisuras de media severidad, dividida en más de 4 pedazos y fisuras de severidad alta.	
13	Pasos de Nivel	Bajo (B)	El defecto causa bajo desconfort al transitar	Se cuenta el número de placas que atraviesa el riel.
		Medio (M)	El defecto causa un desconfort medio al transitar, no se ve comprometida la seguridad	
		Alto (A)	Provoca incomodidad al transitar, la seguridad se ve comprometida, interrupciones en el flujo del tráfico.	
14	Fisuras Superficiales (Tipo Malla y descascamiento)	Bajo (B)	Fisuras superficiales en gran parte de la placa, superficie en buenas condiciones, poca descascamiento.	Se cuenta cada placa con descascamiento, si el nivel de severidad es bajo registrar solo si la descascamiento es inminente
		Medio (M)	Área con descascamiento inferior al 15% de la placa	
		Alto (A)	Descascamiento en más del 15% del área de la placa	
15	Fisuras por retracción plásticas	No hay grados de severidad definidos, sin embargo, el defecto deberá ser anotado.		Se cuentan las placas que presenten este defecto
16	Desportillamiento en las esquinas	Bajo (B)	Dimensiones de la parte desportillada de 13x13 a más de 30x30 (cm x cm) para profundidad del desportillamiento menor o igual a 25 milímetros (mm), o parte desportillada de 13x13 a 30x30 (cm x cm) con profundidad del desportillamiento mayor a 25 mm y menor a 50 mm.	Para más de un quiebre en la esquina en una misma placa con mismo nivel de severidad se cuenta como una placa con

		Medio (M)	Dimensiones de la parte desportillada mayor a 30x30 (cm x cm) para una profundidad del desportillamiento de más de 25 mm y menor a 50 mm, o para profundidad del desportillamiento mayor a 50 mm y partes desportilladas de dimensiones entre 13x13 a 30x30 (cm x cm)	quiebre en la esquina, para grados de severidad distintos, se considera el mayor.
		Alto (A)	Partes desportilladas con dimensiones de los lados de desportillamiento en centímetros mayor a 30 x 30 y una profundidad del desportillamiento mayor a 50 milímetros.	
17	Desportillamiento en las juntas	Bajo (B)	Partes que no pueden ser removidas fácilmente (pudiendo faltar algunos pedazos) sin importar el largo o ancho del desportillamiento, desportillamientos en las juntas de largo inferior a 0,6 m con partes fragmentadas sueltas y pedazos faltando en su mayoría con poca profundidad sin importar el ancho, o con gran parte o todos los pedazos removidos y anchura menor a 100 mm.	Cuando ocurre en una parte se considera una placa con quiebre en la junta, si hay más de uno en la misma placa, se considera y registra la ocurrencia de mayor grado de severidad, si ocurre entre dos placas, ambas placas deben ser anotadas como placas con quiebre en las juntas.
		Medio (M)	Aquellas juntas en que el largo fragmentado excede a 0,6 m con partes sueltas que pueden ser removidas o con pedazos faltantes, fragmentación poco profunda y sin importar el ancho del desportillamiento, o con ancho menor a 100 mm cuando los partes fragmentados se encuentran ausentes, cuando las partes desportilladas se encuentran ausentes y el ancho no excede los 100 mm y la largura es inferior a 0,6 m también se considera de severidad media.	
		Alto (A)	Se considera un grado de severidad alto cuando los pedazos fueron removidos en gran parte o en su totalidad y la anchura y largo de las partes fragmentadas exceden 100 mm y 0,6 m respectivamente.	
18	Placa Saltarina	Bajo (B)	Desnivel entre 3 a 10 milímetros	Se cuenta cada placa que presenta movimientos verticales
		Medio (M)	Desnivel entre 10 y 20 milímetros	
		Alto (A)	Desnivel mayor a 20 milímetros	

**Fuente:** Adaptado de DNIT (2004).

El levantamiento en pista puede ser realizado con el auxilio de una planilla en la que es representada la secuencia de placas y son anotados los defectos con auxilio de una codificación que lleva en cuenta el número y grado de severidad de dicho defecto conforme criterios mencionados en la tabla 2.

**Figura 85 – Ficha de Inspección**

FICHA DE INSPECCIÓN					
BR: _____ TRECHO: _____				HOJA: ____/____	
FECHA: ____/____/____		MUESTRA ADICIONAL? (SI) (NO) _____	MUESTRA N° _____	MEDIDA/	
PLACA (m) _____		N° DE PÁGINAS: _____	N° DE ANEXOS: _____		
JEFE DEL EQUIPO: _____					
FIRMA DEL ING. RESPONSABLE _____					
Placa	TIPOS DE DEFEITOS				
10	1. Levantamiento de Placas		10. Desgaste Superficial		
	2. Grietas de Esquina		11. Bombeo		
9	3. Placa Dividida		12. Quiebres Localizados		
	4. Escalonamiento de Juntas		13. Pasos de Nivel		
8	5. Deficiencias en el sellado de juntas		14. Malla y descamación		
	6. Desnivel Calzada-Banquina		15. Fisuras por retracción		
7	7. Grietas Lineares		16. Desportillamiento en esquinas		
	8. Grandes Reparaciones (A > 0,45 m <sup>2</sup> )		17. Desportillamiento en juntas		
6	9. Pequeñas Reparaciones (A ≤ 0,45 m <sup>2</sup> )		18. Placa Bailarina		
	TIPO DE DEFECTO	GRADO DE SEVERIDAD	N° DE PLACAS AFECTADAS	% DE PLACAS AFECTADAS	VALOR DEDUCIBLE
5					
4					
3					
2					
1	VALOR DEDUCIBLE TOTAL				
	VALOR DEDUCIBLE CORRIGIDO (VDC)				
	ICP = 100- VDC : _____		CONCEPTO: _____		

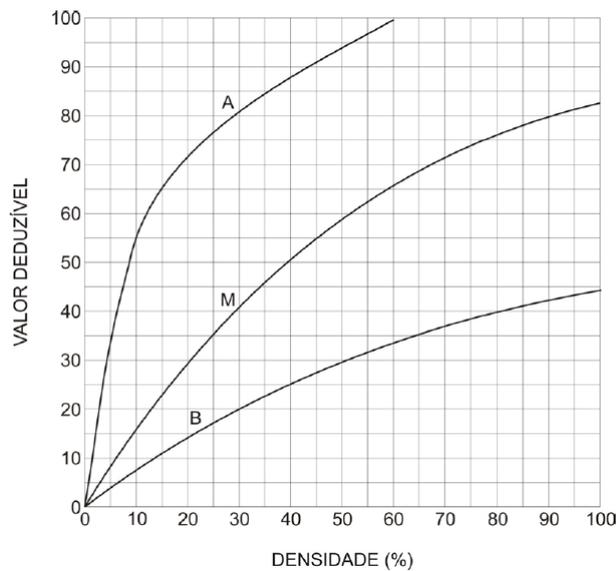
**Fuente:** Adaptado de DNIT (2004).

Adicional a la ficha de inspección son anexadas dos hojas en la que se indican informaciones complementares sobre defectos en el sellado de las juntas, desgaste superficial, asentamiento, baches y defectos atípicos.

### 3.4.2.3 Cálculo del ICP

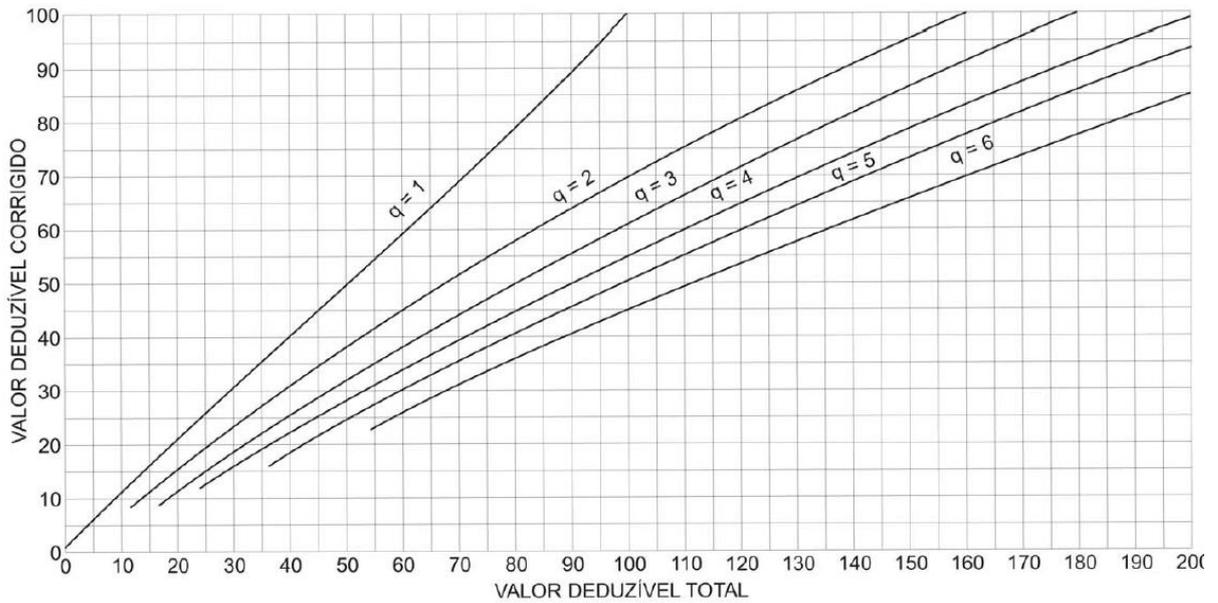
Para el cálculo del ICP se cuenta las placas afectadas y se calcula la densidad de cada defecto, definido por el número de placas afectadas dividido por el número de placas en la muestra, luego se estipula el Valor Deducible (VD) para cada uno de los defectos a partir de la de acuerdo con los gráficos presentados en la sección nº 6 de la normativa DNIT 062/2004, se determina el Valor Deducible Corregido (VDC) a partir de la suma de los valores deducibles y el factor “q” que corresponde al número de valores deducibles superior a 5 mediante el gráfico presentado en la sección nº 7 de la normativa supra mencionada el cual corresponde a pavimentos de hormigón simples, para obtener el valor del ICP se substraer el VDC a 100.

**Figura 86 – Ejemplo de Gráfico de Valor Deducible**



**Fuente:** DNIT (2004).

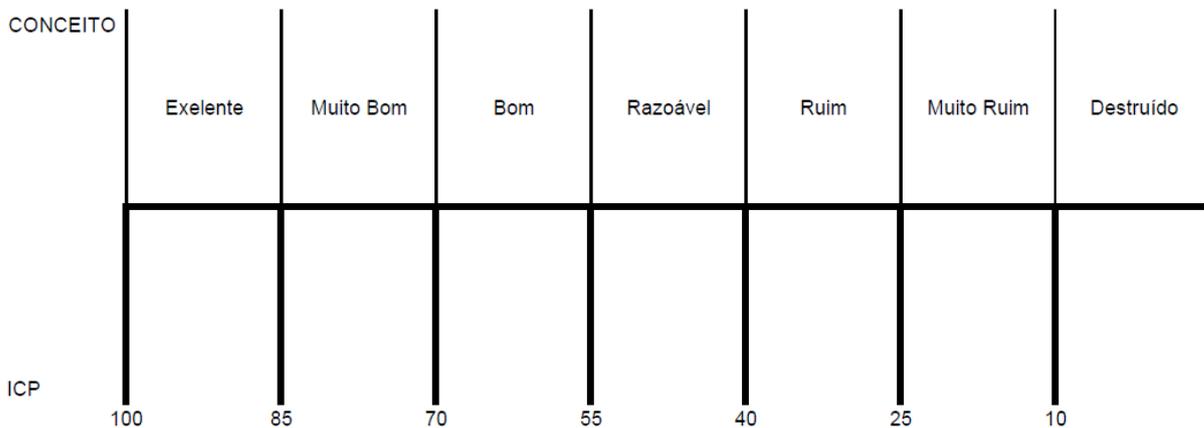
**Figura 87** –Gráfico de Valor Deducible Corregido



Fuente: DNIT (2004).

Para finalizar, se dará un concepto al pavimento de acuerdo con la Escala de evaluación del ICP disponible en el Anexo B de la normativa DNIT 062/2004 en base al valor de ICP calculado.

**Figura 88** – Escala de evaluación del ICP



Fuente: DNIT (2004).

Cuando ejecutado una inspección total de un tramo el cálculo del ICP del tramo consiste en la media aritmética de los valores de ICP obtenidos para las muestras, por otra parte, cuando la inspección es por muestras sin muestras adicionales el ICP del trecho puede ser la media aritmética del ICP de las muestras o bien cuando hay muestras adicionales dadas por la siguiente fórmula (DNIT, 2004):

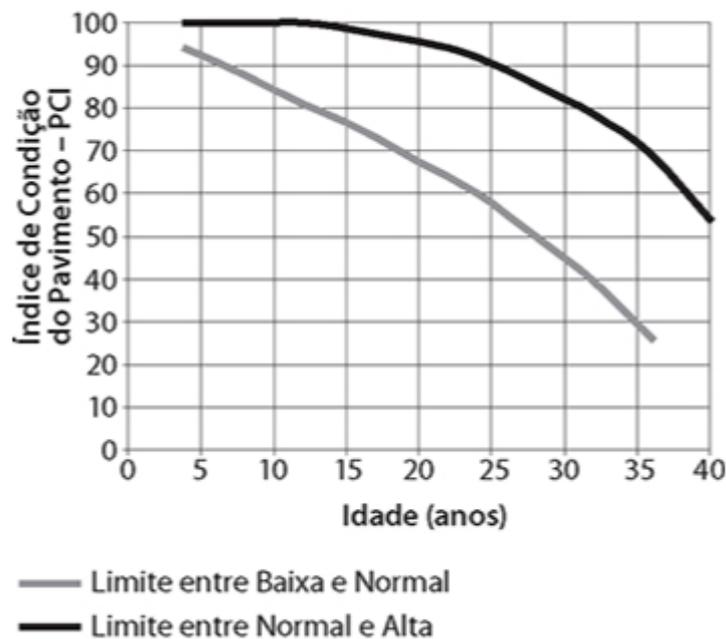
$$ICP_t = \frac{N - A}{N} ICP_1 + \frac{A}{N} ICP_2$$

Donde ICP<sub>t</sub> corresponde el ICP del tramo, ICP<sub>1</sub> e ICP<sub>2</sub> al ICP de las muestras aleatorias y adicionales respectivamente, N al número de muestras del tramo, A al número de muestras adicionales.

#### 3.4.2.4 Evaluación del Pavimento

La figura a continuación representa una forma de evaluar el desempeño del pavimento con base al ICP y a la edad de este de la siguiente manera: normal (entre las curvas), arriba de lo esperado (arriba de la curva superior) o debajo de lo esperado (debajo de la curva inferior) (Balbo, 2009):

**Figura 89** – Gráfico para evaluación del desempeño del pavimento



Fuente: Balbo (2009).

### 3.4.2.5 Levantamiento Automatizado – Scanner de Pavimento

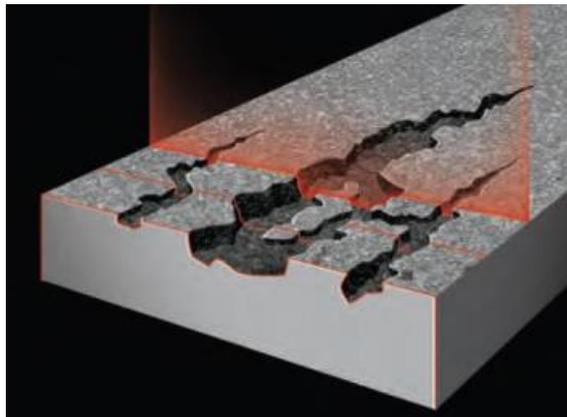
El equipamiento scanner de pavimento fue desarrollado inicialmente por una empresa canadiense denominada *Pavemetrics* que vende los sensores y softwares para procesamiento de datos como el Laser crack measurement system (LCMS) (SCABELLO, 2018).

El levantamiento de defectos puede ser automatizado mediante la obtención de imágenes 3D por medio de la integración de imágenes capturadas por cámaras de alta resolución junto con la información obtenida a partir del láser en el scanner de pavimento. La clasificación de los defectos es obtenida automáticamente mediante la proyección del láser y la captura de imágenes cuando el vehículo transita por la vía a velocidades normales de tránsito.

La implementación del scanner de pavimentos (Pavement Scanner) permite determinar automáticamente las manifestaciones patológicas presentes en pavimentos flexibles (Fisuras de clase 1, 2 y 3; Ondulaciones, Exudación, Desagregación, etc) y de pavimentos rígidos (Fisuras, Placa dividida, escalonamientos, defectos en el sellado de juntas, etc) excepto placa bailarina.

La detección automatizada y clasificación de los defectos se logra a partir la evaluación del perfil 3D del pavimento adquirido mediante la utilización de líneas de proyección laser y cámaras de alta potencia y óptica avanzada (SCABELLO, 2018).

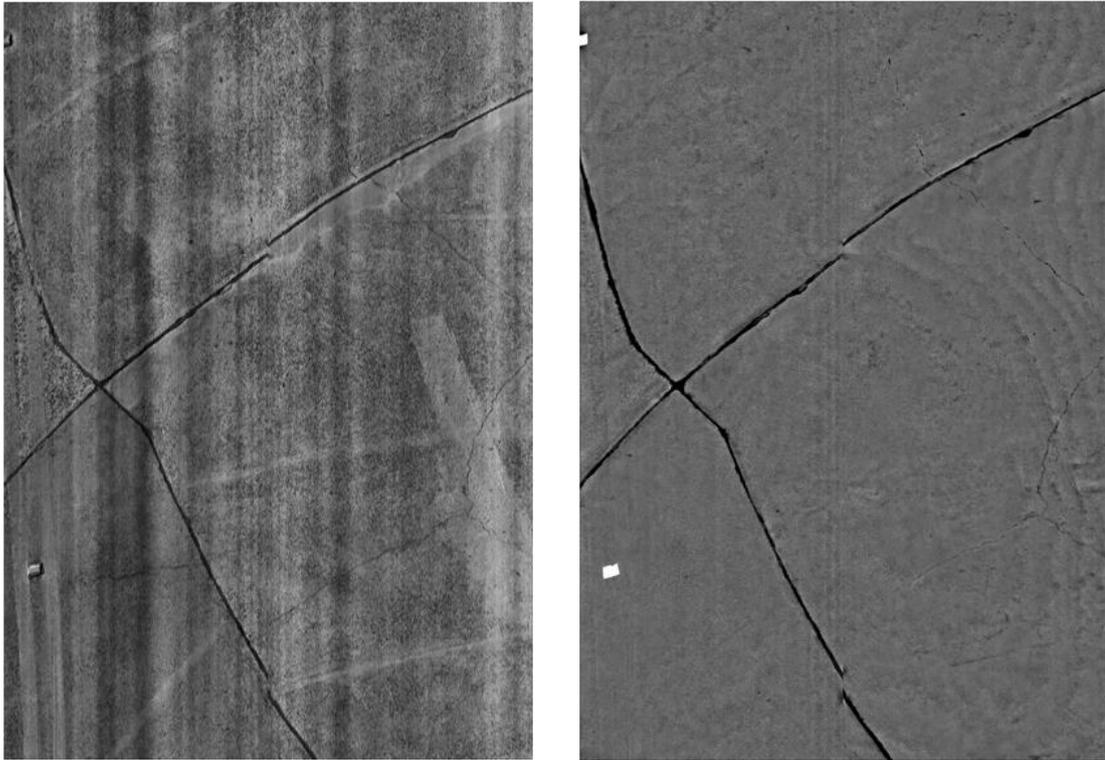
**Figura 90** – Laser del Pavement Scanner escaneando el defecto



**Fuente:** Adaptado de DNIT (2017)

El procesado permite la obtención de imágenes 3D a partir de la integración de los datos de profundidad (Imagen Range) proporcionado por el láser y las imágenes capturadas (Intensidad) para generar una imagen 3D.

**Figura 91** – Imagen 3D (Izquierda) y profundidad (Derecha)



**Fuente:** ITAIPU (2020)

Entre las ventajas de este levantamiento en relación con el levantamiento tradicional se encuentran (SCABELLO, 2018):

- Mayor rapidez en ejecución del levantamiento, pudiendo efectuar la inspección completa en solo una pasada. El levantamiento puede ser ejecutado inclusive a velocidades de hasta 100 km/h;
- Flexibilidad en el horario de levantamiento;
- La inspección puede ser realizada inclusive sin iluminación;
- Mayor seguridad y confort para el investigador;
- Resultados más precisos debido a un proceso objetivo y análisis computarizado de los defectos.

La clasificación y análisis de los defectos es efectuada en conformidad con la ya mencionada norma DNIT 062/2004 – PRO "Pavimento Rígido – Avaliação objetiva – Procedimento".

### 3.4.3 Deflexión en Pavimentos

#### 3.4.3.1 Medición

El motivo principal asociado a la medición de las deflexiones en pavimentos rígidos es la determinación de su condición estructural, la medición de los datos de deflexiones puede efectuadas por medio de la utilización de un equipamiento denominado Falling Weight Deflectometer (FWD).

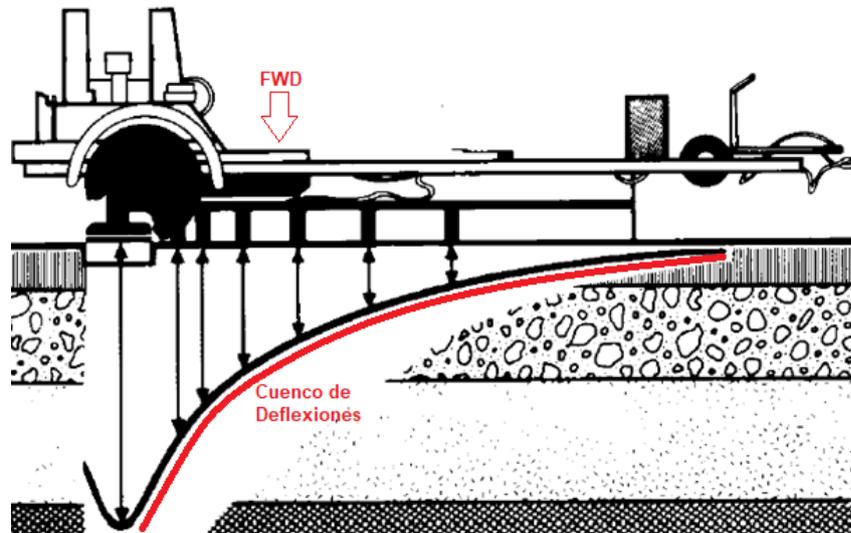
Garber & Hoel (2002) apud Delatte (2014) definen al Falling Weight Deflectometer (FWD) como dispositivos montados en tráileres que aplican una carga al pavimento para posteriormente recolectar las deflexiones producidas en este con auxilio de unos 6 sensores separados entre sí a una distancia de 300 mm. De acuerdo con la Federal Highway Administration (FHWA) (2017) las deflexiones son medidas utilizando sismómetros, transductores de velocidad o acelerómetros.

DYNATEST (2006) apud Delatte (2014) menciona que la carga producida por el FWD consiste en un impulso dinámico que simula la carga de una rueda en vez de una carga estática, semi-estática o vibratoria.

La carga varía entre 0,7 y 12,2 Kgf siendo usual su empleo en Brasil con una carga de 4,1 kgf correspondiente a un semieje padrón brasileño.

En pavimentos rígidos el FWD permite la medición de la rigidez general del pavimento, integridad estructural o transferencia de cargas en las juntas. Las mediciones de deflexión vertical del FWD son efectuadas en el centro de la carga aplicada y en cada uno de los sensores, a este conjunto de deflexiones se lo conoce con cuenco de deflexiones (GARBER & HOEL, 2002 apud DELATTE, 2014).

**Figura 92** – Funcionamiento del FWD y cuenco de Deflexiones



Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020)

#### 3.4.3.2 Retroanálisis

La obtención de los parámetros como el módulo de elasticidad (E) de la placa de hormigón, del módulo de reacción de la subrasante (k) y la eficiencia de transferencia de carga (LTE) se realiza mediante un procedimiento denominado retro análisis (FHWA, 2017).

Según Balbo (2009) los modelos más difundidos para retro análisis son aquellos desenvueltos por Kathleen Teresa Hall, mediante el análisis de la respuesta estructural de diversas secciones de pavimentos de hormigón. Esta investigadora determino la relación entre el radio de rigidez relativa y el parámetro AREA:

$$l = \left[ \frac{\ln\left(\frac{36 - AREA}{1812,279133}\right)}{-2,55934} \right]^{4,387009}$$

El parámetro AREA consiste en el área del cuenco de deflexiones normalizado por la deflexión máxima bajo una carga de FWD aplicada en la placa de diámetro de 30 centímetros. Las fórmulas para cálculo cuando utilizado 4 sensores se encuentra indicada a continuación (BALBO, 2009):

$$AREA = 6 \left( 1 + 2 \frac{d_{12}}{d_0} + 2 \frac{d_{24}}{d_0} + \frac{d_{36}}{d_0} \right)$$

Los valores de deflexiones deberán ser empleados en pulgadas para el cálculo y corresponden a las deflexiones medidas en los sensores ubicados a 30 cm (12 in.), 60 cm (24 in.) y 90 cm (36 in.).

Balbo (2009) menciona la sugerencia de Croveti (1994) del uso de las ecuaciones para carga en el centro de la placa de Westergaard para obtener el módulo de reacción de la subrasante mediante el retro análisis.

La fórmula que debe ser empleada para la obtención del módulo de reacción de la subrasante en psi/pulgada es la siguiente (BALBO, 2009):

$$k = \frac{P}{8 \times d_0 \times l^2} \left\{ 1 + \left( \frac{1}{2\pi} \right) \times \left[ \ln \left( \frac{a}{2l} \right) - 0.67278436 \right] \times \left( \frac{a}{l} \right)^2 \right\}$$

Donde los valores P, a y l son respectivamente la carga aplicada en libras fuerza, radio de la carga circular aplicada en pulgadas y radio de rigidez relativa en pulgadas.

El módulo de elasticidad (E) puede ser calculado entonces a partir del radio de rigidez relativa (l), el módulo de reacción de la subrasante (k), el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) y el espesor de la placa (h):

$$E = \frac{12 \times (1 - \mu^2) \times k \times l^4}{h^3}$$

La transferencia de carga es medida ubicando los sensores en ambos lados de la junta y midiendo las deflexiones, básicamente si las deflexiones son las mismas se aproxima de 100 % de transferencia de carga, entre tanto, que, si la deflexión en la placa cargada es considerablemente mayor, la transferencia de carga no será eficiente (DELATTE, 2014).

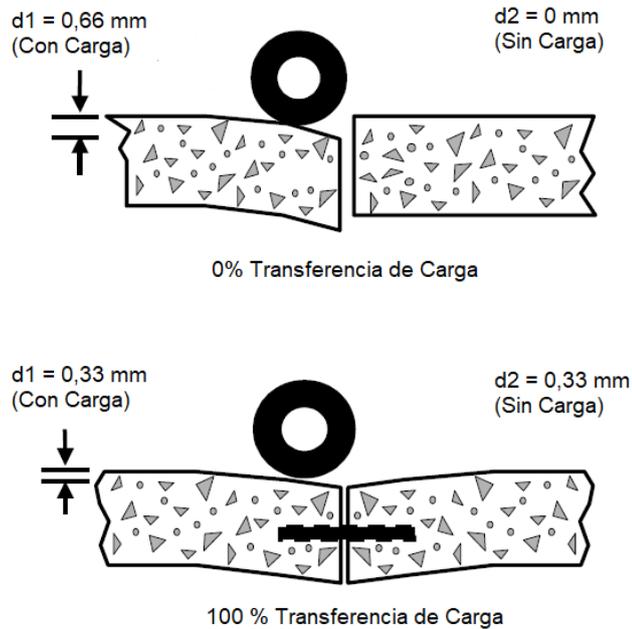
Le eficiencia en la transferencia de carga (LTE) se obtiene mediante los valores de la deflexión en el punto de aplicación de carga (d1) y de la deflexión en un punto simétrico a este en la placa no cargada (d2) por medio de la siguiente fórmula (BALBO, 2009):

$$LTE (\%) = \frac{d_2}{d_1} \times 100$$

Según Balbo (2009) en el caso de pavimentos con juntas transversales con barras de transferencia de carga el valor del LTE oscila entre 90 y 100 %, por otro lado, cuando no hay barras de transferencia este valor se ve influido significativamente por el horario del día y la estación puesto que la transferencia se realiza únicamente

por intermedio de los agregados. La imagen a continuación ilustra un diagrama del concepto de la transferencia de carga y la influencia de las barras de transferencia:

**Figura 93** – Diagrama del concepto de transferencia de carga



**Fuente:** Adaptado de FHWA (2017)

La figura a continuación obtenida a partir de Balbo (2009) muestra un ejemplo con valores retro analizados para el Módulo de reacción de subrasante ( $k$ ), Módulo de Elasticidad ( $E$ ) y LTE por Colim & Balbo (2007):

**Figura 94** – Cuenco de deflexiones en la pista experimental de la USP

Seção	$k_{\text{centro}}$ retroanalizado (MPa/m)	$E$ retroanalizado (MPa)	Esp. (m)	$\ell$ (m)	LTE (%) manhã	LTE (%) tarde
A1	40	73.800	0,15	0,853	99	97
A3	38	57.050	0,15	0,811	96	96
B1	75	45.850	0,15	0,648	96	89
B3	82	35.000	0,15	0,592	99	91
C1	63	53.900	0,25	1,033	98	94
C3	91	37.000	0,25	0,858	91	91
D1	76	39.850	0,25	0,914	94	95
D3	87	45.250	0,25	0,912	91	90
E1	75	33.850	0,25	0,880	97	97
E3	62	58.850	0,25	1,060	55	74

**Fuente:** BALBO (2009)

Según la Federal Highway Administration (2017) los valores típicos de AREA y deflexión máxima d0 para la configuración de 4 sensores del FWD son los siguientes:

**Figura 95** – Valores Típicos de AREA y d0

Tipo de pavimento	Valor de AREA (mm)	Valor del AREA (pulgadas)	D0 (µm)	D0 (mil)
PCC	740-810	29-32	250-500	10-20

**Fuente:** Adaptado de FHWA (2017)

Además, la Federal Highway Administration (2017) indica tendencias de la deflexión máxima d0 y AREA que indican las conclusiones generalizadas presentadas en la siguiente imagen, no obstante, pueden presentarse excepciones:

**Figura 96** – Valores Típicos de AREA y d0

Valor de AREA	Deflexión Superficial Máxima (D0)	Conclusiones generales
Bajo	Bajo	Estructura débil, subrasante fuerte
Bajo	Alto	Estructura débil, subrasante débil
Alto	Bajo	Estructura fuerte, subrasante fuerte
Alto	Alto	Estructura fuerte, subrasante débil

**Fuente:** Adaptado de FHWA (2017)

#### 3.4.4 Evaluación Estratigráfica

La evaluación estratigráfica de un pavimento existente buscando determinar los espesores de las capas existentes puede ser obtenida mediante la implementación del equipamiento denominado Ground Penetrating Radar (GPR).

En Brasil, el uso del GPR se mostró favorable para la determinación de la estratigrafía de pavimentos demostrando el potencial de métodos no destructivos para determinación de los espesores de las capas de pavimentos (SANTOS et al, 2015).

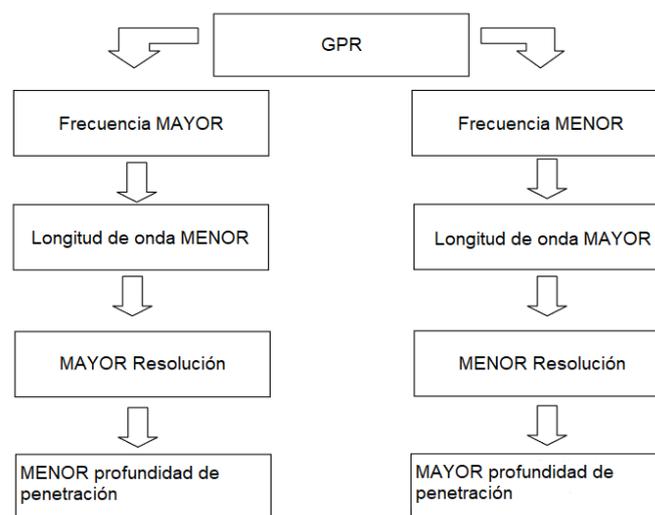
Según Santos et al (2015 apud DANIELS, 1996) mediante la aplicación del GPR en pavimentos rígidos y flexibles pueden ser determinados los espesores de las capas de la estructura del pavimento, la presencia de barras de articulación y de transferencia, fisuras y vacíos por debajo de la superficie.

Según Santos et al (2015) el GPR emplea un método de propagación de ondas electromagnéticas para mapear materiales y objetos presentes en el suelo. Las ondas

emitidas son reflejadas, refractadas y difractadas debido a las propiedades eléctricas del medio. El registro continuo genera un gráfico denominado radargrama.

La frecuencia de la antena usada y las constantes dieléctricas del terreno están relacionadas con la resolución y el alcance, de forma que en frecuencias menores el alcance es mayor pero la resolución disminuye, y en frecuencias mayores el alcance es menor pero la resolución es mayor (LOPES, 2009).

**Figura 97** – Esquema de la relación entre frecuencia, longitud de onda, resolución y profundidad de alcance del GPR



**Fuente:** Adaptado de LOPES (2009)

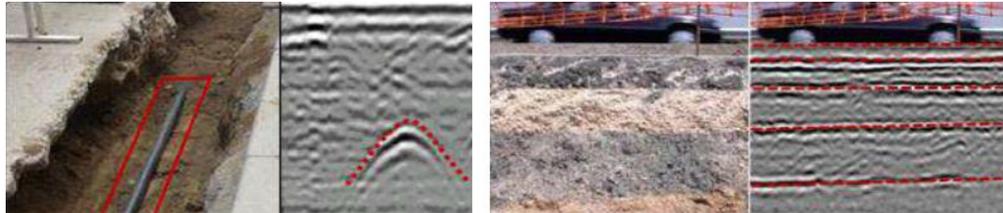
La interpretación de los radargramas presenta una gran complejidad debido a la variación del perfil estratigráfico y presencia de nivel freático o terraplén debido a la correlación entre el material y el padrón de reflexión observado, que en materiales arenosos es un padrón paralelo y poco irregular mientras en materiales coluviales es ondulado con aspecto entrecruzado de hipérbolas cóncavas, siendo necesario la ejecución de sondajes para determinación del material (LOPES, 2009).

La interpretación de las respuestas del GPR sirve para la identificación de estructuras e instalaciones subterráneas o determinar espesor de las capas mediante el análisis de las reflexiones.

Básicamente las reflexiones planas dadas por líneas planas o pseudo horizontales en las secciones de espaciamiento constante son indicativas de estructuras lineares como pueden ser encuentro de capas geotécnicas, horizontes pedológicos, nivel freático, etc, entre tanto que, las reflexiones puntuales definidas por hipérbolas en las secciones de espaciamiento constante denotan la presencia

anomalías o estructuras no planas o puntuales de presencia limitada en la sección como pueden ser tuberías, túneles, rocas, vacíos, etc.

**Figura 98** – Ejemplo de las reflexiones causadas por objetos puntuales (Izquierda) y por las capas del terreno (Derecha)



**Fuente:** ITAIPU (2020)

### 3.5 MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN

Debido a la corta vida útil que poseen los materiales sellantes en comparación con la prevista para el pavimento, y considerando que la destrucción del sellante abre camino a infiltraciones que pueden alcanzar la fundación, es de vital importancia el correcto mantenimiento del sellado de las juntas para la durabilidad de la estructura (DNIT, 2010)

La conservación y eventual restauración de un pavimento son esenciales para la preservación de su patrimonio, una manutención frecuente de las vías evita aumentos en los costos de operación de vehículos y disminuye la necesidad de mayores inversiones en la recuperación de estas (DNIT, 2011).

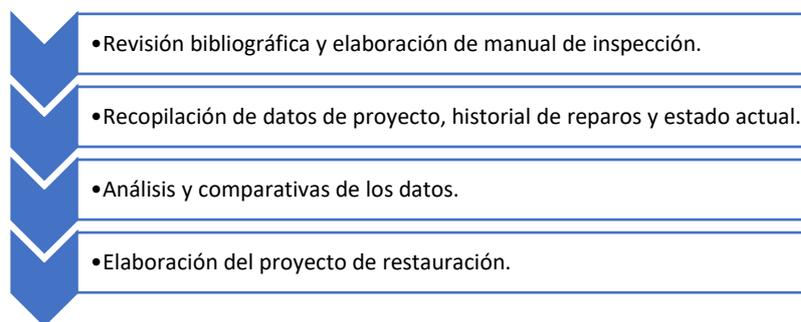
Usualmente en pavimentos de buenas condiciones el mantenimiento es suficiente para subsanar defectos menores, para pavimentos que se encuentren en mala o pésima condición puede ser necesaria la aplicación de diversas estrategias, si la condición del pavimento es pésima generalmente se hace necesario una reconstrucción completa del pavimento, lo cual representa costos más elevados y mayor consumo de tiempo en comparación con otras alternativas (DELATTE, 2014).

De forma general, fisuras, grietas y juntas deberán ser selladas o reselladas, el mantenimiento adecuado evita la intrusión de materiales incompresibles en la junta previniendo así los levantamientos de placas y la aparición de tensiones internas al permitir la libre expansión de las placas, además de la ejecución de bacheos o parches caso sea necesario (DELATTE, 2014).

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo contempla el paso a paso seguido y procedimientos adoptados para la realización de este trabajo que consiste en un estudio de caso en el cual es analizado una pista de pavimento de hormigón localizado en el Área Industrial de la Usina de Itaipu. Para ello, es posible dividir el trabajo en 4 grandes etapas, como demuestra la figura a continuación.

**Figura 99** – Fluxograma de etapas.



**Fuente:** El autor (2020).

Las etapas supra mencionadas serán descritas a continuación, detallando el procedimiento seguido para completar cada una de las etapas especificando métodos, materiales y softwares utilizados conforme sea pertinente.

### 4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ELABORACIÓN DE MANUAL DE INSPECCIÓN

Previo al inicio de las actividades que engloban el análisis y propuesta de solución del problema fue realizada una revisión bibliográfica de la literatura disponible sobre pavimentos con un enfoque en los pavimentos de hormigón, abarcando tanto el dimensionamiento de los pavimentos de hormigón como las irregularidades que puedan presentarse a raíz de distintas causas y posibles métodos empleados en la reparación de los defectos.

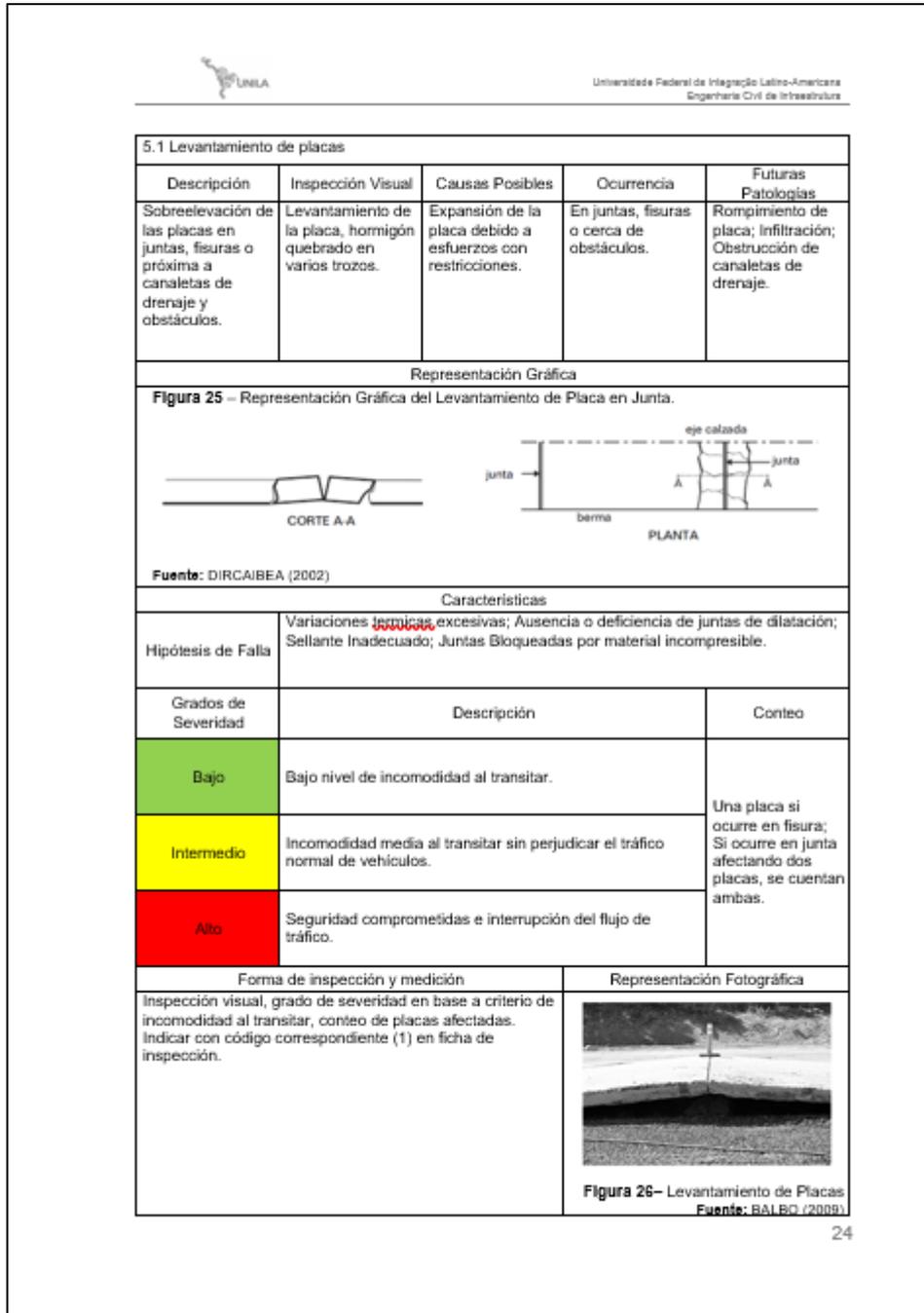
Para facilitar la identificación de los defectos que pueden presentarse en un pavimento rígido fue elaborado un manual abarcando las principales irregularidades presentadas y de las cuáles se hace uso para el cálculo del Índice de Condición de Pavimento el cuál brinda una noción del estado del pavimento.

Para cada defecto fue elaborado una tabla conteniendo en forma resumida ítems como:

- Descripción: Breve descripción del defecto;
- Inspección Visual: Representación verbal de lo visual del defecto;
- Causas Posibles: Compendio de algunas causas posibles basado en la literatura existente;
- Ocurrencia: Localización dentro de la pista donde se presenta el defecto;
- Futuras Patologías: Defectos futuros que puedan aparecer como consecuencia;
- Representación Gráfica: Croquis que represente gráficamente lo visual del defecto en manera aproximada.
- Hipótesis de falla: Posibles ocurrencias que pudieron haber derivado en el defecto.
- Grados de severidad, Descripción y Conteo: Clasificación que permite identificar cuan dañino es el defecto, basado en la normativa DNIT 60/2004;
- Forma de inspección y medición: Breve descripción de como catalogar el defecto;
- Representación Fotográfica: Imagen retirada de la literatura que sirve para mejor comprensión de la ocurrencia.

En la figura 100 se ilustra una captura de pantalla de una de las páginas del manual titulado “MANUAL UNIFICADO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE DEFECTOS PRESENTES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS”.

Figura 100 – Página del Manual



Fuente: El autor (2020).

#### 4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS DE PROYECTO, REPAROS Y ESTADO ACTUAL

La Usina de Itaipu se encuentra localizada en la frontera Brasil – Paraguay, los accesos disponibles entre Margen Derecha y Margen Izquierda pueden ser realizados por la elevación 225 o 144 (Pista de la Crista, Pista de Aguas Arriba, Pista de Aguas Abajo). En el documento se abarca el análisis de la Pista de Aguas Abajo.

**Figura 101** –Pistas de Acceso entre Margen Derecha y Margen Izquierda



**Fuente:** El Autor (2021).

Inicialmente fue necesario recopilar datos existentes sobre las pistas, llámense estos proyectos, historial de manifestaciones patológicas y consecuentes reparos, reportes existentes del estado actual y levantamientos realizados en los pavimentos.

Para tal fin fue utilizado el Sistema de Archivo Técnico (SAT) de la Itaipu, donde es posible efectuar la búsqueda tanto por número de documento como por palabra clave dentro del archivo de la entidad obteniendo así acceso a materiales escaneados de los documentos más antiguos que datan de la época de construcción de la hidroeléctrica y documentos en pdf u otros formatos de archivos de los más recientes.

**Figura 102** – Sistema de Archivo Técnico (SAT) para búsqueda de documentos.



**Fuente:** ITAIPU (2020).

La búsqueda proporciono como bases de este trabajo a los siguientes documentos y sus correspondientes complementares:

**Tabla 3** – Documentos base de pistas de la elevación 144 m.

<b>Número de Documento</b>	<b>Título</b>
1	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO AMD – PISTA DE JUSANTE – ARMADURAS, PLANTA, SEÇÕES E DETALHES
2	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO AMD – PISTA DE JUSANTE – FORMAS PLANTA, SEÇÕES E DETALHES DE JUNTAS – FOLHA 3/3
3	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO – BLOCOS U1 A U15 – PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO ENTRE EIXOS C E D SEÇÕES TIPO – FOLHA 1/2
4	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO – BLOCOS U1 A U15 – ARMADURA DO PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO ENTRE EIXOS C E D – PLANTA E SEÇÕES – FOLHA 1/1
5	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO – BLOCOS U1 A U15 – PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO ENTRE EIXOS C E D DETALHE DE JUNTAS – FOLHA 2/2
6	PROJETO DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ENTRE EIXOS C E D – BLOCOS U1 A U15 FORMAS – PLANTA E DETALHES DE JUNTAS – FOLHA 1/2
7	PROJETO DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ENTRE EIXOS C E D – BLOCOS U1 A U15 FORMAS – PLANTA E DETALHES DE JUNTAS – FOLHA 2/2
8	PISTA DE JUSANTE – AMC 3 – ENTRE EIXOS C E D PROJETO DE PAVIMENTO DE CONCRETO FORMAS- PLANTA E DETALHES DE JUNTAS FOLHA 1/2
9	PISTA DE JUSANTE – AMC 3 – ENTRE EIXOS C E D PROJETO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADURAS PLANTAS E SEÇÕES
10	PISTA DE JUSANTE – BLOCOS U16 À U18 A – ENTRE EIXOS C E D PROJETO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ARMADURAS – PLANTA E SEÇÕES
11	PISTA DE JUSANTE – BLOCOS U16 À U18 A – ENTRE EIXO C E D PROJETO DE PAVIMENTO DE CONCRETO FORMAS – PLANTA E DETALHES DE JUNTAS – FOLHA 1/2
12	PISTA DE JUSANTE BLOCO V1 PROJETO DE PAVIMENTO DE CONCRETO FORMAS – PLANTAS E DETALHES DE JUNTAS
13	CRITÉRIOS GERAIS PARA EXECUÇÃO DE IMPERMEABILIZAÇÃO DA COBERTURA DA CASA DE FORÇA E EDIFÍCIOS ANEXOS
14	LEVANTAMIENTO NO DESTRUCTIVO DE CONDICIONES ACTUALES Y EVALUACIÓN DE PAVIMENTO EXISTENTE DEL ÁREA INDUSTRIAL Y LA SUBESTACIÓN DE MARGEN DERECHA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE ITAIPU

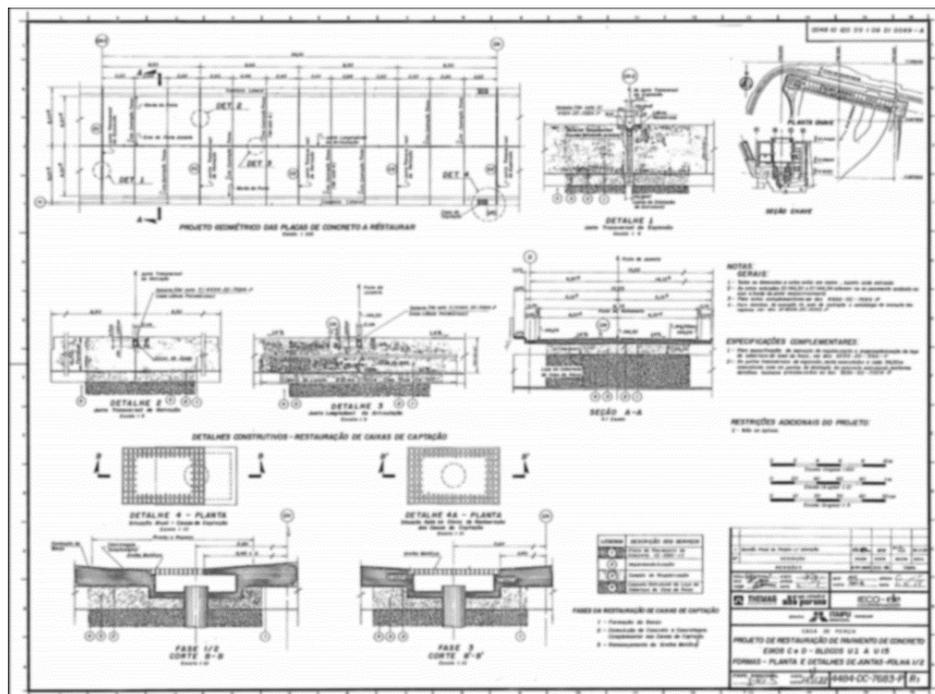
15	ANÁLISE TÉCNICA DO ESTADO ATUAL DO PAVIMENTO DE CONCRETO DA PISTA DE JUSANTE DA CASA DE FORÇA – ELEVÇÃO 144,00
16	INSTRUÇÃO DE MANUTENÇÃO PAVIMENTOS RÍGIDOS

Nota: Los números originales fueron ocultados por cuestiones de confidencialidad de información

Fuente: El Autor

En la figura 103 se encuentra el documento un plano a modo de ejemplificar el layout utilizado para la elaboración de planos en la entidad bien como el formato disponible para acceso en el Sistema de Archivo Técnico.

**Figura 103** – Ejemplo de documento disponible en el Sistema de Archivo Técnico



Fuente: ITAIPU BINACIONAL (1988).

A partir de los documentos arriba mencionados fue posible conocer el histórico de la pista y su estado actual, informaciones como materiales y proyecto geométrico, historial de recuperaciones, evolución de tráfico, entre otras que fueron recopilados con base al manual de recuperación de pavimentos de la DNIT (2010).

Un levantamiento no destructivo ejecutado en la Itaipu en el 2019 proporciona datos de evaluación de la superficie para determinación del ICP por medio de la

normativa DNIT 62/2004 y evaluación funcional de los pavimentos mediante el uso del *Pavement Scanner* o *PavScan* para determinación del IRI, además de la evaluación estructural por medio del uso del *Falling Weight Deflectometer*, estos datos fueron recopilados y analizados junto con las demás informaciones disponibles. Cabe resaltar que la obtención de imágenes para la evaluación superficial fue realizada utilizando el *PavScan* mediante líneas de proyección de láser y cámaras de alta potencia y óptica avanzada.

En la figura 104 es posible apreciar apreciar las fotos del *PavScan* y el *Falling Weight Deflectometer*.

**Figura 104** – PavScan (Arriba) y Falling Weight Deflectometer (Abajo).

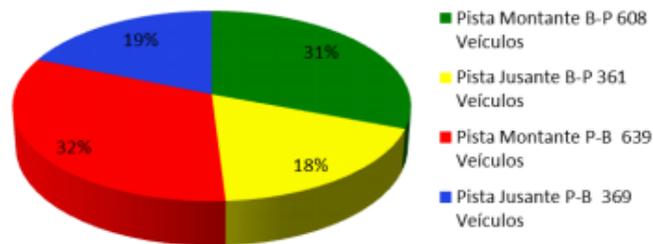


**Fuente:** ITAIPU (2020).



de ejemplificar los datos disponibles en dicho documento y que fueron utilizados en el análisis y en el proyecto.

**Figura 106** – Conteo volumétrico de tráfico de las pistas de aguas arriba y aguas abajo.



Fuente: FRITSCH (2016).

En la figura 107 se ilustra el inventario de superficie ejecutado por FRITSCH (2016).

**Figura 107** – Ficha de Inspección

Placa Nº	PLACA D	PLACA E	TIPOS DE DEFEITOS						
1	15 17-B		1. Aljamento de pías	11. Bombeamento					
2	15	15	2. Fissura de canto	12. Quebra localizadas					
3	15	3-B 15	3. Placa dividida	13. Passagem de nível					
4	15	7-B 15	4. Degrau de junta	14. Rendilhamento e					
5	7-B 15	3-B 15	5. Def. selag.	15. Fissuras de retração					
6	3-B 15	7-B 15	6. Desn. Pav.	16. Quebra de canto					
7	8-B 15	3-B 15	7. Fissuras lineares	17. Esborciamento de juntas					
8	7-B 8-B 15	3-B 8-B 15	8. Grandes reparos	18. Placa bailarina					
9	3-B 15	3-B 15	9. Pequenos	19. Assentamento					
10	3-B 15 8-B	3-B 15 8-B	10. Desgaste	20. Buracos					
			TIPOS - SEVERIDA DE	Nº DE PLACAS AFETADA	% DE PLACAS AFETADA	VALOR DEDUTÍV EL	VD >5		
			3-B	9	47,37%	35	35		
			3-M						
			5-M	X	X	4			
			7-B	4	21,05%	10	10		
			7-M						
			8-B	6	31,58%	12	12		
			9-B						
			10						
			12-B						
			12-M						
			15	19	100,00%	4			
			16-B						
			17-B	1	5,26%	2			
			TOTAL	39	205,26%				
			VALOR DEDUTÍVEL TOTAL				57		
			VALOR DEDUTÍVEL CORRIGIDO (VDC) q=				36		
			ICP= 64						
			CONCEITO=				BOM		

Fuente: FRITSCH (2016).

### 4.3 ANÁLISIS Y COMPARATIVA DE LOS DATOS

En secuencia a la recopilación de datos se procedió al análisis de estos, teniendo en cuenta los criterios provistos por las normativas correspondientes. A fin de una mejor visualización e interpretación de los resultados de los distintos levantamientos fueron elaborados gráficos ilustrativos que representen las frecuencias supuestas.

Seguidamente, fueron evaluados los proyectos iniciales de ambas pistas y las reparaciones que fueron ejecutadas en estas, y mediante un análisis de las características propias y los dos levantamientos existentes se buscó identificar posibles causas que derivaron en la diferencia de desempeño de la pista de aguas abajo en comparación con la pista de aguas arriba, y se buscó obtener una relación entre sus características y las manifestaciones patológicas que presentan.

La figura 108 ejemplifica la planilla utilizada para la organización de los datos para el análisis.

**Figura 108 – Captura de Pantalla - Planilla de Datos**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
1	Sentido Creciente - 2016																							
2	Nº Placa	Tipo 1	G	Tipo 2	G	Tipo 3	G	Tipo 4	G	Tipo 5	G	Tipo 6	G	Tipo 7	G	Tipo 8	G	Tipo 9	G	Tipo 10	G	Tipo 11	Tipo	
3	1																							
4	2						1 B																	
5	3														1 B									
6	4						1 B																	
7	5													1 B										
8	6						1 B									1 B								
9	7						1 B									1 B								
10	8						1 B																	
11	9						1 B									1 B								
12	10						1 B								1 B									
13	11						1 B																	
14	12														1 B									
15	13															1 B								
16	14						1 B																	
17	15						1 B																	
18	16						1 B																	
19	17						1 B																	
20	18						1 B																	
21	19															1 B								

Fuente: El autor (2020).

Para facilitar la comparación entre los levantamientos existentes fue necesario modificar el cálculo del ICP y la forma del levantamiento de 2016 para que coincida con la forma ejecutada en 2019.

Fue elaborado un documento que contiene los datos e histórico de la pista y el análisis de esta.

#### 4.4 PROPUESTA DEL PROYECTO DE RESTAURACIÓN

Fue elaborado un nuevo proyecto para la pista de aguas abajo manteniendo algunas características de la pista original como ser el proyecto geométrico y el tipo de pavimento siendo este un pavimento de hormigón simple con barras de anclaje y de transferencia y armadura no estructural cuya función es resistir esfuerzos derivados de la cura del hormigón.

Para fines de cálculo se hizo uso de planillas de Excel elaboradas por el autor y de freewares (softwares disponibles gratuitamente) para cálculo de los valores de entrada del proyecto y para la verificación de las ecuaciones de la AASHTO 93 y del método de PCA 1984 respectivamente.

Fue elaborado también un memorial de cálculo conteniendo los datos supra mencionados de una manera más organizada y estructurada permitiendo así un mejor entendimiento del procedimiento de cálculo de los distintos elementos del proyecto.

En la figura 109 es posible apreciar una captura de pantalla de la planilla de Excel elaborada por el autor con los cálculos iniciales que posteriormente fueron utilizados para el dimensionamiento de la estructura del pavimento.

**Figura 109 – Captura de Pantalla – Planilla de Cálculo**

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data tables:

Conteo de tránsito (2016)					
Vehículo	Sentido B-P	Sentido P-B	Dos Sentidos	%	
A	67	198	265	36,3	
B	51	84	135	18,5	
C (2C)	158	68	226	31,0	
D (3C)	80	9	89	12,2	
E (2C)	4	8	12	1,6	
F (3C)	1	0	1	0,1	
G	0	2	2	0,3	
Total	361	369	730	100,0	

Conteo de tránsito Pista de Aguas Abajo Equivalente (2020)					
Vehículo	Sentido B-P	Sentido P-B	Dos Sentidos	%	
A	74	219	293	36,3	
B	56	93	149	18,5	
C (2C)	174	75	250	31,0	
D (3C)	88	10	98	12,2	
E (2C)	4	9	13	1,6	
F (3C)	1	0	1	0,1	
G	0	2	2	0,3	
Total	399	407	806	100,0	

Transito Diario		806
Factor Sentido		0,5
Factor Carril		1
Tasa de crecimiento (%)		2%
Periodo de Diseño (años)		20
Serviciabilidad Inicial		4,5
Serviciabilidad Final		2,5
Placas Fracturadas		5%
f <sub>ck</sub> (Mpa)		40

Factor de Daño							
Vehículo	Peso por eje (t)			Equivalencia			F.D
	E1	E2	E2E3	FcE1	FcE2	FcE2E3	
Bus (2C)	6,00	10,00		0,68	2,26		2,94
Bus (3C)	6,00		13,50	0,68		1,28	1,96
Camión (2C)	6,00	10,00		0,68	2,26		2,94
Camión (3C)	6,00		17,00	0,68		3,21	3,90

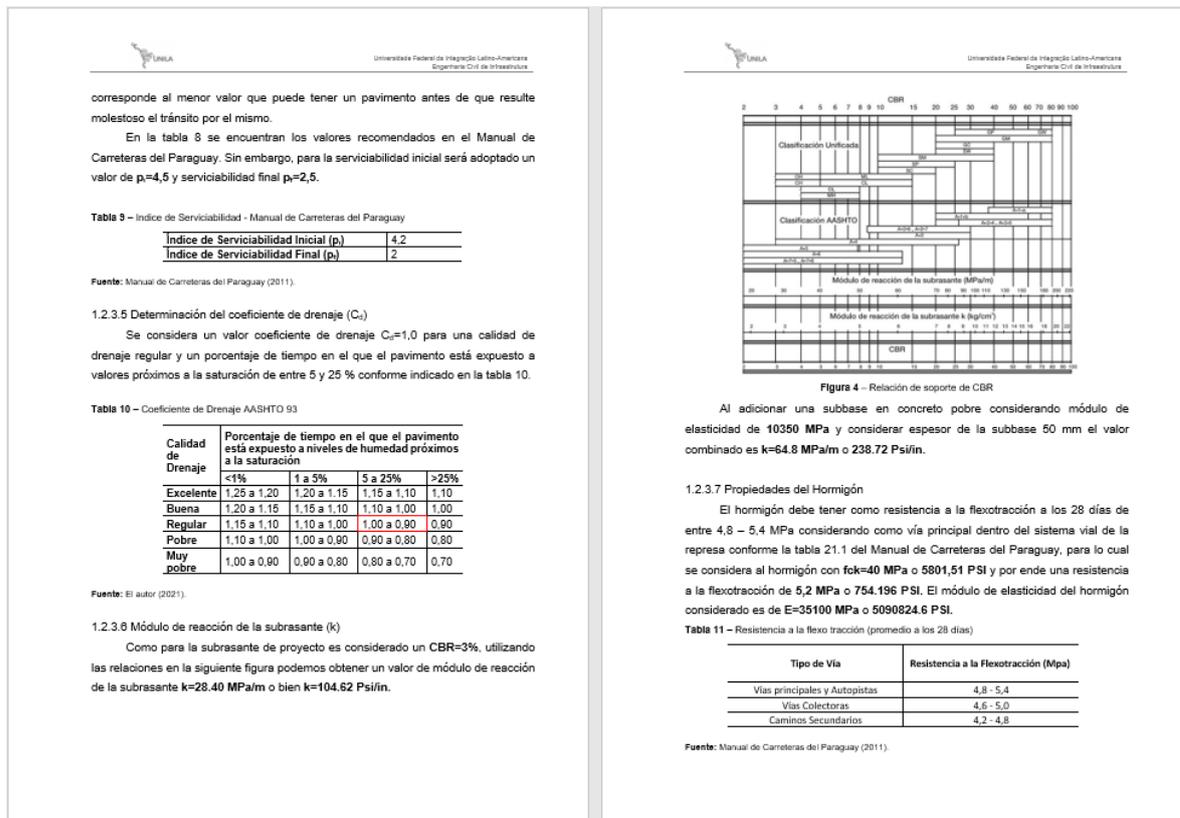
Incremento: Buses (2,0) Carga (2,5)

Fuente: El autor (2020).

Los softwares utilizados para los cálculos y verificaciones correspondientes son EqAASHTO93 ver 2.0, PCAcálculo, DowelCAD 2.0.

El memorial de cálculo y proyecto geométrico se ve ejemplificado en la figura 110 donde es posible apreciar una captura de pantalla de dos páginas seleccionadas aleatoriamente del mismo a modo de ilustrar el formato y la estructuración de este. El memorial completo se encuentra en el Anexo C.

**Figura 110 – Captura de Pantalla - Memorial de Cálculo y Proyecto Geométrico**

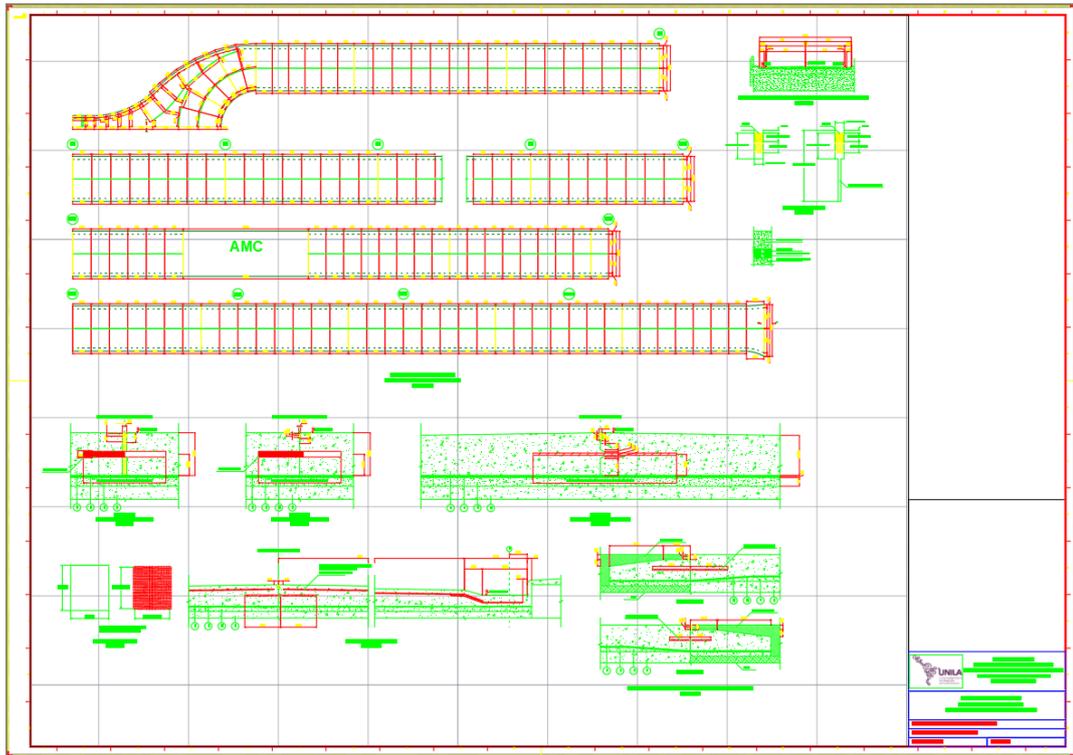


Fuente: El autor (2020).

Fue elaborado también el proyecto geométrico en AutoCAD donde se detallan aspectos como el encofrado, armaduras, secciones transversales y longitudinales, materiales utilizados, entre otros.

La figura 111 representa el dibujo asistido por computador correspondiente a la propuesta de proyecto de la Pista de Aguas Abajo, el plano está presentado en el Anexo C.

Figura 111 – Dibujo en AutoCAD



Fuente: El autor (2020).

## 5 RESULTADOS

En este capítulo serán presentados brevemente los resultados obtenidos en las etapas propuestas en la metodología mencionando la ubicación de estos en el trabajo:

Se elaboró un manual que consiste en un compendio de irregularidades clasificados según 4 tipos generales los cuales son: Defectos en las juntas, Fisuras y Grietas, Defectos de Superficie, Otros defectos. Para cada uno de estos fueron expuestos aspectos como causas, forma de inspección, grado de severidad, representación gráfica y fotográfica, etc. Este manual se encuentra disponible en el Anexo A de este documento.

Además, se elaboró un documento que engloba el análisis de levantamientos ejecutados y el histórico de la pista identificándose las irregularidades con mayor ocurrencia identificadas en cada levantamiento; se comparó el resultado de los levantamientos manual (2016) y automatizado (2019) que identificaron una condición de pavimento mayormente buena y muy buena respectivamente; resaltándose las diferencias de ejecución de cada levantamiento y su influencia en el resultado, en base a esta comparativa se propone un nuevo proyecto para la pista de aguas abajo. El análisis de los levantamientos e histórico se encuentra disponible en el Anexo B.

El proyecto propuesto consiste en un proyecto de pavimento de hormigón simple de espesor de 24 centímetros con armadura no estructural destinada a combatir los esfuerzos de retracción compuesta por una malla Q335, barras de anclaje de  $\varnothing$  12,5 mm L=80 cm @ 68 cm, pasadores de  $\varnothing$  32,0 mm L=460 cm @ 30 cm. Con juntas de retracción espaciadas mayormente a cada 4,25 m con abertura de 10 mm (demás espaciamientos pueden ser consultados en el plano) y empleo de juntas de expansión con abertura de 25 mm coincidentes con las juntas de dilatación de la represa. Este proyecto contempla una serie de diferencias en relación con el proyecto original como la inclusión de una malla de acero mas densa para combatir los esfuerzos de retracción, empleo de barras de anclaje y articulación en toda su extensión.

Se propone también backer rod y silicona autonivelante tipo 890-SL en base a sus propiedades como resistencia a intemperie y rayos U.V o similares para el sellado de las juntas. Para la ejecución de la impermeabilización de la subrasante compuesta por la losa de la casa de fuerza se propone una membrana híbrida de poliuretano junto con una capa de amortiguamiento compuesta por fieltro asfáltico y composición de emulsión asfáltica, arena fina y cemento.

Se propone la ejecución del hormigonado en etapa única por faja de tráfico entre una junta de expansión y otra.

El memorial de cálculo, proyecto geométrico y plano del proyecto propuesto se encuentra disponible en el Anexo C.

## 6 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSIONES

El pavimento rígido es una muy buena opción cuando se trata de recibir cargas de tráfico pesado, no obstante, su desempeño está condicionado a distintas variables como un proyecto bien diseñado, una buena ejecución del pavimento, empleo de materiales correctos, entre otras.

Mediante el análisis fue posible verificar la rigurosidad y objetividad del análisis automatizado, demostrando buena precisión en la obtención y catálogo de los defectos, sin embargo, fue posible apreciar limitaciones que fácilmente pueden ser subsanadas como por ejemplo el alcance transversal del láser del scanner del pavimento. Es importante mencionar que el uso de estas tecnologías es relativamente nuevo en el Brasil, pero su uso trae consigo mejoras considerables en la objetividad de los levantamientos, reducción del tiempo empleado, flexibilidad de ejecución de los levantamientos, etc.; sin embargo, es importante puntuar la principal desventaja de estas nuevas tecnologías que es el costo que supone y que muchas veces termina siendo un factor decisivo en la decisión de su uso.

Se estudió la posibilidad de conocer la estructura y estratigrafía de un pavimento con buena precisión sin necesidad de recurrir a ensayos destructivos mediante el análisis de los datos de FWD y GPR disponibles resultando satisfactorio el empleo de dichas tecnologías para lo supra mencionado.

Se verificó el impacto que pequeñas alteraciones en el proyecto pueden provocar en el comportamiento del pavimento, tras el análisis de los defectos presentados en ambas pistas paralelas fue posible evidenciar la importancia del proyecto geométrico de un pavimento, especialmente en lo que respecta al espaciamiento, disposición y sellado de juntas, para garantizar el buen desempeño del pavimento.

Analizando el histórico de las pistas de aguas abajo y de aguas arriba fue posible concluir que el volumen de tráfico no es un factor tan decisivo en el comportamiento del pavimento como lo es el tipo de tráfico que transita por este, siendo más perjudicial cuando el tipo de tráfico es mayoritariamente pesado.

Otro factor decisivo en el desempeño de un pavimento es el correcto mantenimiento y reparación, fue posible observar que la prontitud de acción en lo que a mantenimiento y reparaciones respecta permite subsanar las manifestaciones

patológicas y garantizar por medio de modificaciones de proyecto un mejor desempeño evitando que el pavimento venga a fallar tempranamente.

Los softwares para cálculo utilizados se demostraron útiles y con un desempeño satisfactorio en la reducción de tiempo empleado para los dimensionamientos.

En este pavimento en específico el método AASHTO 93 arrojó un espesor necesario considerablemente mayor para el pavimento en relación con el PCA-84 indicando una mayor economía al implementar el método PCA-84.

Los objetivos generales y específicos fueron alcanzados con satisfacción, y el trabajo fue provechoso para adquirir amplio conocimiento en el área de pavimentos de hormigón.

## 6.2 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se sugieren algunos posibles trabajos futuros:

- Estudiar la implementación/ Elaborar un código o programa que permita identificar con buena precisión el volumen de tráfico de una vía.
- Ejecutar un levantamiento por dron y comparar con los levantamientos aquí presentados;
- Proponer un proyecto de ejecución de reparos del pavimento atendiendo los defectos presentados y las normativas existentes;
- Evaluar el desempeño de la estructura del pavimento proyectada mediante análisis de elementos finitos;
- Proyectar un pavimento con las mismas variables de entrada haciendo uso de programas de elementos finitos y comparar con los métodos tradicionales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guia AASHTO para diseño de estructura de pavimentos**, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 325. **Guide for design of jointed concrete pavements for streets and local roads (ACI 325.12R-02)**. Farmington Hills, 2002, 32 p.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p. (978-85-86238-90-1).

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2010. 504 p. Disponible en: <http://www.ufjf.br/pavimentacao/videos/livro-pavimentacao-asfaltica/>. Acceso en: 23 marzo 2020.

BIANCHI, F. R.; BRITO, I. R.; CASTRO, V. A. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Salvador: Ibracon, 2008. 16 slides, color. Disponible en: [http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav\\_apresentacoes/isis\\_raquel.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/isis_raquel.pdf). Acceso en: 22 marzo 2020.

DIRCAIBEA - CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA. M5.2. **Catálogo de deterioros de pavimentos rígidos**. [S. l.: s. n.], 2002. v. 12.

DELATTE, N. J. **Concrete, pavement design, construction, and performance**. 2. ed. Flórida: Taylor & Francis Group, 2014.

FDOT - FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **FDOT Design standards: CONCRETE PAVEMENT JOINT**. [S. l.: s. n.], 2019.

Federal Highway Administration. **Using falling weight deflectometer data with mechanistic-empirical design and analysis: guidelines for deflection testing, analysis, and interpretation**. FHWA-HRT-16-011. ed. Springfield, VA 22161: National Technical Information Service, dic. 2017. 122 p. v. III.

FRITSCH, K. **Análise comparativa de manifestações patológicas em pistas paralelas de pavimento rígido**. 2016. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Dinâmica das Cataratas, Foz do Iguaçu, 2016.

GRIFFITHS, G.; THOM, N. **Concrete pavement design guidance notes**. Inglaterra: Taylor & Francis Group, 2007.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River, USA: PEARSON, 2004. 775 p.

ITAIPU BINACIONAL. **Relatório técnico do estado atual do pavimento da pista de jusante da casa de força – Elevação 144,00.** 1988. 62p.

ITAIPU BINACIONAL. **Levantamiento no destructivo de condiciones actuales y evaluación de pavimento existente del área industrial y la subestación de margen derecha de la central hidroeléctrica de Itaipu.** 2020. 798p.

LOPES, O. A. **Uso do GPR (Ground Penetrating Radar) em trechos de pavimentos da Cidade Universitária da UFRJ.** Orientador: Laura Maria Goretti da Motta. 2009. 185p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2009.

MATHEW, T. V.; RAO, K. V. **Introduction to transportation engineering.** Mumbai: Nptel, 2007. Disponible en: <https://nptel.ac.in/courses/105101087/>. Acceso en: 20 marzo 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 060/2004 - PRO. **Pavimento rígido - Inspeção visual - Procedimento.** Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponible em: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit060\\_2004\\_pro.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit060_2004_pro.pdf). Acceso en: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 061/2004 - TER. **Pavimento rígido – Defeitos – Terminologia.** Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponible en: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/terminologia-ter/dnit061\\_2004\\_ter.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/terminologia-ter/dnit061_2004_ter.pdf). Acceso en: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 062/2004 - PRO. **Pavimento rígido – Avaliação Objetiva – Procedimento.** Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponible en: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit062\\_2004\\_pro.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit062_2004_pro.pdf). Acceso en: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 067/2004 - ES. **Pavimento rígido – Reabilitação – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponible en: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit067\\_2004\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit067_2004_es.pdf). Acceso en: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentos rígidos.** Rio de Janeiro, 2005. 234p. (IPR. Publ. 714).

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3.ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006. 384p. (IPR. Publ. 723).

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de recuperação de pavimentos rígidos**. Rio de Janeiro, 2010. 140p. (IPR. Publ. 737).

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011. 189p. (IPR. Publ. 745).

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Coordenação geral dos planejamentos de programação de investimentos**. [S. l.: s. n.], 2021.

MOPC - MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES (Paraguay). **Manual de carreteras del Paraguay**: Normas para la estructura del pavimento. 1. ed. Paraguay: [s. n.], 2011. v. I - Tomo 2.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários de pisos industriais de concreto**. 2000. 216p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos - SP.

PICKETT, G.; RAY, G. **Influence charts for rigid pavements**. American Society of Civil Engineers (ASCE), Estados Unidos de América, v. 116, p. 49-73, 1951.

SALLES DE SALLES, L.; BALBO, J. **Tecnologia de pavimentação em hormigón continuamente armado para rodovias de alta durabilidade. cbr&c brasvias**. Brasília: setembro/2015 Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/284185781\\_TECNOLOGIA\\_DE\\_PAVIMENTO\\_ARMADO\\_EM\\_HORMIGÓN\\_CONTINUAMENTE\\_ARMADO\\_PARA\\_RODOVIAS\\_DE\\_ALTA\\_DURABILIDADE/](https://www.researchgate.net/publication/284185781_TECNOLOGIA_DE_PAVIMENTO_ARMADO_EM_HORMIGÓN_CONTINUAMENTE_ARMADO_PARA_RODOVIAS_DE_ALTA_DURABILIDADE/). Acesso em: 23 marzo 2020.

SANTOS, A. F. et al. **A utilização do GEORADAR de penetração no subsolo (GPR) na determinação estratigráfica do pavimento da rodovia do câmpus da UEG-ANÁPOLIS-GO**. Coordenação Geral do Planejamento de Programação de Investimentos, [S. l.], p. 1-10, 3 dic. 2015.

SANTOS, C. R. **Dimensionamento e análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística**. Orientador: Liedi L. B. Bernucci. 2011. Tese (Doutor em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2011.

SCABELLO, D. T. **Estudo sobre aplicabilidade do processo de inventário funcional de pavimentos rígidos com o emprego do equipamento pavement scanner e validação de resultados.** Orientador: Prof.Dr. Carlos Yukio Suzuki. 2018. 256p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. I.], 2018.

SECRETARIA MUNICIPAL DE DEFESA SOCIAL E TRÂNSITO. **Muralha digital começa a funcionar.** Curitiba, 5 jan. 2021. Disponible en: <https://transito.curitiba.pr.gov.br/noticias/prefeitura/muralha-digital-comeca-a-funcionar/57562>. Acceso en: 21 abr. 2021.

SILVA, J. E.; CARNEIRO, L. A. **Pavimentos de concreto: histórico, tipos e modelos de fadiga.** Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2014.

SUHAO, L. *et al.* **Vehicle type detection based on deep learning in traffic scene.** 8TH INTERNATIONAL CONGRESS OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY (ICICT-2018). China, 2018. Procedia Computer Science 131, 2018. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/325085672\\_Vehicle\\_type\\_detection\\_based\\_on\\_deep\\_learning\\_in\\_traffic\\_scene](https://www.researchgate.net/publication/325085672_Vehicle_type_detection_based_on_deep_learning_in_traffic_scene). Acceso en: 21 abr. 2021.

TAYABJI, S.; COLLEY, B. Analysis of jointed concrete pavements: Interim report. FHWA/RD-86/041, Estados Unidos de América, 1984, 73p.

VÁSQUEZ, L. **Ecuaciones AASHTO 1993 – EQAASHTO93 ver 2.0: concepción y ejemplos de aplicación,** 2004.

WESTERGAARD, H. **Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis.** Public Roads, Estados Unidos de América, v. 7, n. 2, p. 25-35, 1926.

ZHANG, H. *et al.* **Real-time traffic analysis using deep learning techniques and uav based video.** INTERNATIONAL WORKSHOP ON TRAFFIC AND STREET SURVEILLANCE FOR SAFETY AND SECURITY. Taiwan, 2019. 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS) [...]. [S. l.: s. n.], 2019. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/336983895\\_Real-Time\\_Traffic\\_Analysis\\_using\\_Deep\\_Learning\\_Techniques\\_and\\_UAV\\_based\\_Video](https://www.researchgate.net/publication/336983895_Real-Time_Traffic_Analysis_using_Deep_Learning_Techniques_and_UAV_based_Video). Acceso en: 21 abr. 2021.

**APÉNDICE A – MANUAL UNIFICADO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE  
DEFECTOS PRESENTES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS**



**Ministerio de Educación**  
**Universidad Federal de la Integración Latinoamericana**  
**Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio**  
Centro Interdisciplinar de Tecnología e Infraestructura  
Ingeniería Civil de Infraestructura

## **MANUAL UNIFICADO PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE DEFECTOS PRESENTES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS**

**Orientando:** Christian Gabriel González Denton

**Orientador:** Prof°. Dr°. Noé Villegas Flores

Foz de Iguazú, PR

Junio de 2021

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Representación gráfica del escalonamiento de juntas. ....	151
<b>Figura 2</b> – Escalonamiento de Juntas .....	151
<b>Figura 3</b> – Representación Gráfica de deficiencias en el sellado de las juntas – En planta .....	152
<b>Figura 4</b> – Falla en el sellante.....	152
<b>Figura 5</b> – Representación gráfica del desportillamiento en las juntas.....	153
<b>Figura 6</b> – Desportillamiento en las juntas.....	153
<b>Figura 7</b> – Representación gráfica del desportillamiento en las esquinas .....	154
<b>Figura 8</b> – Desportillamientos en las esquinas .....	154
<b>Figura 9</b> – Representación gráfica de grietas en esquina. ....	156
<b>Figura 10</b> – Grietas en Esquina .....	156
<b>Figura 11</b> – Representación gráfica de grietas longitudinales (Izquierda) y transversales (Derecha) .....	157
<b>Figura 12</b> – Grietas longitudinales (Izquierda) y Transversales (Derecha).....	157
<b>Figura 13</b> – Representación gráfica de placa dividida.....	158
<b>Figura 14</b> – Placa Dividida.....	158
<b>Figura 15</b> – Representación gráfica de quiebres localizados .....	159
<b>Figura 16</b> – Quiebres localizados .....	159
<b>Figura 17</b> – Representación gráfica del desgaste superficial .....	161
<b>Figura 18</b> – Desgaste superficial .....	161
<b>Figura 19</b> – Representación gráfica de fisuras por retracción .....	162
<b>Figura 20</b> – Fisuras por retracción.....	162
<b>Figura 21</b> – Representación gráfica de fisuras superficiales y descamación.....	163
<b>Figura 22</b> – Fisuras superficiales y descamación .....	163
<b>Figura 23</b> – Representación gráfica de bache originado probablemente por la fisura de esquina.....	164
<b>Figura 24</b> – Baches o agujeros.....	164
<b>Figura 25</b> – Representación Gráfica del Levantamiento de Placa en Junta. ....	166
<b>Figura 26</b> – Levantamiento de Placas .....	166
<b>Figura 27</b> – Representación gráfica del desnivel calzada - banquina.....	167
<b>Figura 28</b> – Desnivel calzada - banquina .....	167

<b>Figura 29</b> – Representación gráfica de grandes reparaciones .....	168
<b>Figura 30</b> – Grandes reparaciones .....	168
<b>Figura 31</b> – Representación gráfica de pequeñas reparaciones .....	169
<b>Figura 32</b> – Pequeñas reparaciones.....	169
<b>Figura 33</b> – Representación gráfica de asentamiento .....	170
<b>Figura 34</b> – Asentamiento .....	170
<b>Figura 35</b> – Representación gráfica del bombeo .....	171
<b>Figura 36</b> – Bombeo .....	171
<b>Figura 37</b> – Pasos de nivel .....	172
<b>Figura 38</b> – Representación gráfica de placa bailarina.....	173
<b>Figura 39</b> – Placa Bailarina.....	173

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> – Clasificación de los Defectos .....	149
<b>Tabla 2</b> – Grado de severidad de las juntas desportilladas .....	153
<b>Tabla 3</b> – Grado de Severidad de las esquinas desportilladas y/o quebradas .....	154

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>149</b>
<b>DEFECTOS EN LAS JUNTAS .....</b>	<b>150</b>
1.1 Escalonamiento de Juntas.....	151
1.2 Deficiencias en el sellado de las juntas .....	152
1.3 Desportillamiento en las juntas .....	153
1.4 Desportillamiento en las esquinas .....	154
<b>FISURAS Y GRIETAS .....</b>	<b>155</b>
1.5 Grietas de Esquina .....	156
1.6 Grietas Lineales (Longitudinal y Transversal).....	157
1.7 Placa dividida.....	158
1.8 Quiebres localizados .....	159
<b>DEFECTOS DE SUPERFICIE .....</b>	<b>160</b>
1.9 Desgaste Superficial.....	161
1.10 Fisuras por retracción plástica .....	162
1.11 Fisuras superficiales y descamación .....	163
1.12 Baches o Agujeros.....	164
<b>OTROS DEFECTOS .....</b>	<b>165</b>
1.13 Levantamiento de placas .....	166
1.14 Desnivel Calzada - Banquina.....	167
1.15 Grandes Reparaciones.....	168
1.16 Pequeñas Reparaciones .....	169
1.17 Asentamiento.....	170
1.18 Bombeo .....	171
1.19 Pasos de Nivel.....	172
1.20 Placa Bailarina.....	173
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>174</b>

## INTRODUCCIÓN

El siguiente manual es una compilación de los defectos que se presentan en los pavimentos rígidos con el objetivo de proporcionar una base para la inspección visual de los pavimentos e identificación de las irregularidades presentes en la superficie de este, sus causas, grado de severidad, futuros defectos, etc.

Según DNIT (2004) para fines de inspección visual y evaluación del estado de pavimentos los defectos evaluados son: Levantamiento de placas, fisuras de esquina, placa dividida, escalonamiento en las juntas, falla en el sellante de las juntas, desnivel calzada-banquina, fisuras lineales, grandes o pequeñas reparaciones, desgaste superficial, bombeo, quiebras localizadas, pasos de nivel, fisuras superficiales (tipo malla), fisuras de retracción plástica, quiebres en las esquinas, desportillamiento en los bordes de las juntas, placa saltarina, asentamiento y baches o agujeros.

Serán clasificados como defectos en las juntas, fisuras y grietas, deterioro superficial u otros defectos conforme tabla a seguir:

**Tabla 1 – Clasificación de los Defectos**

Defectos en las Juntas	Fisuras y Grietas	Defectos de Superficie	Otros Defectos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escalonamiento de Juntas;</li> <li>• Deficiencias en el sellado de las juntas;</li> <li>• Desportillamiento en las Juntas;</li> <li>• Desportillamiento en las esquinas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grietas de Esquina;</li> <li>• Grietas Lineales (Longitudinal y Transversal);</li> <li>• Placa Dividida;</li> <li>• Quiebres localizados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desgaste Superficial;</li> <li>• Fisuras por retracción;</li> <li>• Fisuras superficiales (Tipo malla y descamación);</li> <li>• Baches o Agujeros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantamiento de Placas;</li> <li>• Desnivel Calzada-Banquina;</li> <li>• Grandes Reparaciones;</li> <li>• Pequeñas Reparaciones;</li> <li>• Asentamiento;</li> <li>• Bombeo;</li> <li>• Pasos de Nivel;</li> <li>• Placa Bailarina.</li> </ul>

**Fuente:** El Autor (2020).

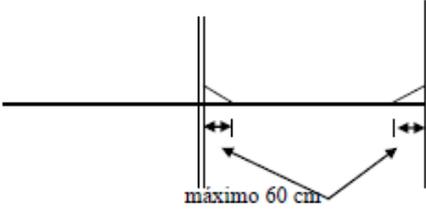
Los defectos se analizan conforme un grado de severidad asociada (bajo, intermedio, alto) y tras una evaluación general se puede conocer el estado del pavimento.

**DEFECTOS EN LAS JUNTAS**

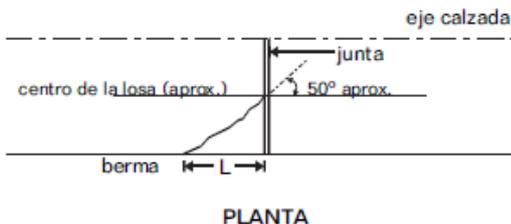
1.1 ESCALONAMIENTO DE JUNTAS				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Placas adyacentes desniveladas entre sí en la junta.	Desnivel entre dos placas en forma de escalón.	Deficiencia en el traspaso de carga o asentamiento diferencial por pérdida de soporte en la fundación.	En juntas, pudiendo también ocurrir en grietas.	Desportillamiento en juntas
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 1 – Representación gráfica del escalonamiento de juntas.</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Fuente: DIRCAIBEA (2002)</b></p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Disminución del soporte de la fundación; Asentamientos diferenciales; Ausencia o deficiencia en el traspaso de carga; Drenaje insuficiente.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	Desnivel entre 3 a 10 milímetros		Se cuenta una única placa cuando ocurre en la junta. No se considera cuando ocurre en grieta para cálculo del ICP.	
Intermedio	Desnivel entre 10 y 20 milímetros			
Alto	Desnivel mayor a 20 milímetros			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se identifica las placas afectadas y se procede a la medición del desnivel entre las mismas, se desconsidera el desnivel en grietas.			<p style="text-align: center;"><b>Figura 2– Escalonamiento de Juntas</b> <b>Fuente: BALBO (2009)</b></p>	

1.2 DEFICIENCIAS EN EL SELLADO DE LAS JUNTAS				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Avería en el sellante que posibilita la infiltración de agua o acumulación de material incompresible.	Material inadecuado; ausencia, endurecimiento o rompimiento del sellante; intrusión de finos o vegetación.	Producto de mala calidad o envejecimiento del sellante; defectos en la ejecución.	En las juntas de las placas.	Levantamiento de placas, escalonamiento, fisuras, alteración de la fundación, etc.
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 3</b> – Representación Gráfica de deficiencias en el sellado de las juntas – En planta</p>  <p style="text-align: center;"><b>Fuente:</b> El autor (2020)</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Mala calidad; cantidad insuficiente; material inadecuado; rompimiento por esfuerzos de tracción o compresión; crecimiento de vegetación; envejecimiento.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	Buen estado y desempeño del sellante, mínimo de defectos en áreas localizadas		La cantidad de defectos se basa en la relación entre la condición general del sellante y el área global considerada	
Intermedio	Condición del sellante razonable, uno o más defectos ocurriendo en grado moderado			
Alto	Sellante en malas condiciones, necesita sustitución inmediata			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se identifican y cuantifican las juntas deterioradas, en la ficha de inspección deberá ser lanzada los grados de severidad, posteriormente se indican en anexos el tipo de avería (rompimiento, extrusión, crecimiento de vegetación, baja adherencia, falta de material, endurecimiento, etc.) y su posible causa. Puede ser anexada una muestra del material sellante.			 <p style="text-align: center;"><b>Figura 4</b>– Falla en el sellante <b>Fuente:</b> BALBO (2009)</p>	

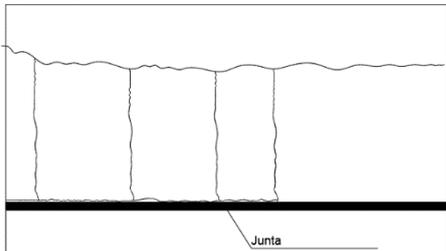
1.3 DESPORTILLAMIENTO EN LAS JUNTAS					
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías	
Quiebre en forma de cuña que ocurre en las juntas y posee una longitud que no excede los 60 cm.	Partes quebradas, sueltas que pueden o no ser removidas fácilmente	Aumento de las tensiones en los bordes de las juntas, acción del tránsito.	En juntas entre las placas.		
Representación Gráfica					
<p><b>Figura 5 – Representación gráfica del desportillamiento en las juntas</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Fuente:</b> Adaptado de DIRCAIBEA (2002)</p>					
Características					
Hipótesis de Falla	Fisuras preexistentes gracias al serrado prematuro, ausencia de agregados resistentes, exceso de argamasa, infiltración de material incompresible que provoca compresión en el borde de la junta.				
Grados de Severidad y Descripción				Conteo	
<b>Tabla 2 – Grado de severidad de las juntas desportilladas</b>				Se cuenta la cantidad de placas afectadas por el defecto. Se registra la ocurrencia de mayor severidad en cada placa.	
Parte desportillada		Ancho (mm)	Largo (cm)		
Firme – No puede ser removida fácilmente, algunos pedazos pueden faltar.		< 100	< 60		> 60
		> 100	B		B
Sueeltas – Pueden ser removidas, falta la mayor parte o todos los pedazos, rasa (<25mm).		< 100	B		M
		> 100	B	M	
Ausentes – Gran parte o totalmente removida.		< 100	B	M	
		> 100	M	A	
<b>Fuente:</b> Adaptado de DNIT (2004).					
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica		
Se procede a la medición de la longitud y anchura de las partes desportilladas y se determina el grado de severidad conforme la tabla arriba mencionada.			<p style="text-align: center;"><b>Figura 6– Desportillamiento en las juntas</b> <b>Fuente:</b> BALBO (2009)</p>		

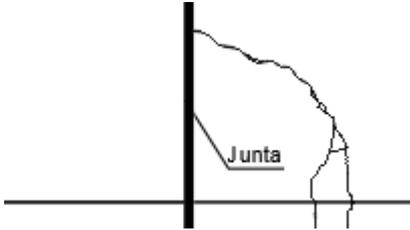
1.4 DESPORTILLAMIENTO EN LAS ESQUINAS																		
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías														
Quiebres de la placa en forma de cuña en las esquinas.	Parte quebrada en forma de cuña (diferente a las fisuras de esquina que son verticales en toda la espesura de la placa).	Aumento de las tensiones, retirada de formas brusca.	En las esquinas de placas, entre dos juntas, ocurren a una distancia inferior a 60 cm de la esquina.															
Representación Gráfica																		
<p><b>Figura 7</b> – Representación gráfica del desportillamiento en las esquinas</p>  <p><b>Fuente:</b> DNIT (2010).</p>																		
Características																		
Hipótesis de Falla	Retirada brusca de las formas, tránsito de vehículos que exceden el peso para la cual fue proyectada la vía																	
Grados de Severidad y Descripción				Cuento														
<p><b>Tabla 3</b> – Grado de Severidad de las esquinas desportilladas y/o quebradas</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Profundidad del quiebre (mm)</th> <th colspan="2">Dimensiones de los lados del quiebre (cm)</th> </tr> <tr> <th>13 x 13 a 30 x 30</th> <th>Más que 30 x 30</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">≤ 25</td> <td style="text-align: center; background-color: #90EE90;">B</td> <td style="text-align: center; background-color: #90EE90;">B</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">&gt; 25 a 50</td> <td style="text-align: center; background-color: #90EE90;">B</td> <td style="text-align: center; background-color: #FFFF00;">M</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">&gt; 50</td> <td style="text-align: center; background-color: #FFFF00;">M</td> <td style="text-align: center; background-color: #FF0000;">A</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><b>Fuente:</b> Adaptado de DNIT (2004).</p>				Profundidad del quiebre (mm)	Dimensiones de los lados del quiebre (cm)		13 x 13 a 30 x 30	Más que 30 x 30	≤ 25	B	B	> 25 a 50	B	M	> 50	M	A	<p>Se cuenta la cantidad de placas afectadas por el defecto. Se registra la ocurrencia de mayor severidad en cada placa.</p>
Profundidad del quiebre (mm)	Dimensiones de los lados del quiebre (cm)																	
	13 x 13 a 30 x 30	Más que 30 x 30																
≤ 25	B	B																
> 25 a 50	B	M																
> 50	M	A																
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica															
<p>Se procede a la medición de las dimensiones de las partes quebradas y su profundidad, luego se determina el grado de severidad conforme la tabla arriba mencionada.</p>			 <p><b>Figura 8</b>– Desportillamientos en las esquinas <b>Fuente:</b> BALBO (2009)</p>															

**FISURAS Y GRIETAS**

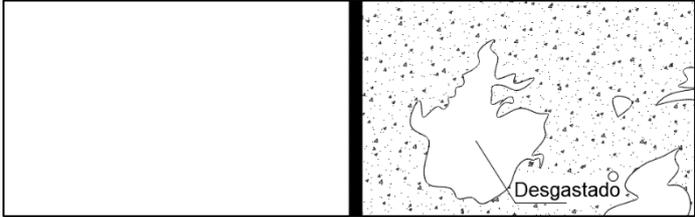
1.5 GRIETAS DE ESQUINA				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Grieta que afecta a la espesura total de la placa	Grieta en forma de semicírculo en la esquina, diferente del desportillamiento esta ocurre de forma vertical.	Fatiga del hormigón, sobrecarga.	En esquinas, intercepta a las juntas a una distancia de máximo 1,8 m. de los bordes.	
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 9</b> – Representación gráfica de grietas en esquina.</p>  <p style="text-align: center;"><b>PLANTA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Fuente:</b> DIRCAIBEA (2002)</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Fatiga del hormigón, espesor insuficiente, sobrecarga, traspaso de cargas deficiente.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	El área comprendida entre la fisura de esquina y la junta no está fisurada		Se cuenta una placa cuando posea una fisura de esquina, más de una del mismo nivel severidad o dos con diferente grado de severidad (se cuenta el mayor).	
Intermedio	El área comprendida entre la fisura de esquina y la junta presenta como máximo dos fisuras			
Alto	Hay más de dos fisuras entre la junta y la fisura de esquina			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se establece el número de fisuras o grietas de esquina y en base a eso determinar el grado de severidad del defecto en la placa.			 <p style="text-align: center;"><b>Figura 10</b>– Grietas en Esquina <b>Fuente:</b> BALBO (2009)</p>	

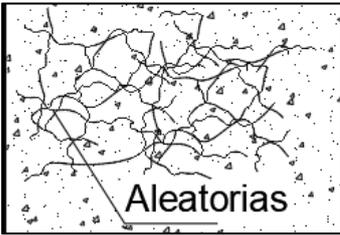
1.6 GRIETAS LINEALES (LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL)				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Fisuras que afectan a la placa por completo.	Fisuras longitudinales o transversales que dividen a la placa en dos o tres partes.	Longitudinales: Fatiga, serrado de profundidad insuficiente o en tiempo tardío etc. Transversales; Fatiga del hormigón, serrado deficiente.	Longitudinales (perpendicular a las juntas), Transversales (paralelas a las juntas) o Diagonales.	Placa Dividida, Quiebres localizados.
Representación Gráfica				
<b>Figura 11</b> – Representación gráfica de grietas longitudinales (Izquierda) y transversales (Derecha)				
<b>Fuente:</b> DIRCAIBEA (2002)				
Características				
Hipótesis de Falla	Longitudinales: Fatiga del hormigón, atraso en serrado de las juntas, serrado de espesura insuficiente, asentamiento, ancho excesivo de losa. Transversales: Fatiga a largo plazo, baja resistencia, espesura insuficiente, longitud excesiva (fisura en centro de la losa); espesura insuficiente, serrado tardío (fisura próxima a las juntas).			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	Fisuras sin tratamiento con ancho inferior a 12 mm, o fisuras con cualquier abertura que hayan recibido tratamiento y estén en buenas condiciones. Sin escalones		Las fisuras de alto y medio grado de severidad son consideradas defectos estructurales. El número de defectos depende del grado de severidad de este defecto, dos fisuras de grado medio implican en alto grado de severidad.	
Intermedio	Aquellas con abertura entre 12 y 50 mm con escalones menores a 10 mm, y fisuras con tratamiento de cualquier abertura y escalones menores a 10 mm.			
Alto	Fisuras sin tratamiento con abertura superior a 50 mm, fisuras que presenten escalones de más de 10 mm con o sin tratamiento.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Determinar la cantidad de fisuras en la placa y la cantidad de pedazos en que queda dividida, determinar también la anchura de las fisuras, si posee tratamiento, la condición en la que se encuentren y el escalonamiento que provoquen.				
			<b>Figura 12</b> – Grietas longitudinales (Izquierda) y Transversales (Derecha). <b>Fuente:</b> BALBO (2009)	

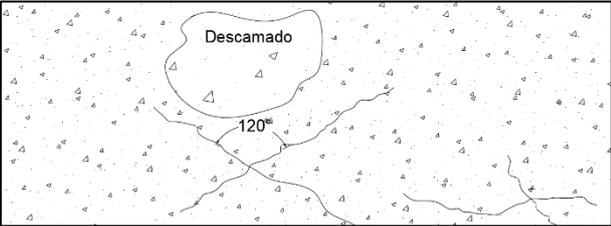
1.7 PLACA DIVIDIDA				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Fisuras que dividen a la placa en cuatro o más pedazos, asociado a un surgimiento previo de fisuras longitudinales y transversales.	Fisuras que afectan a la placa y la dividen en cuatro o más partes.	El defecto es consecuencia de la aparición y agravamiento de fisuras.	En la extensión total de la placa.	Surgencia de Finos (Asociado al defecto cuando penetra el agua).
<b>Representación Gráfica</b>				
<b>Figura 13 – Representación gráfica de placa dividida</b>				
				
<b>Fuente:</b> El autor (2020)				
<b>Características</b>				
Hipótesis de Falla	Deficiencia en el soporte de la fundación, espesor de pavimento insuficiente, fatiga del hormigón.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
Bajo	Placa dividida en más de cuatro pedazos, cuatro a 8 pedazos con fisuras leves			Cuando la placa tiene un grado de severidad de este defecto medio o alto no se debe registrar ningún otro defecto.
Intermedio	Placa dividida en más de 8 pedazos con fisuras no tan severas, entre 4 a 8 con fisuras de severidad media o entre 4 a 5 con fisuras de alta severidad.			
Alto	Placa dividida en más de 8 pedazos con fisuras de severidad media, o en más de 6 pedazos con fisuras de severidad alta.			
<b>Forma de inspección y medición</b>			<b>Representación Fotográfica</b>	
Determinar la cantidad de fisuras en la placa y la cantidad de pedazos en que queda dividida, determinar la severidad de las fisuras en la placa, cuando se presenta este defecto en una placa, con severidad media o alta, no se registra otros defectos.				
			<b>Figura 14– Placa Dividida</b> <b>Fuente:</b> BALBO (2009)	

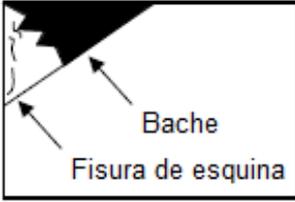
1.8 QUIEBRES LOCALIZADOS				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Área de la losa agrietada y partida de forma variada.	Área dividida en varios pedazos por fisuras de distinto grado de severidad.	Consecuencia de la aparición y agravamiento de fisuras.	Las áreas de la losa agrietadas y partidas se sitúan entre una grieta y una junta o dos grietas próximas entre sí.	
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 15 – Representación gráfica de quiebres localizados</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>Fuente:</b> DNIT (2010).</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Deficiencia en el soporte de la fundación, espesor de pavimento insuficiente, fatiga del hormigón (Causantes de fisuras en general).			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	Placa dividida en 2 a 5 pedazos con fisuras de baja severidad, placa dividida en 2 a 3 pedazos con fisuras de severidad media.		Si en la placa hay más de un área afectada por este tipo de defecto, será considerado el área con mayor nivel de severidad.	
Intermedio	Placa Dividida en más de 5 pedazos por fisuras de baja severidad, dividida en 4 a 5 pedazos por fisuras de media severidad, dividida en 2 a 3 pedazos con fisuras de alta severidad.			
Alto	Dividida en más de 5 pedazos y fisuras de media severidad, dividida en más de 4 pedazos y fisuras de severidad alta.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Determinar el número de áreas afectadas por este defecto y el grado de severidad de cada una de ellas, considerando la severidad de las fisuras y la cantidad de pedazos en la que se encuentra dividida la placa. No obstante, solo será contabilizada el área que presente mayor grado de severidad			 <p style="text-align: center;"><b>Figura 16– Quiebres localizados</b> <b>Fuente:</b> BALBO (2009)</p>	

**DEFECTOS DE SUPERFICIE**

1.9 DESGASTE SUPERFICIAL				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Afloramiento de los agregados gruesos debido a la remoción de argamasa superficial.	Afloramiento de agregados gruesos, ausencia de argamasa superficial, inclusive puede darse agregados pulidos.	Despegue de la argamasa de recubrimiento.	En la superficie de la placa.	Baches
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 17 – Representación gráfica del desgaste superficial</b></p>  <p><b>Fuente:</b> El autor (2020)</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Hormigón de baja calidad, agregados sucios, agua excesiva en la mezcla, hormigón con elevada exudación, acumulo de agua después del acabado.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
No hay grados de severidad definidos, sin embargo, el defecto deberá ser anotado.				Se anota cada placa que presente este defecto.
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se anota cada placa que presenta el defecto y se analiza la posible causa del defecto, además se anota si fue anexada alguna muestra de la argamasa superficial.			 <p><b>Figura 18– Desgaste superficial</b> <b>Fuente:</b> BALBO (2009)</p>	

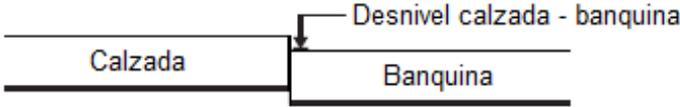
1.10 FISURAS POR RETRACCIÓN PLÁSTICA				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Fisuras superficiales, pequeñas y conectadas de incidencia aleatoria en la superficie de la placa.	Fisuras poco profundas, abertura inferior a 0,5 mm y longitud limitada. Forman ángulos de 45° a 60° con relación al eje longitudinal.	Retracción del hormigón antes del inicio del fraguado.	En la superficie de la placa	Fisuras superficiales
Representación Gráfica				
<b>Figura 19</b> – Representación gráfica de fisuras por retracción				
				
<b>Fuente:</b> El autor (2020)				
Características				
Hipótesis de Falla	Retracción plástica previo al inicio del fraguado.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
	No hay grados de severidad definidos, sin embargo, el defecto deberá ser anotado.			Se cuentan las placas que presenten este defecto
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se inspeccionan visualmente las placas teniendo en cuenta las características de las fisuras de este tipo y se anotan todas las placas que presentan este defecto.				
			<b>Figura 20</b> – Fisuras por retracción <b>Fuente:</b> DNIT (2010)	

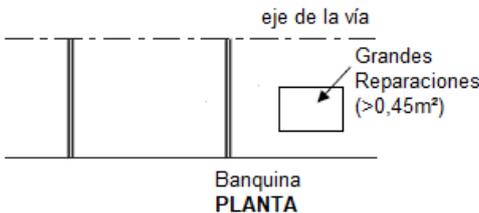
1.11 FISURAS SUPERFICIALES Y DESCAMACIÓN				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Fisuras capilares de profundidad de entre 6mm a 13mm.	Fisuras que se interceptan formando ángulos de 120° entre sí. Despegue de la capa superficial fisurada	Deficiencias en el curado del hormigón; evolución de defectos como desgaste superficial.	Fisuras superficiales y despegue de la parte superficial fisurada (descascaramiento)	
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 21</b> – Representación gráfica de fisuras superficiales y descamación</p>  <p><b>Fuente:</b> El autor (2020)</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Ejecución ineficiente del curado del hormigón y/o amasado; dosaje incorrecto del hormigón, evolución de defectos.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	Fisuras superficiales en gran parte de la placa, superficie en buenas condiciones, poca descamación.		Se cuenta cada placa con descascaramiento, si el nivel de severidad es bajo registrar solo si el descascaramiento es inminente	
Intermedio	Área con descascaramiento inferior al 15% de la placa			
Alto	Descascaramiento en más del 15% del área de la placa			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se inspeccionan las placas teniendo en cuenta las características presentadas en la descripción del defecto e inspección visual, se anota la severidad del defecto considerando el área fisurada o descascarada como arriba mencionado.			 <p><b>Figura 22</b>– Fisuras superficiales y descamación <b>Fuente:</b> DNIT (2010)</p>	

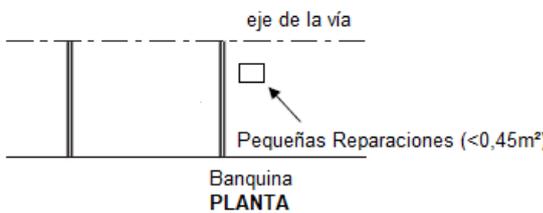
1.12 BACHES O AGUJEROS				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Cavidades cóncavas normalmente de forma redondeadas que provocadas por la pérdida del hormigón en el local.	Diámetro variando de 25 a 100 mm y profundidad superior a 15 mm.	Perdida del hormigón consecuente de la evolución de otros defectos, acción de los vehículos.	En la superficie de la placa.	
<b>Representación Gráfica</b>				
<p><b>Figura 23</b> – Representación gráfica de bache originado probablemente por la fisura de esquina.</p> <div style="text-align: center;">  <p>El diagrama muestra un detalle de la esquina de una placa de hormigón. Una línea diagonal indica una fisura que se extiende desde la esquina hacia el interior. Una zona sombreada y irregular en la superficie superior de la placa indica un bache. Flechas apuntan desde las etiquetas 'Bache' y 'Fisura de esquina' hacia sus respectivos elementos en el diagrama.</p> </div> <p><b>Fuente:</b> Adaptado de DNIT (2004).</p>				
<b>Características</b>				
Hipótesis de Falla	Defectos constructivos, hormigón poco homogéneo o de baja calidad, asentamientos debido a capas inferiores inestables, acción del tráfico.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
	No hay grados de severidad definidos, el defecto deberá ser anotado y evaluado conforme al defecto que lo causo.		Se cuentan las placas que presenten este defecto	
<b>Forma de inspección y medición</b>			<b>Representación Fotográfica</b>	
Se inspeccionan las placas y se cuentan aquellas afectadas por este defecto informando del posible origen de dicho defecto, se puede definir el nivel de severidad en relación al origen o según la intensidad de baches.			 <p>La fotografía muestra una superficie de hormigón con un bache irregular y profundo. El bache tiene bordes desmenuzados y una zona oscura en su interior, probablemente por humedad o sombra. Una línea vertical, posiblemente una junta de placa, se ve a la derecha del bache.</p>	
<b>Figura 24</b> – Baches o agujeros <b>Fuente:</b> BALBO (2009)				

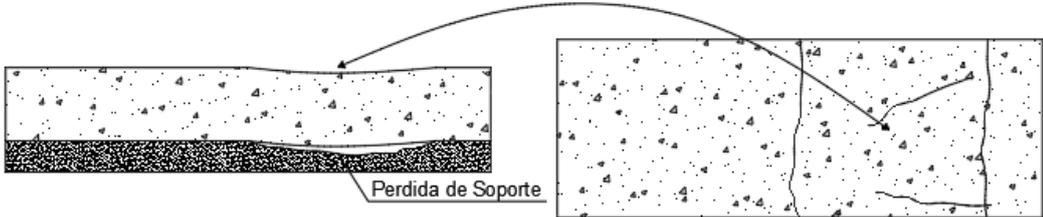
**OTROS DEFECTOS**

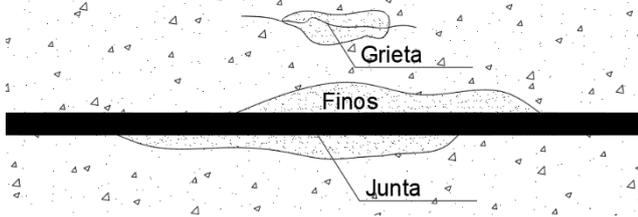
1.13 LEVANTAMIENTO DE PLACAS				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Sobreelevación de las placas en juntas, fisuras o próxima a canaletas de drenaje y obstáculos.	Levantamiento de la placa, hormigón quebrado en varios trozos.	Expansión de la placa debido a esfuerzos con restricciones.	En juntas, fisuras o cerca de obstáculos.	Rompimiento de placa; Infiltración; Obstrucción de canaletas de drenaje.
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 25 – Representación Gráfica del Levantamiento de Placa en Junta.</b></p> <p>El diagrama muestra dos vistas de una junta de placa. A la izquierda, el 'CORTE A-A' muestra un perfil de la placa que se eleva y se fragmenta en trozos. A la derecha, la 'PLANTA' muestra una vista superior de la junta, con una 'berma' (una elevación de material) formada a ambos lados de la junta. Se indican el 'eje calzada' y la 'junta' con líneas de corte 'A-A'.</p>				
Fuente: DIRCAIBEA (2002)				
Características				
Hipótesis de Falla	Variaciones térmicas excesivas; Ausencia o deficiencia de juntas de dilatación; Sellante Inadecuado; Juntas Bloqueadas por material incompresible.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
Bajo	Bajo nivel de incomodidad al transitar.			Una placa si ocurre en fisura; Si ocurre en junta afectando dos placas, se cuentan ambas.
Intermedio	Incomodidad media al transitar sin perjudicar el tráfico normal de vehículos.			
Alto	Seguridad comprometidas e interrupción del flujo de tráfico.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Inspección visual, grado de severidad en base a criterio de incomodidad al transitar, conteo de placas afectadas. Indicar con código correspondiente (1) en ficha de inspección.			<p>Una fotografía en blanco y negro que muestra una junta de placa en una superficie pavimentada. Se observa un claro levantamiento de la placa a ambos lados de la junta, formando una berma. Una línea de corte vertical está marcada en la junta.</p>	
			<p><b>Figura 26– Levantamiento de Placas</b> Fuente: BALBO (2009)</p>	

1.14 DESNIVEL CALZADA - BANQUINA				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Escalón formado entre la banquina y el borde la calzada	El borde de la calzada y la banquina se encuentran desniveladas entre sí y con una separación entre ambas.	Defecto constructivo o asentamiento.	Entre la banquina y el borde la calzada.	
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 27 – Representación gráfica del desnivel calzada - banquina</b></p> 				
Fuente: Adaptado de DIRCAIBEA (2002)				
Características				
Hipótesis de Falla	Falla de nivelado entre las pistas y la banquina, asentamientos diferenciales, perdida de soporte de la fundación.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	Desnivel entre 25 a 50 milímetros.		Se debe registrar cada placa separadamente con su respectivo nivel de severidad.	
Intermedio	Desnivel entre 50 y 100 milímetros.			
Alto	Desnivel mayor a 100 milímetros.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se establece el desnivel entre el borde del pavimento y la banquina, el cual esta caracterizado por la media entre el mayor y menor valor observado en una misma placa. Las medidas no deben estar muy distanciadas una de otra.				
			<p><b>Figura 28– Desnivel calzada - banquina</b> Fuente: BALBO (2009)</p>	

1.15 GRANDES REPARACIONES				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Correcciones de defectos preexistentes.	Correcciones de defectos preexistentes que se encuentra deteriorada en baja o alta intensidad.	Errores en la ejecución, traspaso de carga y/o capacidad estructural deficiente.	En las placas con un tamaño de área reparada que excede a 0,45 m <sup>2</sup> , pudiendo llegar a ser una nueva losa ejecutada.	Fisuras, hundimiento, incomodidad al usuario y baja calidad de rodadura.
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 29</b> – Representación gráfica de grandes reparaciones</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Adaptado de DIRCAIBEA (2002)</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Traspaso de arga deficiente, capacidad estructural insuficiente, ejecución incorrecta y problemas asociados.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
Bajo	Reparo con buen desempeño, poco o nada deteriorado.			Se cuenta cada placa que contenga el defecto.
Intermedio	Reparo parcialmente deteriorado o con fragmentación o quiebre en los bordes, puede removerse el material con esfuerzo.			
Alto	Reparo deteriorado y necesidad de sustitución inmediata.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se identifica las áreas que hayan sido reparadas y se evalúa el desempeño del reparo y su deterioro. Cuando haya más de un reparo se considera el de mayor nivel de severidad, cuando sean iguales los grados de severidad debe ser considerado apenas un reparo. Si la causa del reparo es más grave, es anotado únicamente el defecto original.			 <p style="text-align: center;"><b>Figura 30</b>– Grandes reparaciones Fuente: DNIT (2004)</p>	

1.16 PEQUEÑAS REPARACIONES				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Correcciones de defectos preexistentes.	Correcciones de defectos preexistentes que se encuentra deteriorada en baja o alta intensidad.	Problemas en la ejecución o problemas derivados del material utilizado.	En las placas con un tamaño de área reparada inferior a 0,45 m <sup>2</sup> .	Fisuras, hundimiento, incomodidad al usuario y baja calidad de rodadura.
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 31</b> – Representación gráfica de pequeñas reparaciones</p>  <p style="text-align: center;"><b>PLANTA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Fuente:</b> Adaptado de DIRCAIBEA (2002)</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Ejecución incorrecta o problemas asociados al material empleado.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
Bajo	Reparo con buen desempeño, poco o nada deteriorado.			Se cuenta cada placa que contenga el defecto.
Intermedio	Reparo parcialmente deteriorado pudiendo, con esfuerzo ser removido.			
Alto	Reparo deteriorado y necesidad de sustitución inmediata.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
<p>Se identifica las áreas que hayan sido reparadas y se evalúa el desempeño del reparo y su deterioro. Cuando haya más de un reparo se considera el de mayor nivel de severidad, cuando sean iguales los grados de severidad debe ser considerado apenas un reparo. Si la causa del reparo es más grave, es anotado únicamente el defecto original.</p>			 <p style="text-align: center;"><b>Figura 32</b>– Pequeñas reparaciones <b>Fuente:</b> DNIT (2004)</p>	

1.17 ASENTAMIENTO				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Ondulaciones en la superficie de gran extensión provocadas por el hundimiento del pavimento.	Ondulaciones en la superficie, superficie desnivelada, acompañado de otros defectos.	Problemas relacionados con la sub base y/o el soporte de la fundación.	En la superficie de las placas	
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 33 – Representación gráfica de asentamiento</b></p> 				
Fuente: El autor (2020)				
Características				
Hipótesis de Falla	Subbase ineficiente, mala ejecución de subbase, deficiencia en el soporte de la fundación.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	Asentamiento suave, sin reducción de condiciones de confort y seguridad.		A criterio del evaluador.	
Intermedio	Asentamiento visible, buenas condiciones de rodadura, pero seguridad comprometida.			
Alto	Pésimas condiciones de rodadura y de seguridad. Asentamiento pronunciado.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
La evaluación es subjetiva, para cálculo de ICP se consideran los otros defectos ocurridos en el área sujeta a este defecto.				
			<p><b>Figura 34– Asentamiento</b> Fuente: DNIT (2004)</p>	

1.18 BOMBEO				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Finos existentes en la fundación son expulsados a través de las juntas o grietas con el transitar de los vehículos.	Manchas terrosas en las juntas, grietas o bordes. Pequeños pozos o bache en la banquina.	Problemas relacionados con la subbase o de transmisión de carga.	En juntas, grietas o bordes.	Patologías relacionadas con pérdida de soporte de la fundación como asentamiento. Acelera el proceso de fatiga pudiendo provocar ruptura.
<b>Representación Gráfica</b>				
<p><b>Figura 35 – Representación gráfica del bombeo</b></p>  <p><b>Fuente:</b> El autor (2020)</p>				
<b>Características</b>				
Hipótesis de Falla	Ejecución inadecuada de la subbase, ausencia de la subbase, deficiencia en el traspaso de carga, presencia de agua entre sub base y losa.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
	No hay grados de severidad definidos, el defecto deberá ser anotado y evaluado conforme al defecto que lo causo.			Cuando ocurre en una junta, se consideran ambas placas; Si las demás juntas de esas placas presentan bombeo, serán anotadas también las placas contiguas.
<b>Forma de inspección y medición</b>			<b>Representación Fotográfica</b>	
Se inspeccionan las juntas, grietas o bordes que presenten este defecto buscando identificar manchas terrosas que señalen depósito de finos en la superficie o bien pozos en la banquina.			 <p><b>Figura 36– Bombeo</b> <b>Fuente:</b> BALBO (2009)</p>	

1.19 PASOS DE NIVEL				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Defectos que ocurren en pasos a niveles.	Elevaciones o depresiones próximas a los rieles	Falla en el proyecto o en la ejecución.	En pasos a nivel.	
Representación Gráfica				
Características				
Hipótesis de Falla	Fallas en el proyecto o ejecución deficiente del mismo.			
Grados de Severidad	Descripción		Conteo	
Bajo	El defecto causa bajo desconfort al transitar		Se cuenta el número de placas que atraviesa el riel.	
Intermedio	El defecto causa un desconfort medio al transitar, no se ve comprometida la seguridad			
Alto	Provoca incomodidad al transitar, la seguridad se ve comprometida, interrupciones en el flujo del tráfico.			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se transita por el cruce y se mide la incomodidad al transitar contando el número de placas atravesadas por el riel.				
			<b>Figura 37– Pasos de nivel</b> <b>Fuente:</b>	

1.20 PLACA BAILARINA				
Descripción	Inspección Visual	Causas Posibles	Ocurrencia	Futuras Patologías
Movimiento vertical de la placa visible bajo la acción del tráfico.	Visible bajo la acción del tráfico	Problemas relacionados con el soporte de la fundación, problemas en las juntas, tráfico pesado.	En las placas como un todo.	Bombeo y surgencia de finos, fisuras y grietas en la placa.
Representación Gráfica				
<p><b>Figura 38</b> – Representación gráfica de placa bailarina</p> <p><b>Fuente:</b> DNIT (2004)</p>				
Características				
Hipótesis de Falla	Pérdida de soporte de la fundación, juntas ineficientes, tránsito pesado.			
Grados de Severidad	Descripción			Conteo
Bajo	Desnivel entre 3 a 10 milímetros			Se cuenta cada placa que presenta movimientos verticales
Intermedio	Desnivel entre 10 y 20 milímetros			
Alto	Desnivel mayor a 20 milímetros			
Forma de inspección y medición			Representación Fotográfica	
Se identifican las placas que presentan movimiento vertical y se mide el desnivel que se provoca cuando bajo efecto del tránsito.			<p><b>Figura 39</b>– Placa Bailarina <b>Fuente:</b> DNIT (2004)</p>	

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p. (978-85-86238-90-1).

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 060/2004 - PRO. **Pavimento rígido - Inspeção visual - Procedimento**. Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponible em: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit060\\_2004\\_pro.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit060_2004_pro.pdf). Acceso en: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 062/2004 - PRO. **Pavimento rígido – Avaliação Objetiva – Procedimento**. Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponible en: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit062\\_2004\\_pro.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit062_2004_pro.pdf). Acceso en: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de recuperação de pavimentos rígidos**. Rio de Janeiro, 2010. 140p. (IPR. Publ. 737).

DIRCAIBEA - CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA. M5.2. **Catálogo de deterioros de pavimentos rígidos**. [S. l.: s. n.], 2002. v. 12.

**APÉNDICE B – ANÁLISIS DE DEFECTOS E HISTÓRICO DE LA PISTA DE  
ÁGUAS ABAJO**



**Ministerio de Educación**  
**Universidad Federal de la Integración Latinoamericana**  
**Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio**  
Centro Interdisciplinar de Tecnología e Infraestructura  
Ingeniería Civil de Infraestructura

## **ANÁLISIS DE DEFECTOS E HISTÓRICO DE LA PISTA DE AGUAS ABAJO**

**Orientando:** Christian Gabriel González Denton

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Noé Villegas Flores

Foz de Iguazú, PR

Junio de 2021

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Pista de Aguas Abajo .....	183
<b>Figura 2</b> – Sección Transversal .....	184
<b>Figura 3</b> – Proyecto Geométrico Inicial, Sección Típica y armaduras .....	185
<b>Figura 4</b> – Desplazamientos longitudinales en el pavimento .....	186
<b>Figura 5</b> – Pista de Aguas Arriba y Aguas Abajo .....	190
<b>Figura 6</b> – Planta Elaborada .....	191
<b>Figura 7</b> – Localización de las cámaras .....	192
<b>Figura 8</b> – Total de vehículos que transitan por la pista .....	192
<b>Figura 9</b> – Porcentaje de los vehículos contabilizados que transitan por la pista ...	192
<b>Figura 10</b> – Cantidad de vehículos que transitan por la pista de aguas arriba en sentido Brasil-Paraguay (Izquierda) y sentido Paraguay-Brasil (Derecha) .....	193
<b>Figura 11</b> – Cantidad de vehículos que transitan por la pista de aguas abajo en sentido Brasil-Paraguay (Izquierda) y sentido Paraguay-Brasil (Derecha) .....	193
<b>Figura 12</b> – Escala de evaluación ICP .....	194
<b>Figura 13</b> – Gráfico comparativo entre pista de aguas arriba (azul) y aguas abajo (Rojo) .....	196
<b>Figura 14</b> – Conceptos atribuidos a las pistas (por trechos) .....	197
<b>Figura 15</b> – Tramos de pavimento rígido relevados en el levantamiento .....	198
<b>Figura 16</b> – Pista de Aguas Abajo (Tramo 3B) .....	198
<b>Figura 17</b> – PavScan® .....	199
<b>Figura 18</b> – Trecho del levantamiento – Sentido Decreciente (Izquierda) y Sentido Creciente (Derecha) .....	201
<b>Figura 19</b> – Condición de superficie en términos de ICP para los 3 tramos (3, 3A, 3B). – ITAIPU (2020) .....	202
<b>Figura 20</b> – Falling Weight Deflectometer en la pista de pavimento rígido de la elevación 225,00 m .....	204
<b>Figura 21</b> – Resultado del GPR – Tramo 3 .....	206
<b>Figura 22</b> – Resultado del GPR – Tramo 3A .....	206
<b>Figura 23</b> – Resultado del GPR – Tramo 3B .....	207
<b>Figura 24</b> – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Total - 2016 .....	211

<b>Figura 25</b> – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Total – 2016 .....	211
<b>Figura 26</b> – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Creciente – 2016 .....	212
<b>Figura 27</b> – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Creciente – 2016...	212
<b>Figura 28</b> – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Decreciente – 2016 .....	213
<b>Figura 29</b> – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Decreciente – 2016 .....	213
<b>Figura 30</b> – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Total – 2019 .....	217
<b>Figura 31</b> – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Total – 2019 .....	218
<b>Figura 32</b> – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Creciente – 2019 .....	218
<b>Figura 33</b> – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Creciente – 2019...	219
<b>Figura 34</b> – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Decreciente – 2019 .....	219
<b>Figura 35</b> – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Decreciente – 2019 .....	220
<b>Figura 36</b> – Comparativa de ocurrencia de defectos 2016 vs 2019 – Total de la Pista .....	221
<b>Figura 37</b> – Fórmulas para retro análisis .....	223
<b>Figura 38</b> – Módulo de reacción de la subrasante – Sentido creciente (arriba) y decreciente (abajo).....	224
<b>Figura 39</b> – Módulo de elasticidad – Sentido creciente (arriba) y decreciente (abajo) .....	225
<b>Figura 40</b> – Ficha de inspección del levantamiento 2016.....	228
<b>Figura 41</b> – Ficha de inspección del levantamiento 2019.....	229

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> – Principales Defectos (1998) .....	187
<b>Tabla 2</b> – Característica de la Pista de Aguas Abajo .....	189
<b>Tabla 3</b> – Conteo de Transito Pista de Aguas Abajo (2016) .....	193
<b>Tabla 4</b> – Cantidad y porcentaje de defectos en las pistas (2016).....	195
<b>Tabla 5</b> – Conceptos atribuidos (2016) .....	196
<b>Tabla 6</b> – Conceptos atribuidos para el IRI (2020).....	200
<b>Tabla 7</b> – Valores de IRI en pistas .....	200
<b>Tabla 8</b> – Conceptos asociados a los valores de ICP del pavimento rígido (2020) .....	202
<b>Tabla 9</b> – Valores de ICP en pistas.....	203
<b>Tabla 10</b> – Valores de deflexión (0,01 mm) en pistas .....	205
<b>Tabla 11</b> – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2016 .....	208
<b>Tabla 12</b> – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) especificado por grado de severidad – 2016.....	209
<b>Tabla 13</b> – Resumen de conceptos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2016 .....	209
<b>Tabla 14</b> – Resumen de defectos en la totalidad de la pista – 2016.....	210
<b>Tabla 15</b> – Resumen de defectos en la totalidad de la pista especificado por grado de severidad – 2016.....	210
<b>Tabla 16</b> – Resumen de conceptos en la totalidad de la pista – 2016.....	210
<b>Tabla 17</b> – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2019 .....	215
<b>Tabla 18</b> – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) especificado por grado de severidad – 2019.....	215
<b>Tabla 19</b> – Resumen de conceptos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2019 .....	216
<b>Tabla 20</b> – Resumen de defectos en la totalidad de la pista – 2019.....	216
<b>Tabla 21</b> – Resumen de defectos en la totalidad de la pista especificado por grado de severidad – 2019.....	216
<b>Tabla 22</b> – Resumen de conceptos en la totalidad de la pista – 2019.....	217

<b>Tabla 23 – Retro análisis FWD .....</b>	<b>223</b>
<b>Tabla 24 – Módulo de reacción de la subrasante (MPa/m).....</b>	<b>224</b>

## INDICE

<b>1 GENERALIDADES .....</b>	<b>183</b>
1.1 PISTA DE AGUAS ABAJO .....	183
<b>2 VERIFICACIÓN DOCUMENTAL .....</b>	<b>183</b>
2.1 LEVANTAMIENTO EJECUTADO EN 1988.....	184
2.1.1 Levantamiento de los Defectos .....	185
2.1.2 Principales Defectos.....	186
2.1.3 Reparos.....	188
2.1.4 Post Reparo .....	189
2.2 LEVANTAMIENTO EJECUTADO EN 2016.....	190
2.2.1 Corroboración de las Medidas.....	191
2.2.2 Contaje Volumétrico de Vehículos .....	191
2.2.3 Inspección y Evaluación del ICP de las Pistas .....	194
2.2.4 Conclusiones.....	197
2.3 LEVANTAMIENTO EJECUTADO EN 2019.....	197
2.3.1 Condición de Confort.....	199
2.3.2 Condición de Superficie.....	201
2.3.3 Evaluación Estructural.....	203
2.3.4 Evaluación Estratigráfica .....	205
<b>3 COMPARATIVA DE LEVANTAMIENTOS EJECUTADOS EN 2016 Y 2019 .....</b>	<b>207</b>
3.1 DATOS DEL LEVANTAMIENTO DE 2016 .....	208
3.2 DATOS DEL LEVANTAMIENTO DE 2019 .....	214
3.3 DIFERENCIAS LEVANTAMIENTO DE 2016 Y LEVANTAMIENTO DE 2019...	221
3.4 RETRO ANÁLISIS FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER .....	223
<b>4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>226</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>227</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>228</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>230</b>

<b>CONTEO SENTIDO CRECIENTE – 2016.....</b>	<b>230</b>
<b>CONTEO SENTIDO DECRECIENTE – 2016.....</b>	<b>236</b>
<b>CONTEO SENTIDO CRECIENTE – 2019.....</b>	<b>242</b>
<b>CONTEO SENTIDO DECRECIENTE – 2019.....</b>	<b>248</b>

## 1 GENERALIDADES

El presente documento corresponde a una interpretación de los resultados de los trabajos de levantamiento de las pistas del Área Industrial de la Usina de Itaipu.

### 1.1 PISTA DE AGUAS ABAJO

La pista evaluada consiste en la pista aguas abajo del eje localizada en la elevación 144,00 m a lo largo de la casa de máquinas y es de vital importancia para el buen desenvolvimiento de las actividades en la entidad y la integración de ambos márgenes.

**Figura 1 – Pista de Aguas Abajo**

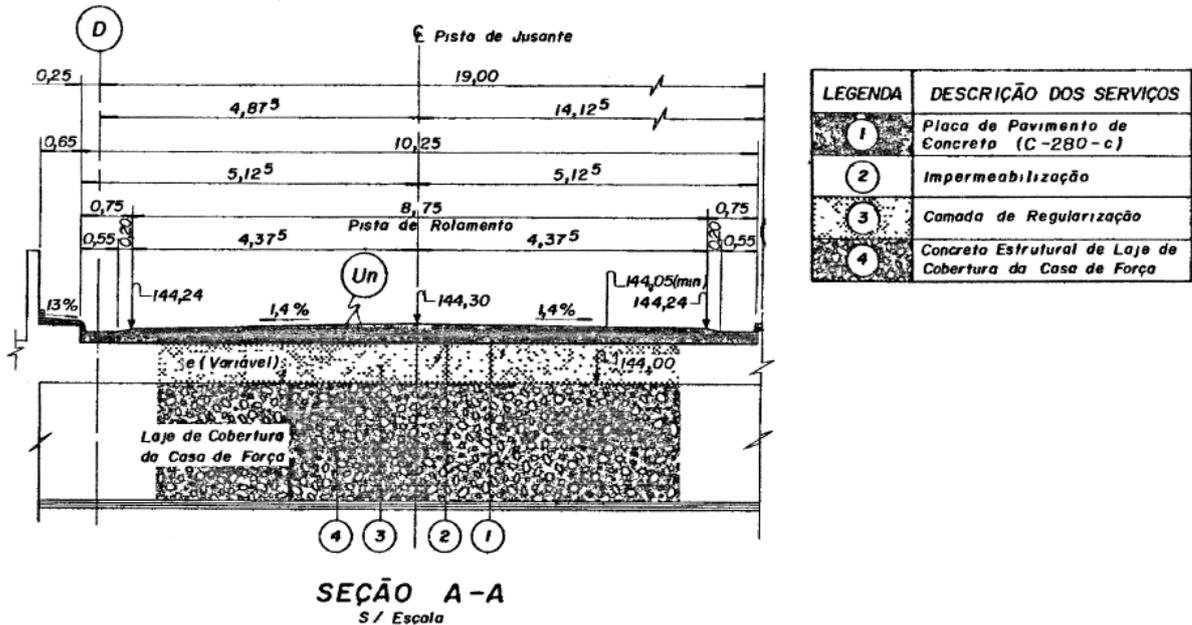


**Fuente:** El autor (2020).

## 2 VERIFICACIÓN DOCUMENTAL

Se verificó la información existente del proyecto original de la actual pista de pavimento rígido de aguas abajo de la elevación 144,00 m. La figura a continuación ilustra la sección transversal del pavimento rígido entre las unidades U1 a U15 con la configuración de materiales que se mantiene en toda la extensión de la casa de fuerza.

Figura 2 – Sección Transversal



Fuente: ITAIPU (2020).

Estructura de la pista:

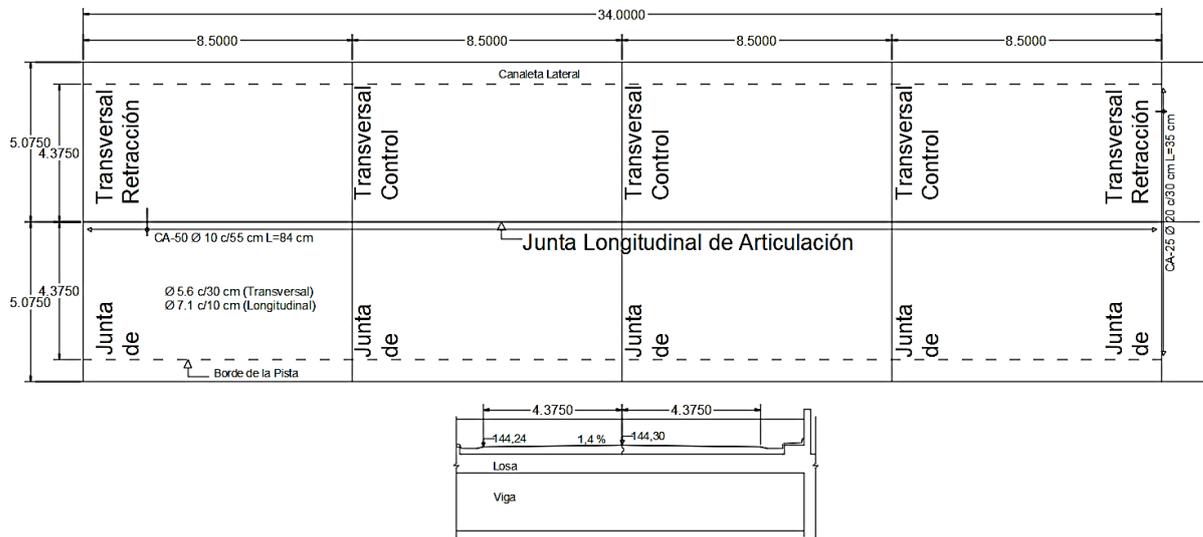
- Capa de rodadura/ Estructural: Consta de una placa en hormigón de espesor variable;
- Capa de Impermeabilización y Amortiguamiento;
  - Capa de amortiguamiento consistente en Filtros Asfálticos 500/20 y Masilla Anti-compresión;
  - Impermeabilización a base de solución de Neopreno e Hypalon.
- Sub-Base y Fundación;
  - Capa de regularización en hormigón pobre de espesura variable pero no menor a cinco centímetros;
  - Apoyado sobre el hormigón estructural de la losa de cobertura de la casa de fuerza.

## 2.1 LEVANTAMIENTO EJECUTADO EN 1988

El proyecto de juntas del pavimento recién construido consistió en juntas de 1,00 centímetros de espesor a cada 8,50 metros en el sentido longitudinal con profundidad de 5,00 cm, el ancho transitable de la pista considerado a partir del eje

de la pista es de 4,38 metros, adicionalmente la pista posee armadura distribuida de carácter no estructural conforme indicado en la imagen a seguir:

**Figura 3 – Proyecto Geométrico Inicial, Sección Típica y armaduras**



**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (1988).

### 2.1.1 Levantamiento de los Defectos

A seguir se detallan los defectos presentados por el pavimento dos años posterior a su construcción en el trecho compuesto por el Área de Montaje Derecha (AMD) y el Área de Montaje Central (AMC) como consecuencia entre otras cosas de movimientos en las placas.

Figura 4 – Desplazamientos longitudinales en el pavimento

T A B E L A 01

DESLOCAMENTOS LONGITUDINAIS OCORRIDOS NO PAVIMENTO C/D  
(EM METROS)

UNIDADE	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\alpha$	$\bar{\beta}$
AMD3	0,29	0,32		0,317
AMD4	0,28	0,27	0,035	0,270
U1	0,23	0,22	0,050	0,200
U2	0,16	0,17	0,075	0,157
U3	0,14	0,15	0,070	0,153
U4	0,09	0,10	0,050	0,097
U5	0,08	0,11	0,040	0,097
U6	0,07	0,08	0,040	0,090
U7	0,08	0,08	0,035	0,105
U8	0,07	0,07	0,033	0,090
U9	0,05	0,05	0,035	0,055
U9	0,04	0,04	0,035	0,022
U10	0,03	0,03	0,035	0,020
U11	0,00	0,01	0,020	0,015
U12	0,03	0,01	0,030	0,007
U13	0,00	0,00	0,030	- 0,007
U14	0,01	0,03	0,020	- 0,002
U15	0,02	0,01	0,025	0,017
AMC1			0,020	

$\Delta 1$  - Deslocamento da caixa de captação do sistema de drenagem das placas de montante entre unidades n e n-1

$\Delta 2$  - Deslocamento da caixa de captação do sistema de drenagem das placas de jusante entre unidades n e n-1

$\alpha$  - Medição de campo das juntas transversais de retração

$\bar{\beta}$  - Média do deslocamento da placa em relação ao eixo da unidade

Fuente: Adaptado de ITAIPU (1988).

### 2.1.2 Principales Defectos

La tabla presentada a continuación resume los principales defectos ocurridos abordando el motivo y el estado en el que se encontraba.

**Tabla 1 – Principales Defectos (1998)**

Defecto	Motivo	Estado
Fisuras debido a cura inadecuada	Ocurre en el periodo inicial, tienden a estancarse, pueden aumentar su profundidad bajo diversas acciones.	Poco profunda. Sin orientación definida.
Fisuras Longitudinales	Paralelas al eje central de la pista, causados por deformación restringida de la pista.	No es de gravedad. Pequeña evolución.
Fisuras Transversales	Fisuras que hacen un ángulo perpendicular aproximadamente en relación con el eje central del pavimento, causado por la retracción del hormigón en las primeras horas luego de la ejecución.	Incremento de la abertura y extensión de fisuras microscópicas por la acción del tráfico  Aumento de las fisuras transversales fruto de la progresión de otras fisuras bajo acción de tránsito e intemperie.
Quiebre de juntas	Quiebre o fragmentación de los bordes en las juntas transversales, pueden ocurrir por serrado en tiempo inadecuado, asociado a averías en los bordes a causa del tránsito.  Adicional, el sellante de mastique elástico aplicado a frío a base de poliuretano era inadecuado debido a su baja adherencia a las paredes o se parte cuando se abre.	Aumento de las juntas fragmentadas (fenómeno asociado al moldeado de las juntas en hormigón fresco).  Elección de sellante inadecuado que provoca penetración de materiales incompresibles en la junta.

**Fuente:** El Autor (2020).

Las principales causas citadas son:

- Dilatación térmica de las placas que trabajan de forma aislada de la estructura gracias a la capa de impermeabilización.
- Tránsito de vehículos y equipamientos pesados que excedían las cargas previstas en proyecto, con el colapso de las juntas se reduce la vida útil de las placas. Se desconsidera la fatiga debido a que no se presencié ruptura del pavimento debido a repeticiones continuas de carga.
- La existencia de desgastes, desniveles, descascamiento en las placas y fallas estructurales eran inexistentes, encontrándose en un buen estado superficial. El largo excesivo de las placas aliado al espesor reducido y a la fricción entre la placa y subbase propició la aparición de fisuras en sentido del ancho de las placas. El material sellante inadecuado propicio la acumulación de material incompresible trayendo como consecuencia quiebre y fragmentación de las juntas transversales al impedir la dilatación de las placas.
- El trabamiento de una de las extremidades en la AMC-1 y la ausencia de juntas de expansión del pavimento que absorba la dilatación de las placas que junto con el aumento de la temperatura provoco que las mismas sufran movimientos iniciales, los cuales fueron aumentando con el pasar del tiempo debido al acúmulo de materiales incompresibles durante el periodo de contracción de las placas con la disminución de la temperatura ambiente.

### 2.1.3 Reparos

Fueron implementados reparos para restaurar los pavimentos y prevenir el progreso de los defectos. Para ello fue utilizado entre otros materiales: Sellante de silicona autonivelante tipo 890-SL para las juntas y resina epoxídica en el preparo de la argamasa de los labios poliméricos en las juntas.

Entre los reparos ejecutados se encuentran:

- Remoción del material que se infiltró en las juntas y la reconstitución de estas;

- Restauración de las juntas desportilladas y sustitución de juntas de retracción por juntas de expansión conforme indicado en los planos correspondientes;
- Recuperación de las juntas de control;
- Sustitución del sellante anteriormente empleado por el sellante supra mencionado.
- Ejecución de junta de contracción espaciadas a 2,83 m entre si.
- Restauración del sistema de drenaje previamente afectado por el movimiento de las placas.

#### 2.1.4 Post Reparó

Posterior a la ejecución de los reparos y a la ejecución de demás trechos de la pista se presenta la siguiente situación que se encuentra resumida en la tabla a continuación:

**Tabla 2 – Característica de la Pista de Aguas Abajo**

Pista de Aguas Abajo						
Trecho	Espesor de la placa [m]	Ancho de las placas [m]	Largo de las placas [m]	Armadura Distribuida	Juntas Longitudinales	Juntas Transversales
AMD	≈ 0,15	5.075	8,5	No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal)	Junta de Articulación sin barras de transferencia	Juntas de retracción a cada 34 m. Juntas de Control a cada 8,50 m.
U1 - U15	≈ 0,15	5,075	2,83	No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal)	Juntas de Articulación. Tipo Macho y Hembra, con barras de unión Ø20 c/60 cm (CA-50) L=76 cm.	Juntas de expansión a cada 34 m. Juntas de retracción a cada 8,50 m. Juntas de contracción a cada 2,83 m.

U16-U18A	≈ 0,15	5,075	4,25	No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal)	Juntas de Articulación. Tipo Macho y Hembra, con barras de unión Ø20 c/60 cm (CA-50) L=76 cm.	Juntas de expansión con labios poliméricos a cada 17 m. Juntas de Retracción a cada 4,25m
V1	≈ 0,15	5,075	3,93			Juntas de expansión con labios poliméricos a cada 19,65 m. Juntas de Retracción con labios poliméricos a cada 3,93m

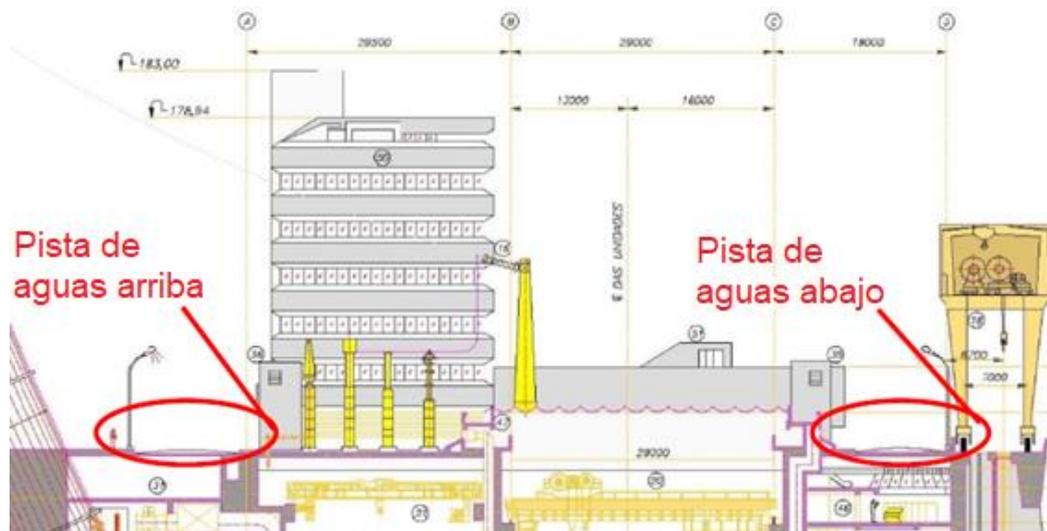
Referencias: Archivo Técnico Itaipu

Fuente: El Autor (2020).

## 2.2 LEVANTAMIENTO EJECUTADO EN 2016

En este levantamiento ejecutado por Fritsch fueron analizadas las pistas paralelas de aguas arriba y aguas abajo de la casa de fuerza como indica la figura a seguir:

**Figura 5 – Pista de Aguas Arriba y Aguas Abajo**

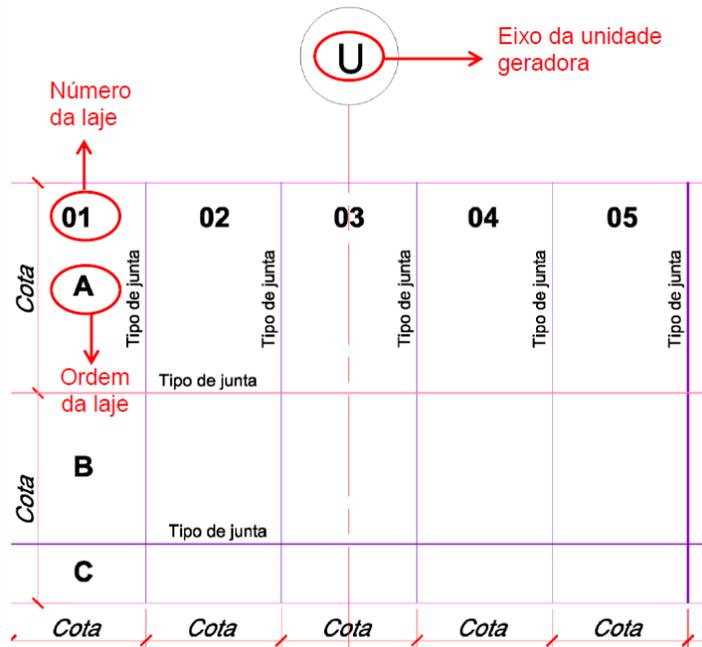


Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

2.2.1 Corroboración de las Medidas

Fueron corroboradas las dimensiones de la pista reproducido en AutoCAD una planta general de las pistas para auxilio del levantamiento identificando los elementos como sigue:

Figura 6 – Planta Elaborada



Fuente: Fritsch (2016)

2.2.2 Contaje Volumétrico de Vehículos

Se elaboró un contaje volumétrico de los vehículos con el objetivo de cuantificar los vehículos que transitan por las pistas de la casa de fuerza clasificando por tipo y sentido.

El contaje fue manual conforme ficha disponible en el “Manual de Estudio de Tráfego” del Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT) haciendo uso de las cámaras del sistema de seguridad.

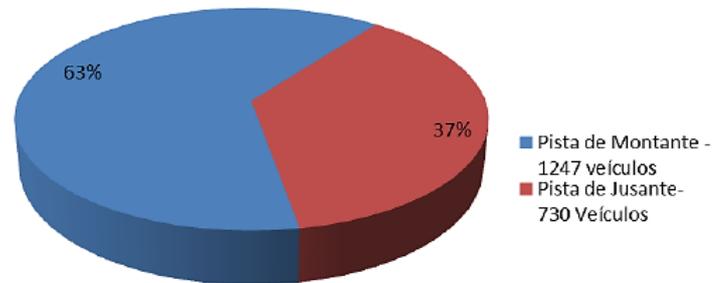
**Figura 7 – Localización de las cámaras**



**Fuente:** Fritsch (2016)

Fritsch presenta los siguientes resultados para el conteo:

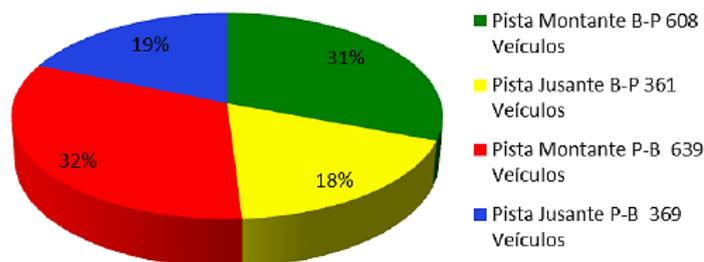
**Figura 8 – Total de vehículos que transitan por la pista**



**Fuente:** Fritsch (2016)

El sentido se clasificó como siendo Paraguay - Brasil (P-B) y Brasil - Paraguay (B-P) para las pistas de aguas arriba (montante) y aguas abajo (jusante), los valores contabilizados y el porcentaje que representan se encuentran en la imagen a continuación:

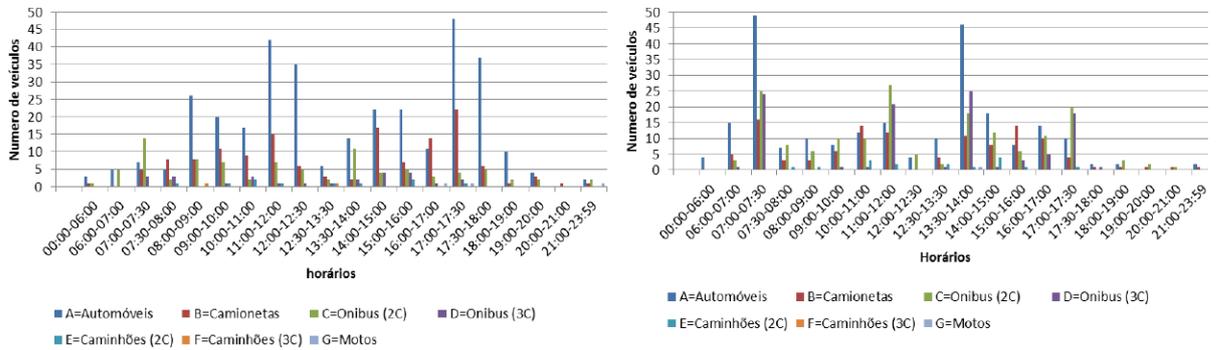
**Figura 9 – Porcentaje de los vehículos contabilizados que transitan por la pista**



**Fuente:** Fritsch (2016)

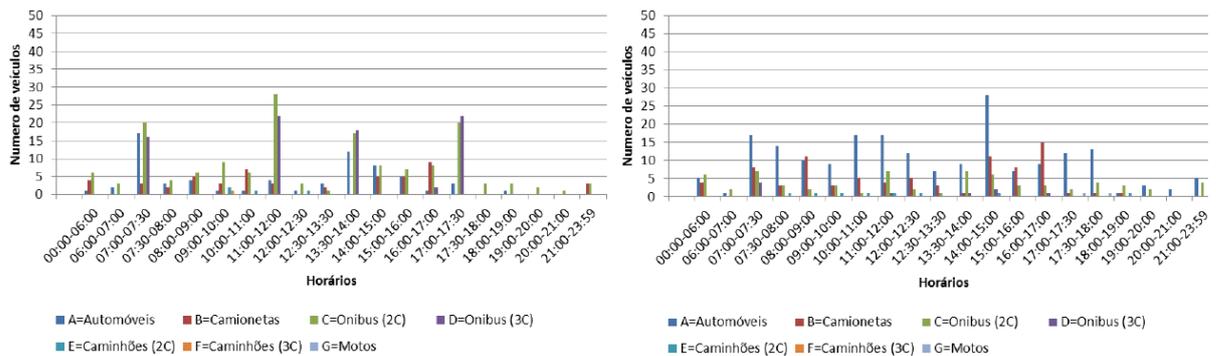
Específicamente, el flujo de vehículos que transitan en ambos sentidos por hora se encuentra indicado en las figuras a continuación:

**Figura 10 – Cantidad de vehículos que transitan por la pista de aguas arriba en sentido Brasil-Paraguay (Izquierda) y sentido Paraguay-Brasil (Derecha)**



**Fuente:** Fritsch (2016)

**Figura 11 – Cantidad de vehículos que transitan por la pista de aguas abajo en sentido Brasil-Paraguay (Izquierda) y sentido Paraguay-Brasil (Derecha)**



**Fuente:** Fritsch (2016)

En resumen, para la pista de aguas abajo el conteo volumétrico arrojó los siguientes datos de tránsito en 2016:

**Tabla 3 – Conteo de Transito Pista de Aguas Abajo (2016)**

Conteo de tráfico Pista de Aguas Abajo				
Vehículo	Sentido B-P	Sentido P-B	Dos Sentidos	%
A	67	198	265	36,3
B	51	84	135	18,5
C (2C)	158	68	226	31,0
D (3C)	80	9	89	12,2
E (2C)	4	8	12	1,6
F (3C)	1	0	1	0,1
G	0	2	2	0,3
Total	361	369	730	100,0

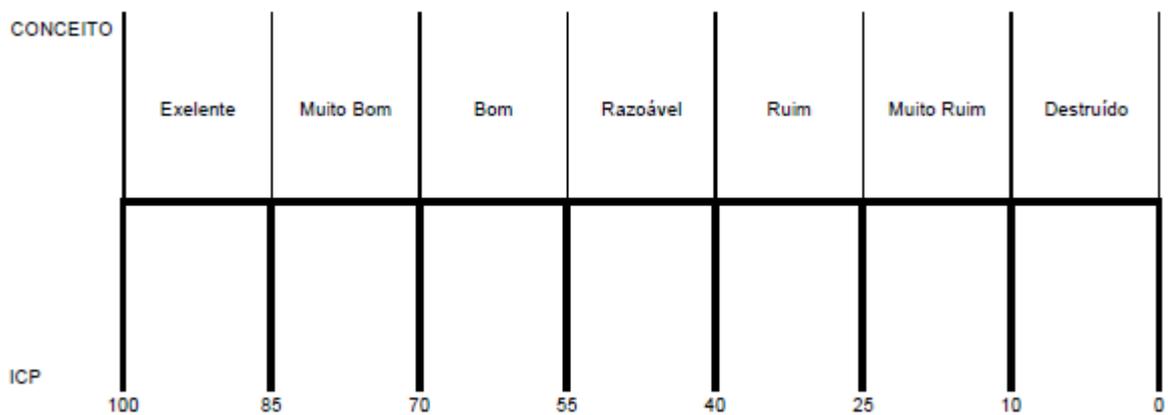
**Fuente:** El Autor (2020)

### 2.2.3 Inspección y Evaluación del ICP de las Pistas

La inspección visual se realizó en base a las normativas DNIT 060/2004 – PRO “Pavimento rígido – Inspeção visual – Procedimiento” y DNIT 062/2004 – PRO “Pavimento rígido – Avaliação objetiva – Procedimiento” consistiendo en una inspección total de las pistas. El cálculo del ICP del pavimento y la evaluación fue realizado siguiendo el procedimiento indicado en las normativas supra mencionadas.

El concepto de la pista fue atribuido conforme la figura presentada a continuación:

**Figura 12 – Escala de evaluación ICP**



**Fuente:** DNIT (2004)

Conforme el levantamiento de Fritsch (2016) los pavimentos presentaron los siguientes defectos:

**Tabla 4 – Cantidad y porcentaje de defectos en las pistas (2016)**

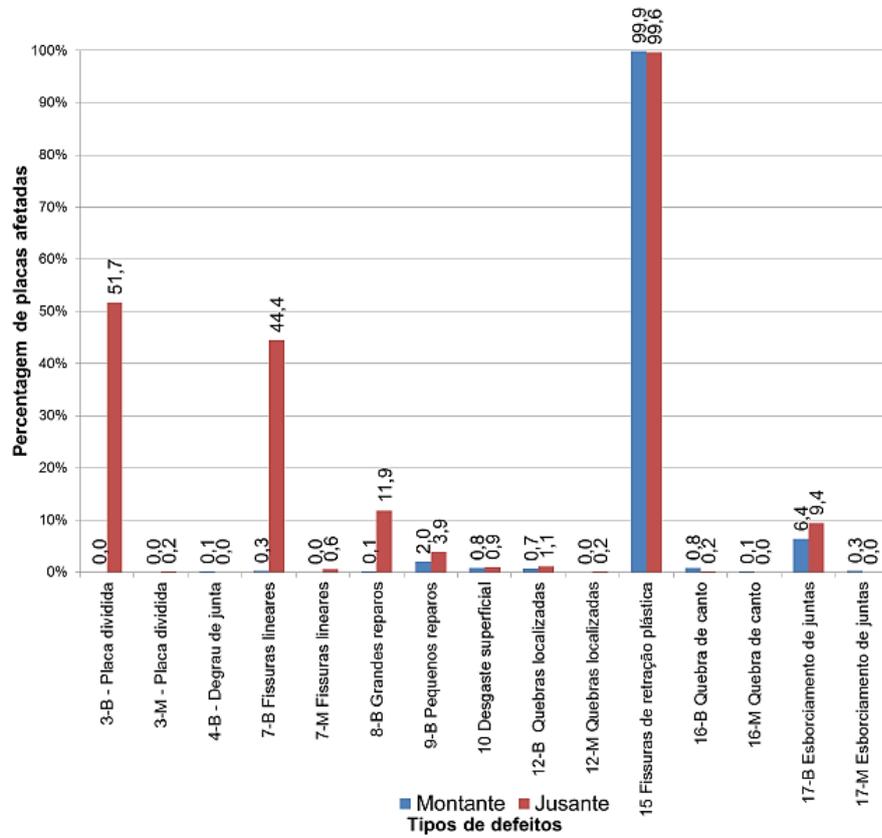
Nº do defeito	Tipo de defeito	Grau de severidade	Montante		Jusante	
			Quant. (Un.)	Percentage m (%)	Quant. (Un.)	Percentage m (%)
3	Placa dividida	Baixo (B)	0	0	279	51,67%
3	Placa dividida	Médio (M)	0	0	1	0,19%
4	Degradu de junta	Baixo (B)	1	0,13%	0	0
5	Def. selagem de junta	Médio (M)	(X) *	X	X	X
7	Fissuras lineares	Baixo (B)	2	0,27%	240	44,44%
7	Fissuras lineares	Médio (M)	0	0	3	0,56%
8	Grandes reparos	Baixo (B)	1	0,13%	64	11,85%
9	Pequenos reparos	Baixo (B)	15	2%	21	3,89%
10	Desgaste superficial	- **	6	0,80%	5	0,93%
12	Quebras localizadas	Baixo (B)	5	0,67%	6	1,11%
12	Quebras localizadas	Médio (M)	0	0	1	0,19%
15	Fissuras de retr. plástica	- **	749	99,87%	538	99,63%
16	Quebra de canto	Baixo (B)	6	0,80%	1	0,19%
16	Quebra de canto	Médio (M)	1	0,13%	0	0
17	Esborcinamento de juntas	Baixo (B)	48	6,40%	51	9,44%
17	Esborcinamento de juntas	Médio (M)	2	0,27%	0	0

\* Defeitos selagem de junta: a quantidade é baseada na relação entre as condições gerais do selante em todo o trecho, a observação não é feita a cada placa e sim a condição que se encontra o trecho total inspecionado.

\*\*Defeitos de desgaste superficial e fissuras por retração plástica não recebem grau de severidade, porém são contadas as placas que apresentam esse tipo de defeito.

**Fuente:** Fritsch (2016).

En el gráfico a continuación Fritsch indica cada defecto presentado y compara su ocurrencia en cada una de las pistas.

**Figura 13** – Gráfico comparativo entre pista de águas arriba (azul) y aguas abajo (Rojo)

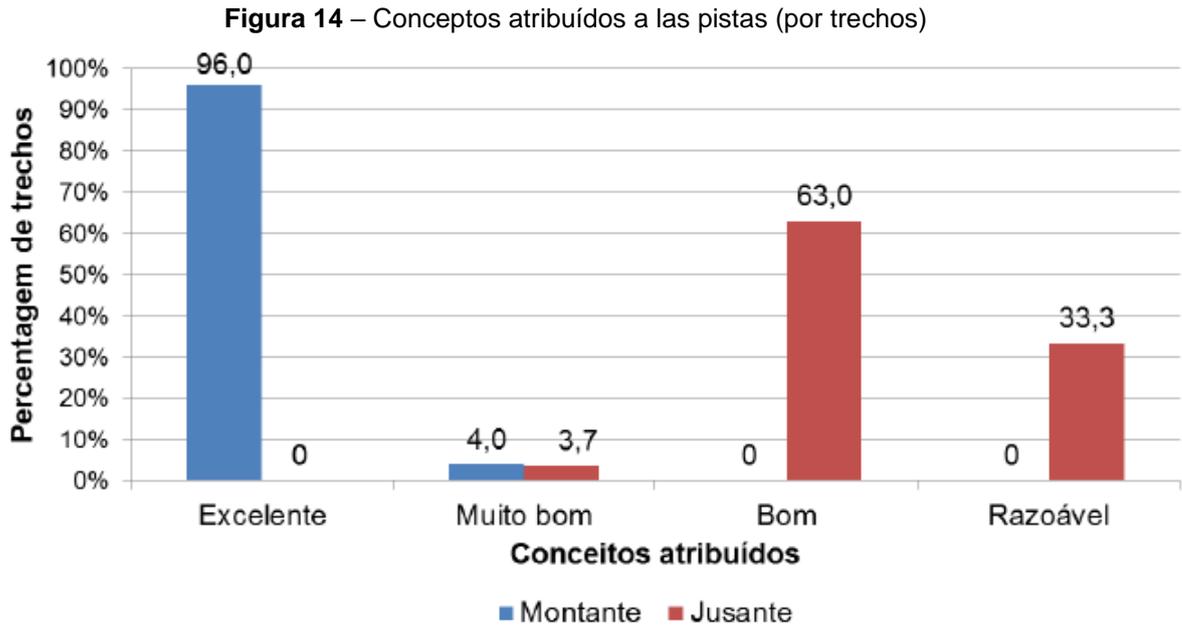
Fuente: Fritsch (2016)

Los conceptos atribuidos por el Fritsch se destacan a continuación:

**Tabla 5** – Conceptos atribuidos (2016)

Pista de Montante			Pista de Jusante		
Conceito	Quant. De Trechos	% de trechos	Conceito	Quant. De Trechos	% de trechos
Excelente	24	96,00%	Excelente	0	0,00%
Muito bom	1	4,00%	Muito bom	1	3,70%
Bom	0	0,00%	Bom	17	62,96%
Razoável	0	0,00%	Razoável	9	33,33%

Fuente: Fritsch (2016).



Fuente: Fritsch (2016)

#### 2.2.4 Conclusiones

Fritsch (2016) concluyó que la diferencia entre las manifestaciones patológicas entre ambas pistas se debe a la diferencia de la época construida en la que el tráfico en la pista de aguas abajo era mayormente pesado, además del gran espaciamiento entre las juntas y una menor tasa de armadura en la pista de aguas abajo en comparación con la pista de aguas arriba (No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal) vs Q-335 Ø 8,0 mm c/15 cm respectivamente).

#### 2.3 LEVANTAMIENTO EJECUTADO EN 2019

En este levantamiento ejecutado en 2019 fueron inspeccionados pavimentos rígidos y flexibles del área industrial. En lo que a pavimentos rígidos respecta fueron analizadas las tres pistas y reciben la siguiente denominación en el documento conforme la siguiente imagen:

**Figura 15 – Tramos de pavimento rígido relevados en el levantamiento**



**Fuente:** El Autor (2020)

La descripción de la imagen es la siguiente:

- Pista de la Cresta (Elevación 225m.): Tramo 3 (amarillo)
- Pista de Aguas Arriba (Elevación 144m.): Tramo 3A (celeste)
- Pista de Aguas Abajo (Elevación 144m.): Tramo 3B (naranja)

**Figura 16 – Pista de Aguas Abajo (Tramo 3B)**



**Fuente:** El Autor (2020)

Los tramos se subclasifican en creciente y decreciente en base a las fajas de tránsito, siendo considerado sentido creciente a la faja de tránsito que va de Margen Derecha (Paraguay) a Margen Izquierda (Brasil) y decreciente la faja que va de Margen Izquierda (Brasil) a Margen Derecha (Paraguay).

Los levantamientos ejecutados evaluaron el confort al transitar, la superficie de los pavimentos y la condición estructural por medio de ensayos no destructivos empleando equipamientos como PavScan®, Falling Weight Deflectometer (FWD) y GPR (Ground Penetrating Radar).

### 2.3.1 Condición de Confort

La condición de confort fue medida a través del uso del PavScan® el cual por medio de un acelerómetro (señal vertical) obtiene el perfil longitudinal midiendo el desplazamiento vertical del vehículo y el perfil descontando las variaciones de la distancia entre el vehículo y la ruta. Estos sensores permiten eliminar las variaciones causadas por baches en la ruta y además deben estar sincronizados entre si con la unidad de medición inercial (IMU) para garantizar la precisión del procedimiento. El equipamiento utiliza un perfil longitudinal por cada huella de rueda a través de los datos 3D y las aceleraciones verticales y permite la obtención de los valores del International Roughness Index (IRI) mediante el software de PavScan® o bien la exportación de los perfiles y cálculo a partir de otro software o método.

**Figura 17 – PavScan®**



**Fuente:** ITAIPU (2020)

Los tramos analizados pueden ser clasificados con los conceptos indicados en la tabla a continuación:

**Tabla 6 – Conceptos atribuidos para el IRI (2020)**

IRI (m/km)	Conceito
$IRI \leq 2,7$	Ótimo a Bom
$2,7 \leq IRI \leq 3,5$	Regular
$IRI > 3,5$	Ruim a Péssimo

**Fuente:** ITAIPU (2020).

Todos los tramos de pavimentos rígidos manifestaron un concepto malo a pésimo como indicado en las tablas a continuación que resumen los valores de IRI para segmentos de 200 metros:

**Tabla 7 – Valores de IRI en pistas**

Pista	Segmentos		IRI (m/km)			
	km inicial	km final	Creciente	Concepto	Decreciente	Concepto
Tramo 3 - Elevación 255	0,000	0,200	5,42	Malo	5,23	Malo
Tramo 3 - Elevación 255	0,200	0,400	5,36	Malo	4,63	Malo
Tramo 3 - Elevación 255	0,400	0,600	5,86	Pesimo		
Tramo 3 - Elevación 255	0,600	0,800	5,81	Pesimo		
Tramo 3 - Elevación 255	0,800	1,000	4,75	Malo		
Tramo 3 - Elevación 255	1,000	1,200	5,24	Malo		
Tramo 3 - Elevación 255	1,200	1,400	5,84	Pesimo		
Tramo 3 - Elevación 255	1,400	1,600	5,00	Malo		
Tramo 3 - Elevación 255	1,600	1,800	4,66	Malo	4,89	Malo
Tramo 3 - Elevación 255	1,800	2,000	5,12	Malo	5,09	Malo
Tramo 3 - Elevación 255	2,000	2,200	5,46	Malo	5,25	Malo
Tramo 3 - Elevación 255	2,200	2,400	4,10	Malo	5,32	Malo
Tramo 3 - Elevación 255	2,400	2,600	4,73	Malo	5,65	Pesimo
Tramo 3 - Elevación 255	2,600	2,700	4,88	Malo	5,14	Malo

Pista	Segmentos		IRI			
	km inicial	km final	Creciente	Concepto	Decreciente	Concepto
Tramo 3A	0,000	0,200	4,67	Malo	4,59	Malo
Tramo 3A	0,200	0,400	4,44	Malo	4,33	Malo
Tramo 3A	0,400	0,600	4,92	Malo	4,61	Malo
Tramo 3A	0,600	0,800	5,48	Malo	4,81	Malo
Tramo 3A	0,800	0,900	4,67	Malo	4,39	Malo

Pista	Segmentos		IRI			
	km inicial	km final	Creciente	Concepto	Decreciente	Concepto
Tramo 3B	0,000	0,200	5,47	Malo	4,47	Malo
Tramo 3B	0,200	0,400	5,00	Malo	4,23	Malo
Tramo 3B	0,400	0,600	5,03	Malo	4,20	Malo
Tramo 3B	0,600	0,800	5,27	Malo	5,75	Pesimo
Tramo 3B	0,800	0,900	6,02	Pesimo	6,18	Pesimo

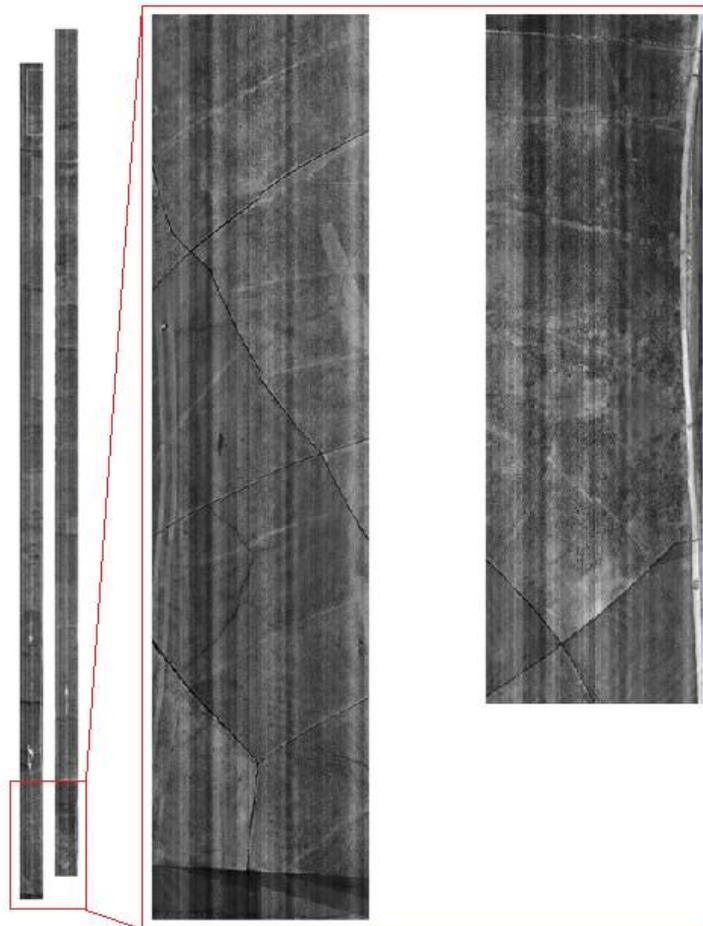
**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

### 2.3.2 Condición de Superficie

Se determinó la condición de la superficie de las pistas de pavimentos rígidos conforme la metodología presentada en DNIT 062/2004 – PRO “Pavimento rígido – Avaliação objetiva – Procedimiento”.

El Índice de Condición de Pavimento (ICP) se determinó mediante el uso del equipamiento PavScan® nuevamente, esta vez para detección automatizada y clasificación de los defectos por medio de líneas de proyección laser y cámaras de alta potencia y óptica avanzada. El equipamiento fornece las imágenes compuestas a partir de imágenes y de la profundidad proporcionada por el láser para mejor visualización de las manifestaciones patológicas, en la figura a seguir puede observarse un ejemplo de un trecho con 50 placas del levantamiento:

**Figura 18** – Trecho del levantamiento – Sentido Decreciente (Izquierda) y Sentido Creciente (Derecha)



**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020)

Fue posible establecer los valores de ICP para segmentos de 200 metros por faja de tránsito en cada una de las pistas de pavimento rígido y los conceptos asociados se determinaron con base a la tabla a continuación:

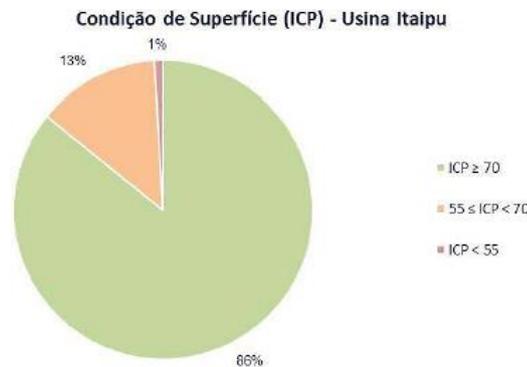
**Tabla 8** – Conceptos asociados a los valores de ICP del pavimento rígido (2020)

ICP	Conceito
ICP > 70	Ótimo ou Bom
55 ≤ TR ≤ 70	Regular
TR < 55	Ruim ou Péssimo

Fuente: ITAIPU (2020).

Como resultado de la evaluación objetiva se determinó que 1% de las muestras se encuentra en estado crítico:

**Figura 19** – Condición de superficie en términos de ICP para los 3 tramos (3, 3A, 3B). – ITAIPU (2020)



Fuente: ITAIPU (2020)

Las tablas a continuación resumen el estado de las pistas separándolas por segmentos de 200 metros:

**Tabla 9 – Valores de ICP en pistas**

Pista	Segmentos		ICP			
	km inicial	km final	Creciente	Concepto	Decreciente	Concepto
Tramo 3 - Elevación 255	0,000	0,200	79	Muy bueno	82	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	0,200	0,400	92	Excelente	87	Excelente
Tramo 3 - Elevación 255	0,400	0,600	84	Muy bueno	80	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	0,600	0,800	82	Muy bueno	82	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	0,800	1,000	79	Muy bueno	86	Excelente
Tramo 3 - Elevación 255	1,000	1,200	79	Muy bueno	76	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	1,200	1,400	74	Muy bueno	81	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	1,400	1,600	55	Bueno	69	Bueno
Tramo 3 - Elevación 255	1,600	1,800	64	Bueno	71	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	1,800	2,000	69	Bueno	71	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	2,000	2,200	58	Bueno	81	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	2,200	2,400	80	Muy bueno	84	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	2,400	2,600	83	Muy bueno	84	Muy bueno
Tramo 3 - Elevación 255	2,600	2,700	66	Bueno	70	Muy bueno

Pista	Segmentos		ICP			
	km inicial	km final	Creciente	Concepto	Decreciente	Concepto
Tramo 3A	0,000	0,200	95	Excelente	100	Excelente
Tramo 3A	0,200	0,400	95	Excelente	100	Excelente
Tramo 3A	0,400	0,600	96	Excelente	97	Excelente
Tramo 3A	0,600	0,800	100	Excelente	98	Excelente
Tramo 3A	0,800	0,900	100	Excelente	100	Excelente

Pista	Segmentos		ICP			
	km inicial	km final	Creciente	Concepto	Decreciente	Concepto
Tramo 3B	0,000	0,200	76	Muy bueno	83	Muy bueno
Tramo 3B	0,200	0,400	72	Muy bueno	80	Muy bueno
Tramo 3B	0,400	0,600	73	Muy bueno	77	Muy bueno
Tramo 3B	0,600	0,800	73	Muy bueno	80	Muy bueno
Tramo 3B	0,800	0,900	73	Muy bueno	75	Muy bueno

**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

### 2.3.3 Evaluación Estructural

La evaluación estructural fue elaborada por medio de ensayos no destructivos empleando ensayo deflectométrico para verificación de la capacidad de carga del pavimento en base a las características de resistencia y deformabilidad de las capas que lo componen.

Para la evaluación fue empleado el equipamiento “Falling Weight Deflectometer” (FWD) de acuerdo a la metodología de la norma DNER-PRO 273/96.

**Figura 20** – Falling Weight Deflectometer en la pista de pavimento rígido de la elevación 225,00 m



**Fuente:** ITAIPU (2020)

El equipamiento busca simular las condiciones impuestas por el tráfico de vehículos al pavimento obteniendo como respuesta el cuenco de deformaciones por medio de la medición de desplazamientos o deflexiones recuperables de la superficie en distintos puntos seleccionados.

Las deflexiones derivadas de cargas por impulso medidas son generadas por medio de la aplicación de una fuerza transitoria al pavimento causada por el impacto de un peso correspondiente al del semi eje padrón brasileño equivalente a 4100 kgf aplicado en un área circular de 30 cm de diámetro. Esta fuerza originada a partir del choque del peso con la placa que transmite la fuerza al pavimento es registrada por una célula de carga; los geófonos, que sirven para determinar el desplazamiento vertical en diferentes posiciones relativos al punto de carga, se ubicaron en las siguientes distancias del local de aplicación de la carga: 0, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 cm. Los ensayos fueron ejecutados con un espaciamiento de 40 metros entre sí.

Resumidamente, las deflexiones obtenidas fueron las siguientes:

**Tabla 10 – Valores de deflexión (0,01 mm) en pistas**

Pista	Segmentos		D0 (0,01 mm)	
	km inicial	km final	Creciente	Decreciente
Tramo 3 - Elevación 255	0,000	0,200	5	4
Tramo 3 - Elevación 255	0,200	0,400	10	6
Tramo 3 - Elevación 255	0,400	0,600	1	2
Tramo 3 - Elevación 255	0,600	0,800	1	1
Tramo 3 - Elevación 255	0,800	1,000	1	1
Tramo 3 - Elevación 255	1,000	1,200	3	6
Tramo 3 - Elevación 255	1,200	1,400	3	9
Tramo 3 - Elevación 255	1,400	1,600	10	12
Tramo 3 - Elevación 255	1,600	1,800	6	7
Tramo 3 - Elevación 255	1,800	2,000	6	7
Tramo 3 - Elevación 255	2,000	2,200	8	4
Tramo 3 - Elevación 255	2,200	2,400	8	5
Tramo 3 - Elevación 255	2,400	2,600	8	3
Tramo 3 - Elevación 255	2,600	2,700	2	1

Pista	Segmentos		D0 (0,01 mm)	
	km inicial	km final	Creciente	Decreciente
Tramo 3A	0,000	0,200	9	5
Tramo 3A	0,200	0,400	4	5
Tramo 3A	0,400	0,600	4	4
Tramo 3A	0,600	0,800	13	6
Tramo 3A	0,800	0,900	4	8

Pista	Segmentos		D0 (0,01 mm)	
	km inicial	km final	Creciente	Decreciente
Tramo 3B	0,000	0,200	9	10
Tramo 3B	0,200	0,400	9	11
Tramo 3B	0,400	0,600	5	11
Tramo 3B	0,600	0,800	9	7
Tramo 3B	0,800	0,900	12	15

**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

### 2.3.4 Evaluación Estratigráfica

Le evaluación estratigráfica fue ejecutada con auxilio del Ground Penetrating Radar (GPR) también conocido como georadar. El funcionamiento de este dispositivo consiste en la emisión de ondas electromagnéticas en el suelo las cuales se reflejan en las estructuras u objetos a profundidad. La emisión y recepción de la señal se logra a través de una antena dispuesta en la superficie del terreno. Mediante el proceso descrito se logra definir la profundidad en la que cambia una capa de pavimento a otra y consecuentemente el espesor de estas.

Permite la obtención de un perfil continuo de la estructura del pavimento con rapidez y bajo costo en comparación con estudios puntuales, es decir, sondajes o excavaciones.

Como la penetración de la señal está condicionada por la conductividad y permisividad eléctrica de los terrenos la profundidad de alcance se verá afectado por

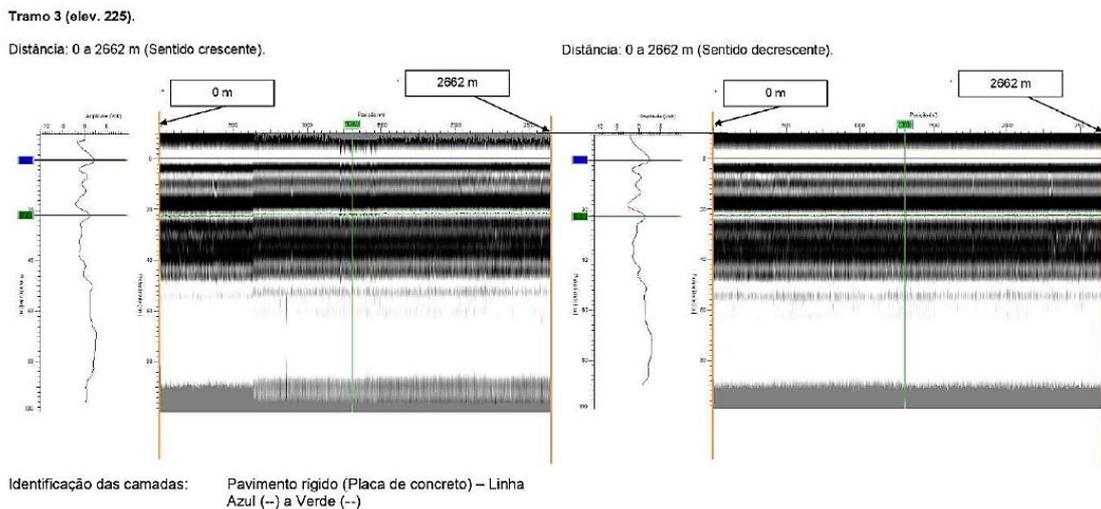
estos factores reduciéndose considerablemente cuanto mayor sea la conductividad, como por ejemplo en arcillas o agua.

Además, permite visualizar la presencia de materiales metálicos, tuberías, cables, anomalías, etc.

Las señales pueden ser divididas básicamente en reflexiones que pueden ser planas (líneas horizontales) indicando interfaces entre capas, o puntuales (líneas parabólicas) indicando estructuras no planas como tuberías, vacíos, túneles, etc.

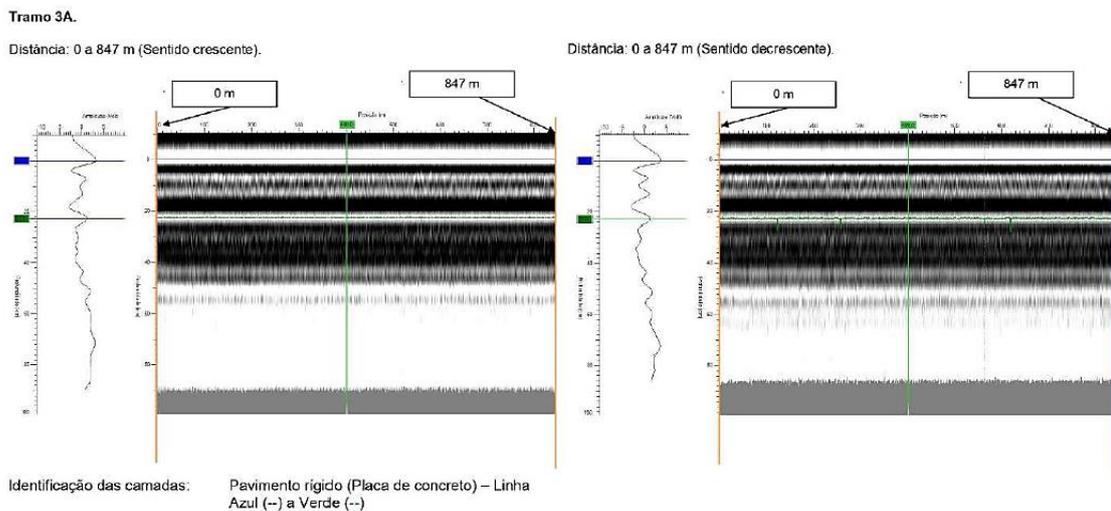
Los resultados del GPR para los tres tramos de pavimento rígido se presentan a continuación:

**Figura 21 – Resultado del GPR – Tramo 3**



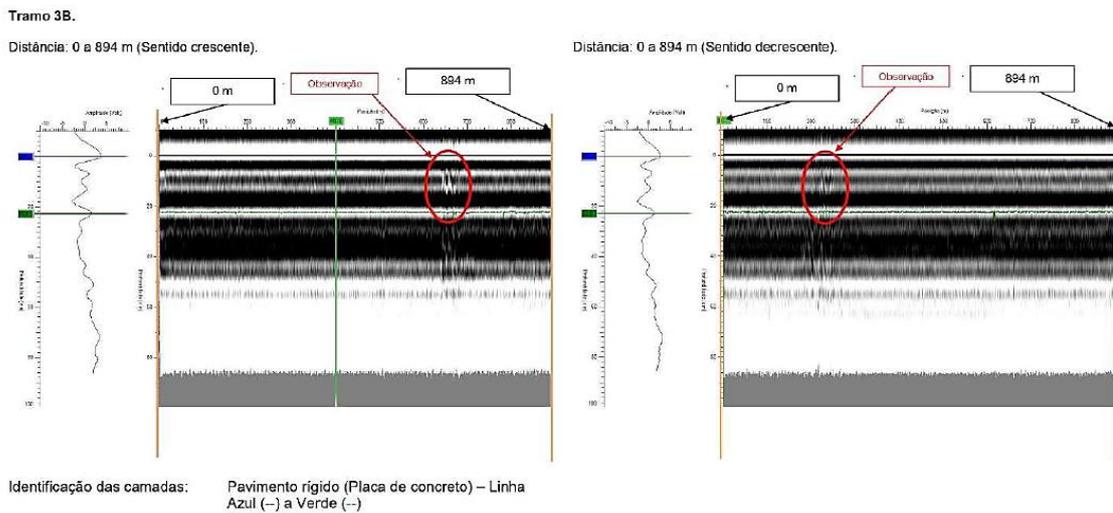
**Fuente: ITAIPU (2020)**

**Figura 22 – Resultado del GPR – Tramo 3A**



**Fuente: ITAIPU (2020)**

**Figura 23 – Resultado del GPR – Tramo 3B**



**Fuente:** ITAIPU (2020)

La medición arroja un espesor de 21 cm, 21,5 cm y 21,5 cm para los tramos 3, 3A y 3B respectivamente.

### 3 COMPARATIVA DE LEVANTAMIENTOS EJECUTADOS EN 2016 Y 2019

El análisis presentado a continuación tiene por objetivo comparar los levantamientos ejecutados en 2016 y en 2019 en la pista de aguas abajo por medio de un análisis estadístico de los defectos encontrados en cada levantamiento, además del índice de condición de pavimento en cada uno de los años.

Para eso fueron modificadas la disposición de las placas en las planillas correspondientes del levantamiento de 2016 para coincidir con la forma en la que el levantamiento fue ejecutado en 2019, es decir en sentido creciente y decreciente, y poder efectuar el cálculo conforme la normativa DNIT 062/2004. Esto modifica el IPC en los tramos y la forma de contabilizar los defectos, pero mantiene el total de defectos encontrados.

Para el efectuar el conteo fue elaborada una tabla que contiene los defectos por tipo, el grado de severidad, el ICP por trecho compuesto por 20 placas y el concepto asociado a ese trecho. Estas tablas se encuentran en el anexo del presente documento.

### 3.1 DATOS DEL LEVANTAMIENTO DE 2016

El levantamiento de 2016 indicó defectos en el sellado de las juntas, este defecto no se encuentra anotado en las placas y ni en los gráficos a continuación debido a que no es contabilizado por placa y si por la condición del trecho inspeccionado, por motivos prácticos se considera que ocurre en todo el trecho para este levantamiento.

La tabla a continuación resume la ocurrencia de los defectos en porcentaje presentados en el levantamiento de 2016 sin especificar el grado de severidad de estos.

**Tabla 11 – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2016**

Creciente		Decreciente	
Porcentaje de ocurrencia de cada defecto (total de las pistas)		Porcentaje de ocurrencia de cada defecto (total de las pistas)	
Tipo	%	Tipo	%
1. Levantamiento de Placas	0,00	1. Levantamiento de Placas	0,00
2. Grietas de Esquina	0,00	2. Grietas de Esquina	0,00
3. Placa Dividida	54,28	3. Placa Dividida	50,00
4. Escalonamiento de Juntas	0,00	4. Escalonamiento de Juntas	0,00
5. Deficiencias en el sellado de juntas	0,00	5. Deficiencias en el sellado de juntas	0,00
6. Desnivel Calzada-Banquina	0,00	6. Desnivel Calzada-Banquina	0,00
7. Grietas Lineares	43,49	7. Grietas Lineares	46,30
8. Grandes Reparaciones ( $A > 0,45 \text{ m}^2$ )	10,41	8. Grandes Reparaciones ( $A > 0,45 \text{ m}^2$ )	10,00
9. Pequeñas Reparaciones ( $A \leq 0,45 \text{ m}^2$ )	22,68	9. Pequeñas Reparaciones ( $A \leq 0,45 \text{ m}^2$ )	22,22
10. Desgaste Superficial	0,37	10. Desgaste Superficial	1,48
11. Bombeo	0,00	11. Bombeo	0,00
12. Quiebres Localizados	1,49	12. Quiebres Localizados	1,11
13. Pasos de Nivel	0,00	13. Pasos de Nivel	0,00
14. Malla y descamación	0,00	14. Malla y descamación	0,00
15. Fisuras por retracción	99,26	15. Fisuras por retracción	100,00
16. Desportillamiento en esquinas	0,00	16. Desportillamiento en esquinas	0,74
17. Desportillamiento en juntas	7,06	17. Desportillamiento en juntas	11,48
18. Placa Bailarina	0,00	18. Placa Bailarina	0,00

**Fuente:** Adaptado de Fritsch (2016).

La tabla a continuación resume la ocurrencia de los defectos por grado de severidad de estos para aquellos que sean clasificados de esa forma.

**Tabla 12 – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) especificado por grado de severidad – 2016**

Defectos en las pistas - Especificado		Defectos en las pistas - Especificado	
Tipo	%	Tipo	%
3. Bajo	54,28	3. Bajo	49,63
7. Bajo	42,38	3. Medio	0,37
7. Medio	1,12	7. Bajo	46,30
8. Bajo	10,41	8. Bajo	10,00
9. Bajo	22,68	9. Bajo	22,22
10.	0,37	10.	1,48
12. Bajo	1,12	12. Bajo	1,11
12. Medio	0,37	15.	100
15.	99,26	16. Bajo	0,74
17. Bajo	7,06	17. Bajo	11,48

**Fuente:** Adaptado de Fritsch (2016).

El ICP medio registrado en el sentido creciente es 56 mientras que en el sentido decreciente es 55, la totalidad de las placas en ambos sentidos presentan un concepto bueno como indica la tabla a continuación:

**Tabla 13 – Resumen de conceptos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2016**

Creciente			Decreciente		
Cocepto	Cantidad	%	Cocepto	Cantidad	%
Razonable	5	35,71	Razonable	5	35,71
Bueno	9	64,29	Bueno	9	64,29
Muy Bueno	0	0,00	Muy Bueno	0	0,00

**Fuente:** Adaptado de Fritsch (2016).

Para la totalidad del levantamiento se tiene:

**Tabla 14 – Resumen de defectos en la totalidad de la pista – 2016**

Creciente + Decreciente	
Porcentaje de ocurrencia de cada defecto (total de las pistas)	
Tipo	%
1. Levantamiento de Placas	0,00
2. Grietas de Esquina	0,00
3. Placa Dividida	52,13
4. Escalonamiento de Juntas	0,00
5. Deficiencias en el sellado de juntas	0,00
6. Desnivel Calzada-Banquina	0,00
7. Grietas Lineares	44,90
8. Grandes Reparaciones ( $A > 0,45 \text{ m}^2$ )	10,20
9. Pequeñas Reparaciones ( $A \leq 0,45 \text{ m}^2$ )	22,45
10. Desgaste Superficial	0,93
11. Bombeo	0,00
12. Quiebres Localizados	1,30
13. Pasos de Nivel	0,00
14. Malla y descamación	0,00
15. Fisuras por retracción	99,63
16. Desportillamiento en esquinas	0,37
17. Desportillamiento en juntas	9,28
18. Placa Bailarina	0,00

**Fuente:** Adaptado de Fritsch (2016).

**Tabla 15 – Resumen de defectos en la totalidad de la pista especificado por grado de severidad – 2016**

Defectos en las pistas - Especificado	
Tipo	%
3. Bajo	51,95
3. Medio	0,19
7. Bajo	44,34
7. Medio	0,56
8. Bajo	10,20
9. Bajo	22,45
10.	0,93
12. Bajo	1,11
12. Medio	0,19
15.	99,63
16. Bajo	0,37
17. Bajo	9,28

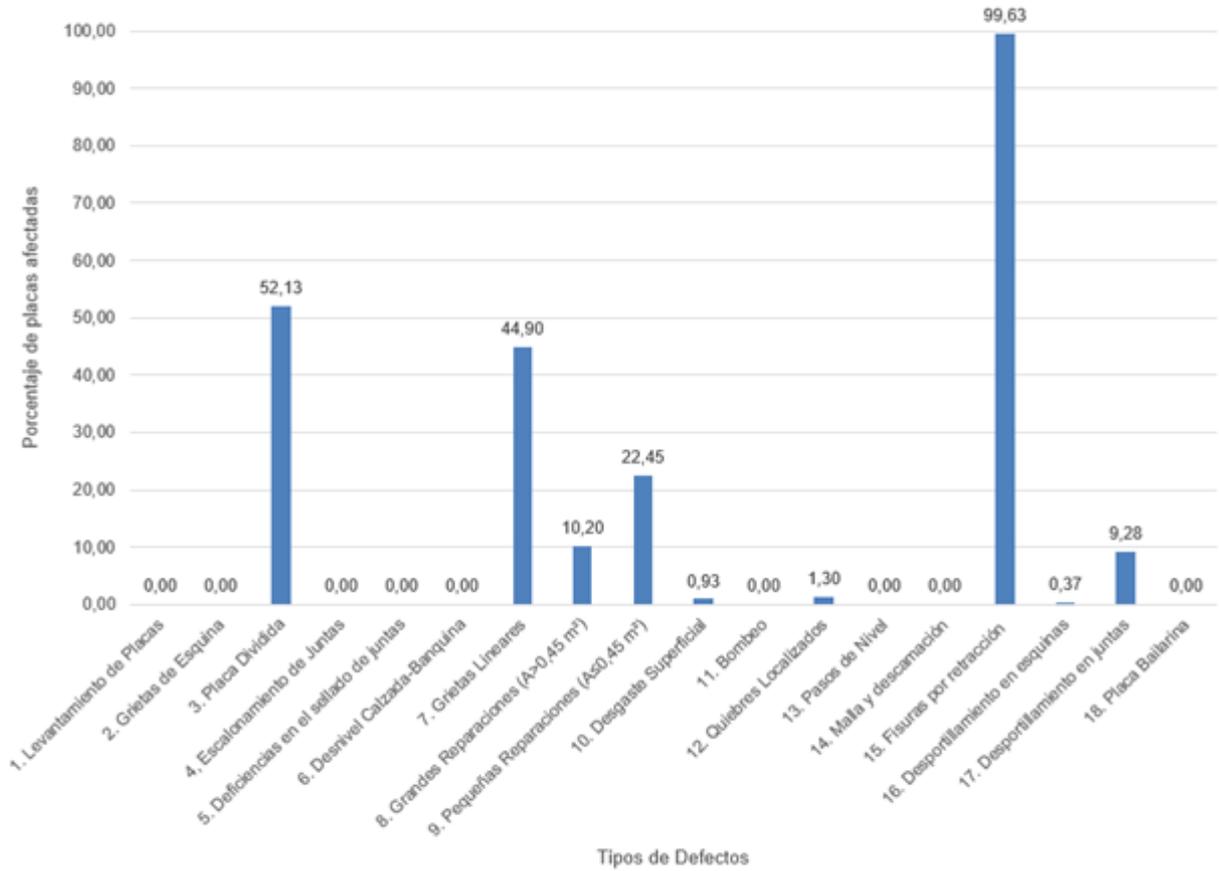
**Fuente:** Adaptado de Fritsch (2016).

**Tabla 16 – Resumen de conceptos en la totalidad de la pista – 2016**

Total		
Cocepto	Cantidad	%
Razonable	10	35,71
Bueno	18	64,29
Muy Bueno	0	0,00

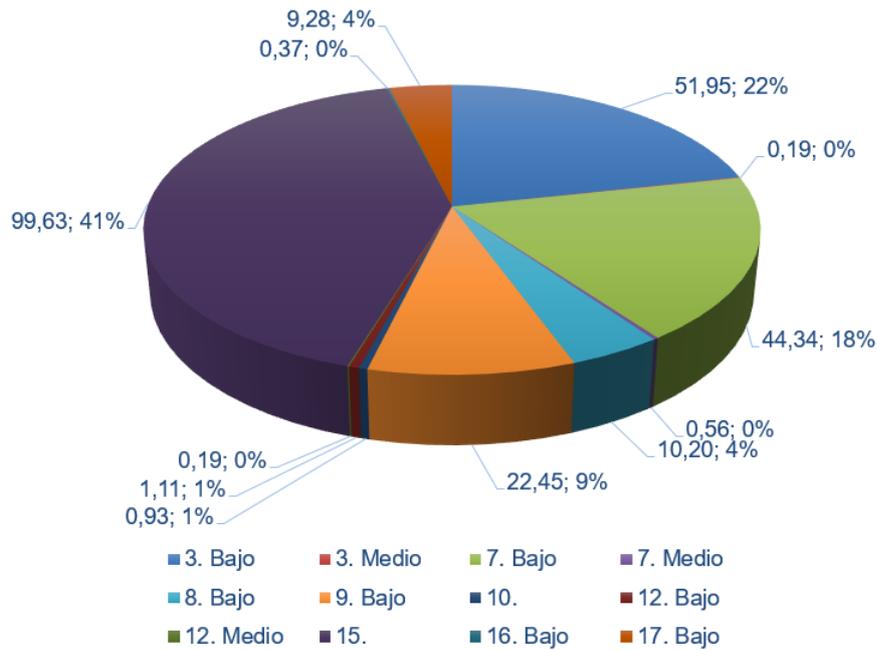
**Fuente:** Adaptado de Fritsch (2016).

**Figura 24** – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Total - 2016



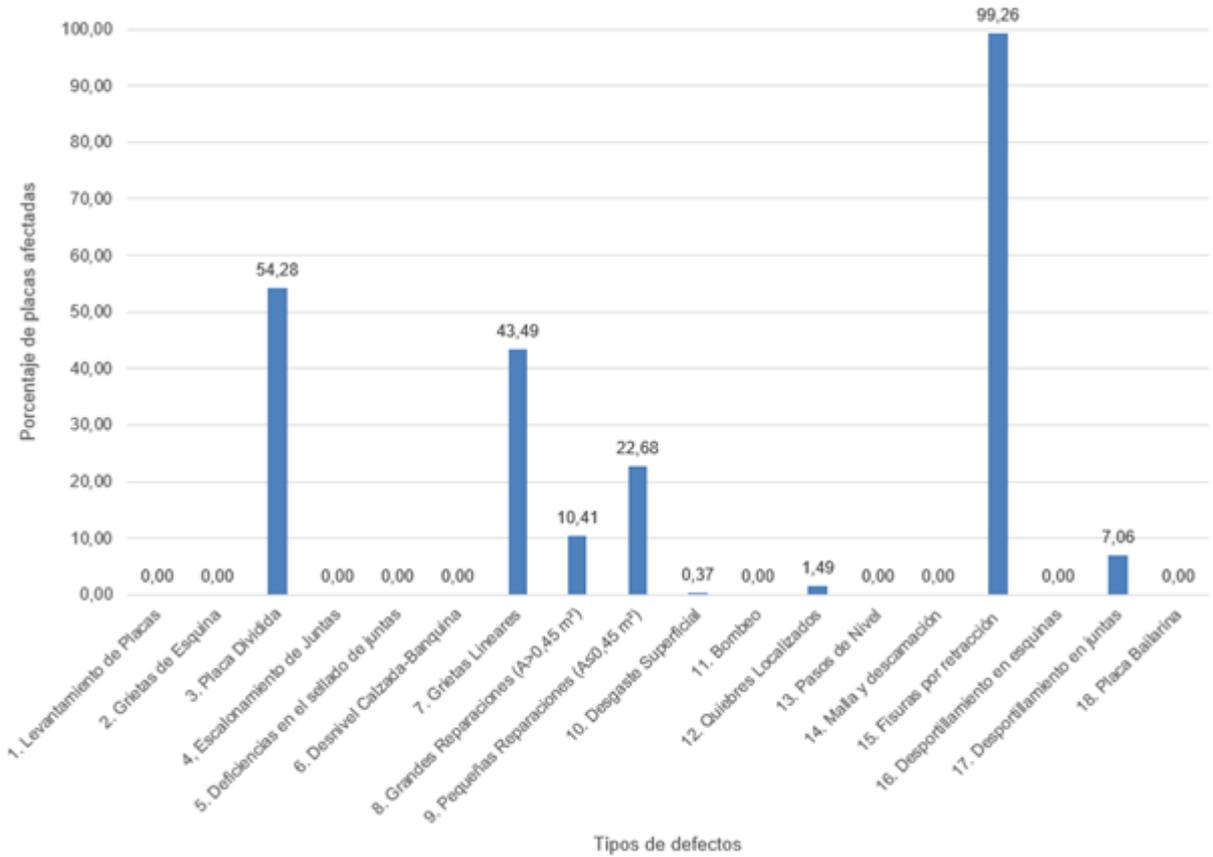
Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

**Figura 25** – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Total – 2016



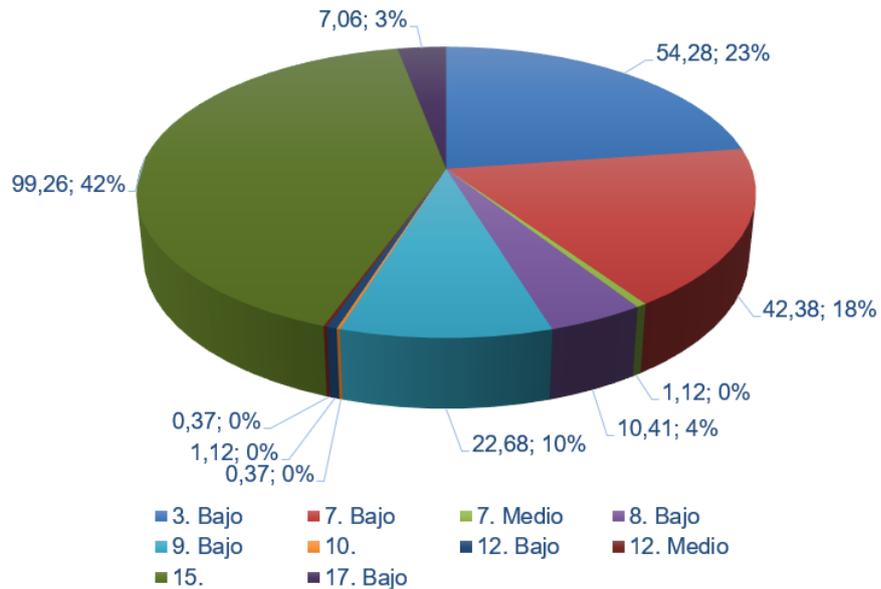
Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

**Figura 26 – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Creciente – 2016**



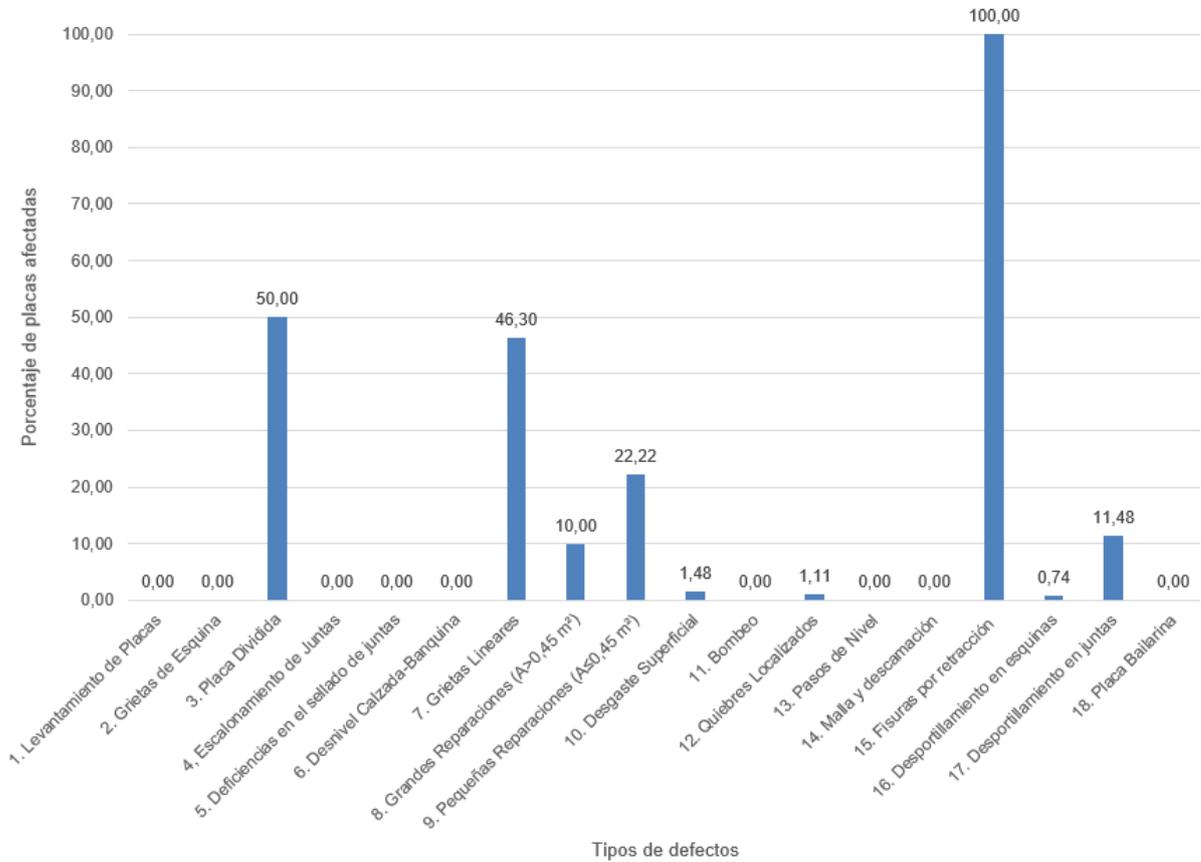
Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

**Figura 27 – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Creciente – 2016**



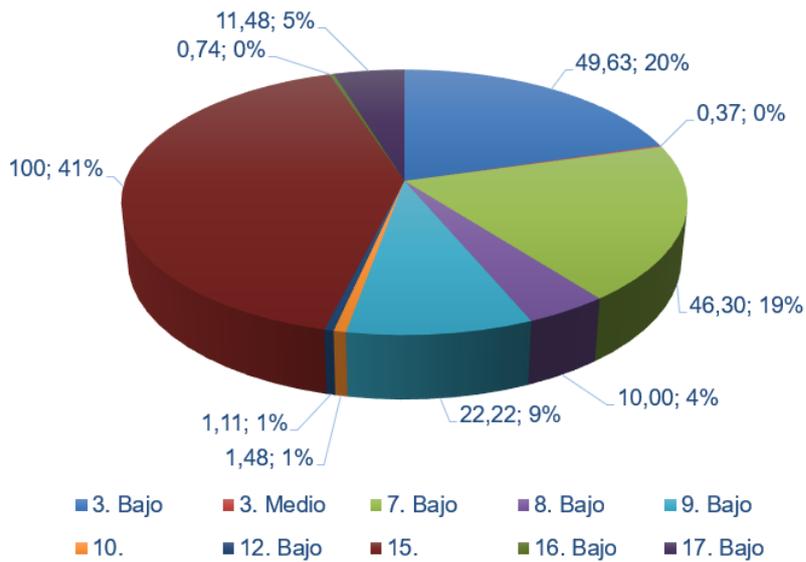
Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

**Figura 28** – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Decreciente – 2016



Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

**Figura 29** – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Decreciente – 2016



Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

De acuerdo con el levantamiento ejecutado en 2016 los defectos que ocurren con más frecuencia son en el siguiente orden el N° 15 – Fisuras por retracción, N° 3 – Placa dividida, N° 7 – Grietas lineares, estos defectos representan el 82 % de los defectos presentados en el pavimento, sin embargo, el defecto que más se presenta no tiene tanto peso en la condición del pavimento como los dos siguientes los cuales son más severos. En todos los defectos presentados la mayoría de ellos son de bajo grado de severidad.

Además, un 32,65 % de las pistas presentan reparaciones de algún tipo, siendo que la mayor parte (22,45 %) son pequeñas, es decir, menor a 0,45 m<sup>2</sup>.

Desglosando, el comportamiento en ambos sentidos creciente y decreciente es similar, con valores de ocurrencia muy cercanos para cada defecto en ambos sentidos. No obstante, se presenta mayor variedad de defectos en el sentido decreciente (9 tipos) que el creciente (8 tipos) siendo este defecto a más el N° 16 – Desportillamiento en las esquinas.

Esta similitud de condición de la superficie de pavimentos se ve reflejada en el ICP medio registrado para cada sentido, la diferencia entre los valores se debe esencialmente a la forma que se distribuyen los defectos en cada sentido y su influencia en el cálculo del ICP, además del grado de severidad de cada defecto.

### 3.2 DATOS DEL LEVANTAMIENTO DE 2019

Para el levantamiento de 2019 fueron analizadas las planillas de conteo de defectos mediante un análisis estadístico de la ocurrencia de estos.

**Tabla 17 – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2019**

Creciente		Decreciente	
Porcentaje de ocurrencia de cada defecto (total de las pistas)		Porcentaje de ocurrencia de cada defecto (total de las pistas)	
Tipo	%	Tipo	%
1. Levantamiento de Placas	0,00	1. Levantamiento de Placas	0,00
2. Grietas de Esquina	0,00	2. Grietas de Esquina	0,00
3. Placa Dividida	7,35	3. Placa Dividida	5,07
4. Escalonamiento de Juntas	0,00	4. Escalonamiento de Juntas	0,00
5. Deficiencias en el sellado de juntas	0,00	5. Deficiencias en el sellado de juntas	0,00
6. Desnivel Calzada-Banquina	0,00	6. Desnivel Calzada-Banquina	0,00
7. Grietas Lineares	85,66	7. Grietas Lineares	75,36
8. Grandes Reparaciones ( $A > 0,45 \text{ m}^2$ )	0,37	8. Grandes Reparaciones ( $A > 0,45 \text{ m}^2$ )	0,00
9. Pequeñas Reparaciones ( $A \leq 0,45 \text{ m}^2$ )	0,00	9. Pequeñas Reparaciones ( $A \leq 0,45 \text{ m}^2$ )	0,00
10. Desgaste Superficial	0,00	10. Desgaste Superficial	1,09
11. Bombeo	0,00	11. Bombeo	0,00
12. Quiebres Localizados	2,21	12. Quiebres Localizados	0,72
13. Pasos de Nivel	0,00	13. Pasos de Nivel	0,00
14. Malla y descamación	0,00	14. Malla y descamación	0,00
15. Fisuras por retracción	2,57	15. Fisuras por retracción	0,72
16. Desportillamiento en esquinas	0,00	16. Desportillamiento en esquinas	0,00
17. Desportillamiento en juntas	0,00	17. Desportillamiento en juntas	0,00
18. Placa Bailarina	0,00	18. Placa Bailarina	0,00

Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020).

La tabla a continuación resume la ocurrencia de los defectos por grado de severidad de estos para aquellos que sean clasificados de esa forma.

**Tabla 18 – Resumen de defectos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) especificado por grado de severidad – 2019**

Defectos en las pistas - Especificado		Defectos en las pistas - Especificado	
Tipo	%	Tipo	%
3. Bajo	7,35	3. Bajo	5,07
7. Bajo	64,71	7. Bajo	69,20
7. Medio	20,96	7. Medio	6,16
8. Bajo	0,37	10.	1,09
12. Bajo	2,21	12. Bajo	0,72
15.	2,57	15.	0,72

Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020).

En el levantamiento de 2019 el ICP medio registrado en el sentido creciente es 73,5 mientras que en el sentido decreciente es 79,6, los conceptos de las placas se presentan a continuación:

**Tabla 19** – Resumen de conceptos en el sentido creciente (Izquierda) y decreciente (Derecha) – 2019

Creciente			Decreciente		
Cocepto	Cantidad	%	Cocepto	Cantidad	%
Bueno	4	28,57	Bueno	0	0,00
Muy Bueno	10	71,43	Muy Bueno	12	85,71
Excelente	0	0,00	Excelente	2	14,29

**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

Para la totalidad del levantamiento se tiene:

**Tabla 20** – Resumen de defectos en la totalidad de la pista – 2019

Creciente + Decreciente	
Porcentaje de ocurrencia de cada defecto (total de las pistas)	
Tipo	%
1. Levantamiento de Placas	0,00
2. Grietas de Esquina	0,00
3. Placa Dividida	6,20
4. Escalonamiento de Juntas	0,00
5. Deficiencias en el sellado de juntas	0,00
6. Desnivel Calzada-Banquina	0,00
7. Grietas Lineares	80,47
8. Grandes Reparaciones ( $A > 0,45 \text{ m}^2$ )	0,18
9. Pequeñas Reparaciones ( $A \leq 0,45 \text{ m}^2$ )	0,00
10. Desgaste Superficial	0,55
11. Bombeo	0,00
12. Quiebres Localizados	1,46
13. Pasos de Nivel	0,00
14. Malla y descamación	0,00
15. Fisuras por retracción	1,64
16. Desportillamiento en esquinas	0,00
17. Desportillamiento en juntas	0,00
18. Placa Bailarina	0,00

**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

**Tabla 21** – Resumen de defectos en la totalidad de la pista especificado por grado de severidad – 2019

Defectos en las pistas - Especificado	
Tipo	%
3. Bajo	6,20
7. Bajo	66,97
7. Medio	13,50
8. Bajo	0,18
10. Único	0,55
12. Bajo	1,46
15. Único	1,64

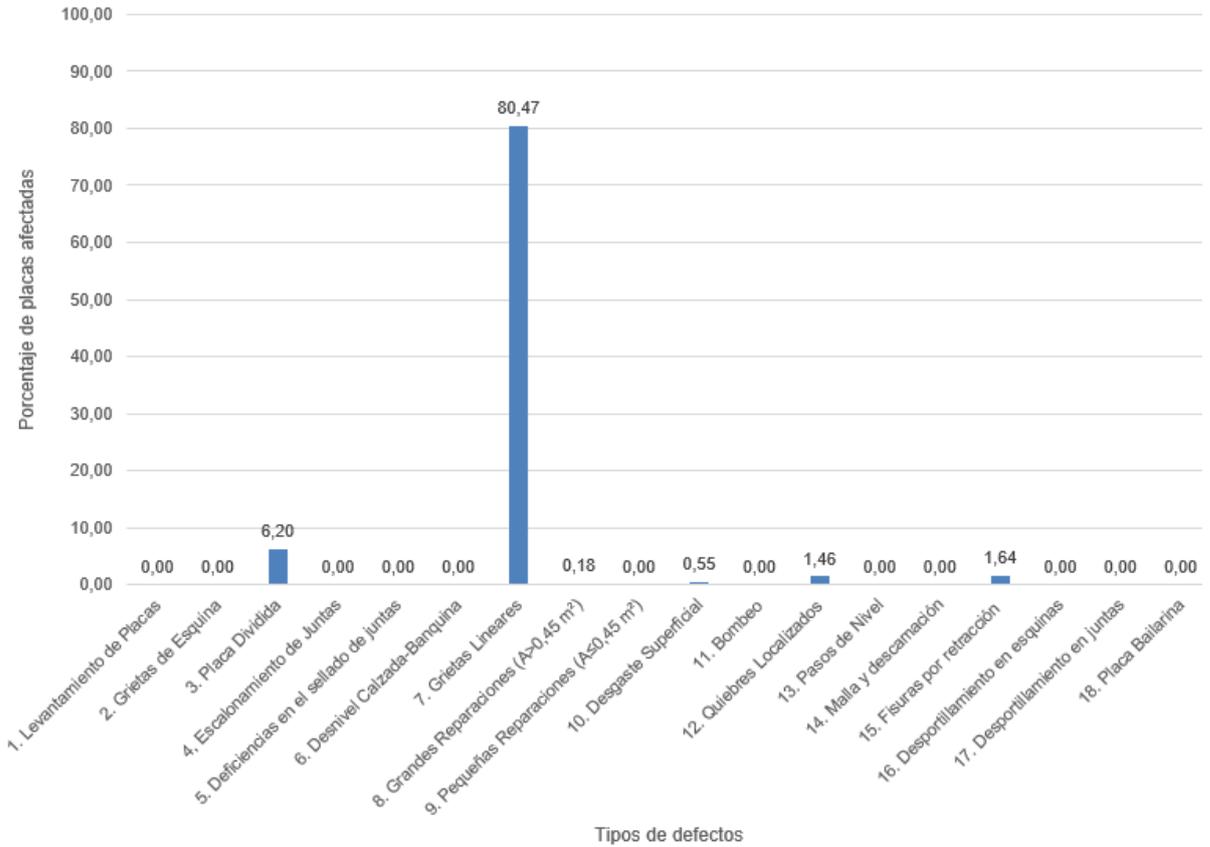
**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

**Tabla 22** – Resumen de conceptos en la totalidad de la pista – 2019

Total		
Cocepto	Cantidad	%
Bueno	4	14,29
Muy Bueno	22	78,57
Excelente	2	7,14

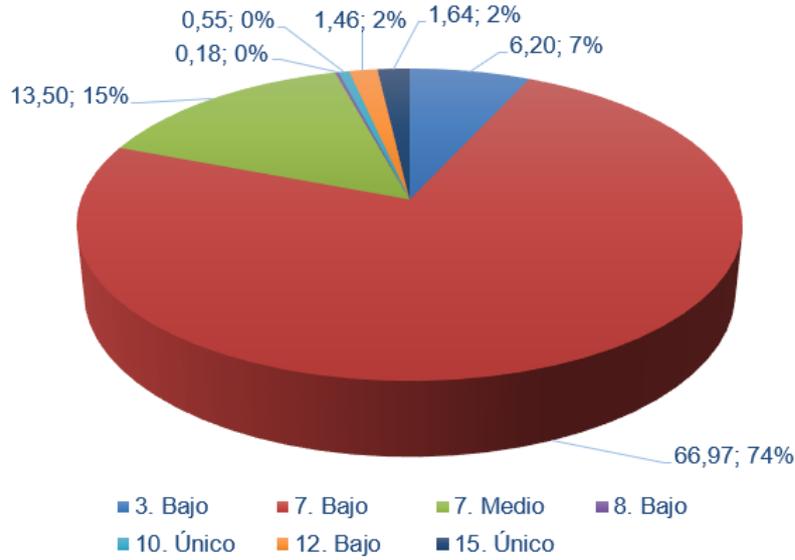
**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

**Figura 30** – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Total – 2019



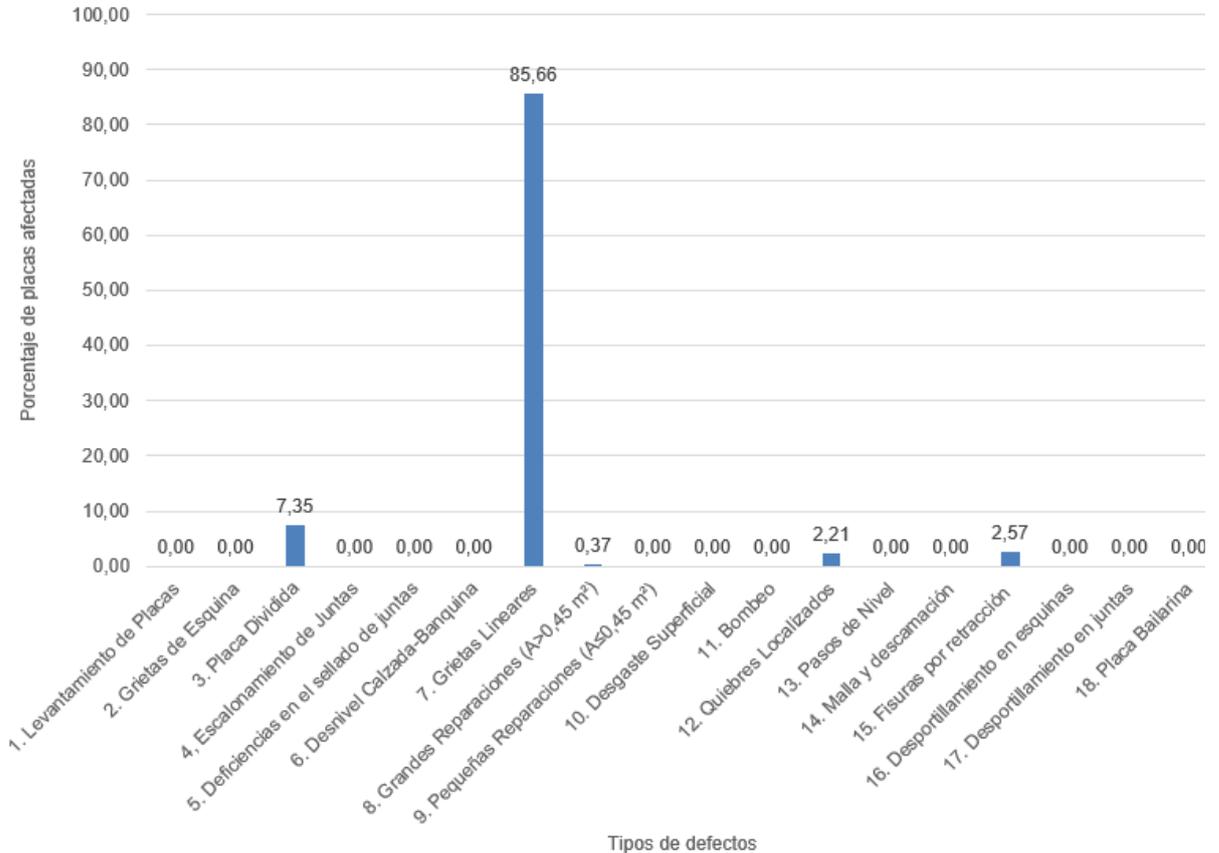
**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020)

**Figura 31 – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Total – 2019**



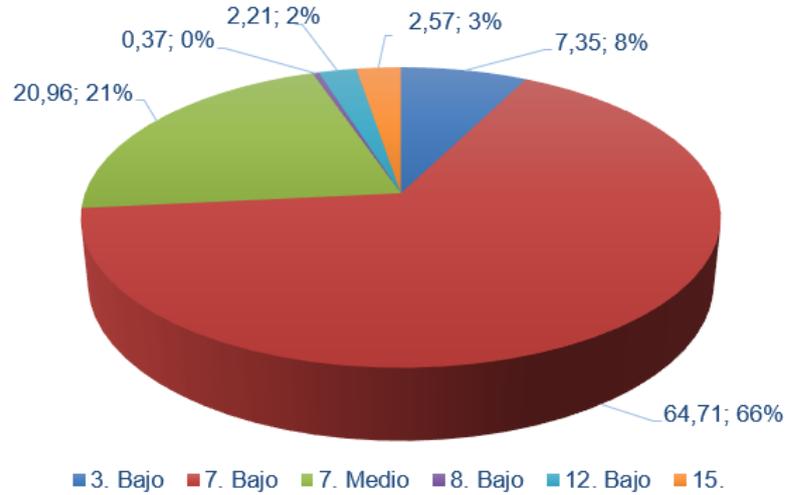
Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020)

**Figura 32 – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Creciente – 2019**



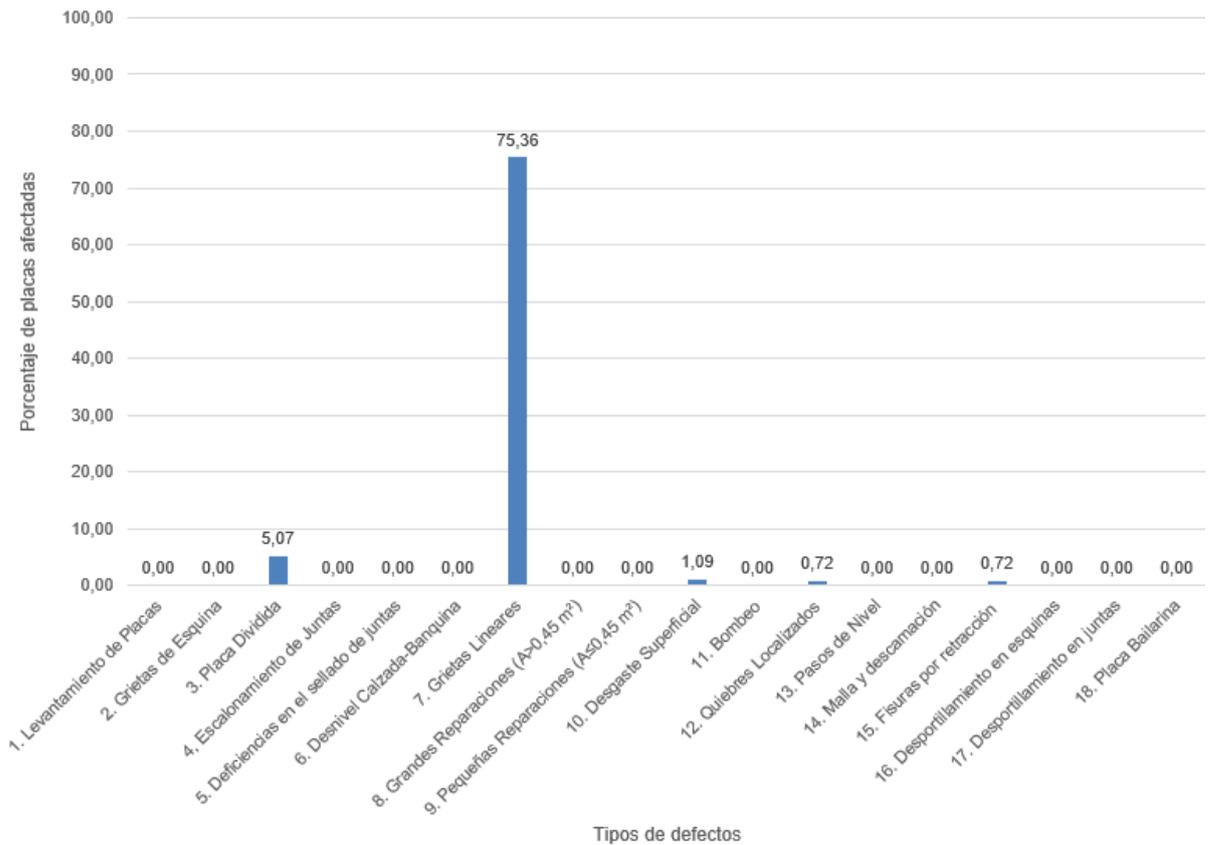
Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020)

**Figura 33** – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Creciente – 2019



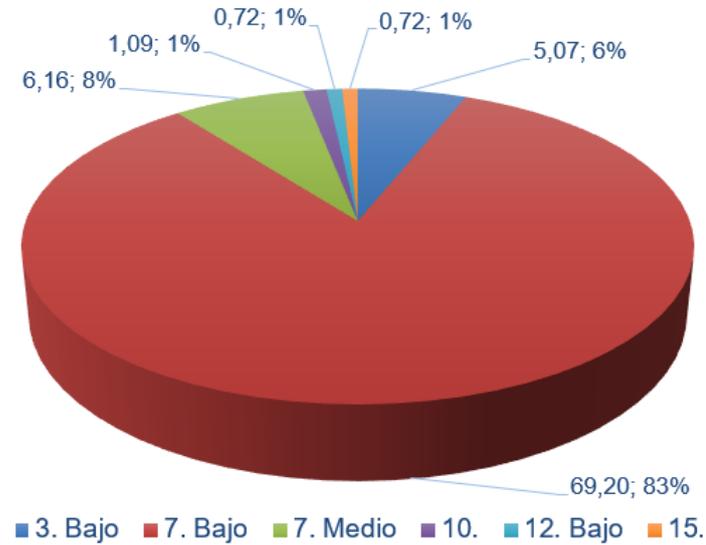
Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020)

**Figura 34** – Porcentajes de placas afectadas por los defectos en la pista – Sentido Decreciente – 2019



Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020)

**Figura 35** – Ocurrencia de cada defecto en la pista – Sentido Decreciente – 2019



Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020)

Por su parte, el levantamiento ejecutado en 2019 indica que el mayor defecto por porcentaje de placas afectadas por el mismo es el N°7 – Grietas lineares, que alcanza al 80,47% de las placas, mientras que el segundo mayor defecto es el N° 3 – Placa dividida con 6,20 %. Los demás defectos juntos representan apenas 3,83% del total.

Específicamente, del total de fisuras/ grietas lineares un 66,97 % es de bajo grado de severidad, mientras que el 13,5 % es de un grado de severidad intermedio.

Se destaca la similitud entre los datos obtenidos por los levantamientos registrados para cada sentido en el que las grietas lineares y placa dividida se mantienen como primer y segundo defecto que más placas afecta respectivamente en cada uno de los sentidos, el ICP se muestra directamente relacionado con la mayor ocurrencia de defectos en el sentido creciente registrando de esa manera menores valores de ICP lo cual representa una peor condición de la superficie del pavimento.

El levantamiento de 2019 indicó que la condición superficial de la pista de aguas abajo se mostró peor al registrado en la pista de aguas arriba y similar al registrado en la pista de la crista con base a los valores de ICP calculados. Por otra parte, la pista de aguas abajo fue la que peor condición de confort demostró tener entre las pistas.

El valor de IRI alto de la pista de aguas abajo clasifica la superficie como en mala, mientras que el valor de ICP clasifica la condición de superficie mayormente como muy buena, esto se debe a que la pista presenta un gran número de daños pero

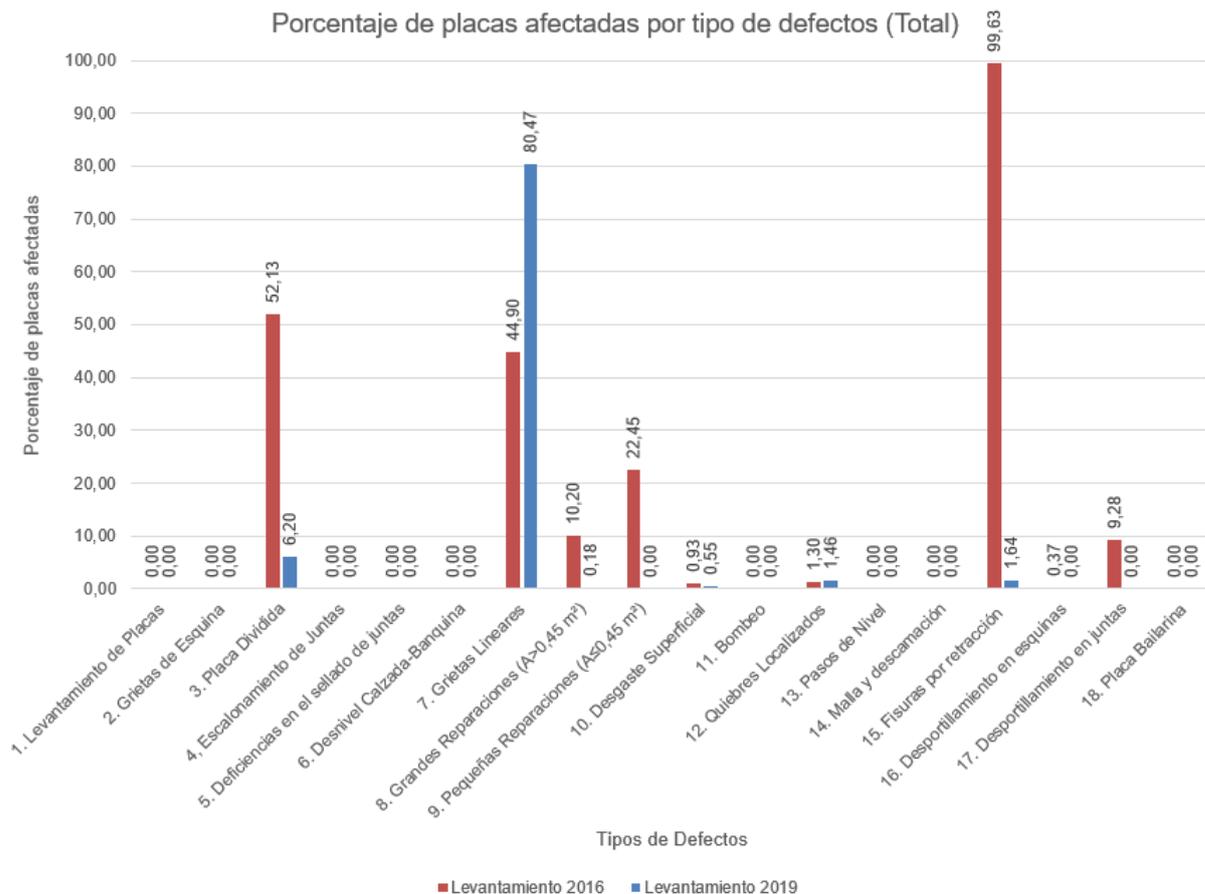
estos no son graves, además de que ambos coeficientes representan condiciones diferentes

Los valores de deflexiones medidos son considerablemente mayores en la pista de aguas abajo en comparación con la pista de aguas arriba que podría ser indicativo de un pavimento más deteriorado estructuralmente en comparación con el otro, cabe resaltar que la edad de estos pavimentos y el tránsito es bastante similar.

### 3.3 DIFERENCIAS LEVANTAMIENTO DE 2016 Y LEVANTAMIENTO DE 2019

Para facilitar la comparación se elaboraron los gráficos presentados a continuación:

**Figura 36 – Comparativa de ocurrencia de defectos 2016 vs 2019 – Total de la Pista**



Fuente: El autor (2021)

Los levantamientos de ambos años se mostraron diferentes, principalmente en lo que respecta a los defectos identificados por quienes ejecutaron los levantamientos.

En el levantamiento de 2016 se identificó un gran porcentaje de placas (54.28 %) que presentaron el defecto N° 3 – Placa dividida. Este defecto es consecuencia de un agravamiento de fisuras y se empieza a considerar cuando la placa se encuentra dividida en más de 4 pedazos por fisuras de severidad baja, por otra parte, en el levantamiento de 2019 se identificaron únicamente 6% de placas con este defecto; sin embargo, se registró un mayor porcentaje del defecto N°7 – Grietas Lineares. Esta diferencia en el registro de los defectos puede deberse a la interpretación de quienes realizaron el levantamiento, considerando que en el levantamiento de 2019 los defectos fueron identificados por el equipamiento es posible asegurar la objetividad del levantamiento, sin embargo, un factor limitante para este levantamiento es el alcance de los sensores laser, los cuales pueden ejecutar un barrido del pavimento mediante una proyección de 4 metros en la pista, como el área transitable de la pista de aguas abajo es de 4,38 metros existe la posibilidad que hayan sido omitidos algunos defectos que podrían influenciar en el cálculo del ICP.

En conclusión, ambos levantamientos presentan una condición superficial del pavimento relativamente similar, a pesar de que el levantamiento de 2019 presenta un panorama de un pavimento en mejores condiciones, el área de barrido máximo del láser pudo haber ocasionado que algunos defectos no sean contabilizados, por lo que se decide considerar como condición del pavimento: Bueno. El levantamiento de 2019 es más completo y presenta una variable hasta entonces desconocida y crucial para valorar la condición del pavimento que sería el confort al transitar, para pavimentos antiguos el valor del IRI varia de 2,5 a 6,0 y para Pavimentos Deteriorados puede considerarse una variación de 4,0 a 11,0 por lo que se puede afirmar que el comportamiento del pavimento está de acuerdo con el de un pavimento antiguo y/ o un pavimento levemente deteriorado; como la velocidad de tránsito no es tan elevada (40 km/h) su estado actual aún permite el tránsito a velocidad usual.

Por último, los valores de ICP obtenidos mediante ambos levantamientos ubican al pavimento entre un rango normal de comportamiento para su edad con base a la literatura correspondiente.

### 3.4 RETRO ANÁLISIS FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

Fue obtenido por medio de retro análisis el Módulo de reacción de la subrasante (k) y el Módulo de Elasticidad (E) por medio del cálculo del parámetro AREA del cuenco de deflexiones y del Radio de rigidez relativa (l) utilizando las fórmulas indicadas en Balbo (2009) las cuales se emplean en unidades inglesas:

**Figura 37 – Fórmulas para retro análisis**

$$\ell = \left[ \frac{\ln \left( \frac{36 - AREA}{1812,279133} \right)}{-2,55934} \right]^{4,387009}$$

$$AREA = 6 \left( 1 + \frac{2d_{30}}{d_0} + \frac{2d_{60}}{d_0} + \frac{d_{90}}{d_0} \right)$$

$$k = \frac{P}{8 \cdot d_0 \cdot \ell^2} \left\{ 1 + \left( \frac{l}{2\pi} \right) \cdot \left[ \ln \left( \frac{a}{2 \cdot \ell} \right) - 0,67278436 \right] \cdot \left( \frac{a}{\ell} \right)^2 \right\}$$

$$E = \frac{12(1 - \mu^2)k \cdot \ell^4}{h^3}$$

Fuente: Balbo (2009)

**Tabla 23 – Retro análisis FWD**

Pista	Sentido	Hodometro	Radio de carga circular (l)	D0	D30	D60	D90	P	AREA	Rigidez Relativa (l)	Módulo de Reacción de la Subrasante (k)	Módulo de Elasticidad (E)
		[km]	[in]	[in]	[in]	[in]	[in]	[lb]	[-]	[in]	[psi/in]	[psi]
Tramo 3B	Creciente	0,000	5,91	0,00614	0,00465	0,00374	0,00232	9539,40	24,65	20,12	478,82	1518847,917
Tramo 3B	Creciente	0,040	5,91	0,00067	0,00047	0,00035	0,00020	9864,31	22,53	17,37	6045,96	10649751,08
Tramo 3B	Creciente	0,080	5,91	0,00157	0,00075	0,00039	0,00035	9770,81	16,05	12,00	5292,41	2118844,798
Tramo 3B	Creciente	0,120	5,91	0,00567	0,00465	0,00402	0,00299	9614,98	27,50	25,66	320,47	2685772,036
Tramo 3B	Creciente	0,160	5,91	0,00413	0,00252	0,00189	0,00150	9817,56	20,37	15,67	1194,80	1394071,23
Tramo 3B	Creciente	0,200	5,91	0,00402	0,00311	0,00260	0,00161	9770,81	25,47	21,46	656,18	2630095,255
Tramo 3B	Creciente	0,240	5,91	0,00402	0,00358	0,00343	0,00256	9766,40	30,76	37,50	216,05	8265247,905
Tramo 3B	Creciente	0,280	5,91	0,00220	0,00130	0,00098	0,00071	9817,56	20,36	15,11	2409,63	2426469,049
Tramo 3B	Creciente	0,320	5,91	0,00323	0,00311	0,00295	0,00244	9801,98	33,07	56,85	117,30	23691853,95
Tramo 3B	Creciente	0,360	5,91	0,00512	0,00413	0,00374	0,00291	9661,73	27,88	26,62	3219764,957	
Tramo 3B	Creciente	0,400	5,91	0,00280	0,00205	0,00173	0,00126	9833,15	24,93	20,56	1033,16	3567626,72
Tramo 3B	Creciente	0,440	5,91	0,00157	0,00138	0,00114	0,00094	9708,48	28,80	23,33	892,43	12769763,77
Tramo 3B	Creciente	0,480	5,91	0,00154	0,00106	0,00075	0,00071	9770,81	22,92	17,77	2496,24	4812082,822
Tramo 3B	Creciente	0,520	5,91	0,00358	0,00280	0,00260	0,00213	9708,48	27,63	25,97	439,72	4398127,343
Tramo 3B	Creciente	0,560	5,91	0,00071	0,00039	0,00031	0,00028	9739,65	20,33	15,08	7458,00	7467879,374
Tramo 3B	Creciente	0,600	5,91	0,00252	0,00193	0,00146	0,00138	9801,98	25,41	21,35	1060,01	4256308,052
Tramo 3B	Creciente	0,640	5,91	0,00102	0,00094	0,00087	0,00083	9817,56	32,08	46,33	557,63	49677966,77
Tramo 3B	Creciente	0,680	5,91	0,00051	0,00043	0,00035	0,00031	9786,40	28,15	27,38	3174,32	34502552,95
Tramo 3B	Creciente	0,720	5,91	0,00909	0,00748	0,00673	0,00500	9632,90	28,05	27,10	180,64	1883358,871
Tramo 3B	Creciente	0,760	5,91	0,00413	0,00402	0,00354	0,00343	9739,65	32,91	54,82	97,86	1708298,82
Tramo 3B	Creciente	0,800	5,91	0,00244	0,00224	0,00217	0,00197	9724,06	32,52	50,39	195,81	2441946,79
Tramo 3B	Creciente	0,840	5,91	0,00555	0,00362	0,00260	0,00142	9786,40	20,98	15,68	886,14	1035711,747
Tramo 3B	Creciente	0,880	5,91	0,00634	0,00465	0,00394	0,00264	9739,65	24,75	20,27	464,23	151355,117
Tramo 3B	Decreciente	0,880	5,91	0,00559	0,00492	0,00453	0,00343	9646,15	29,96	33,63	190,09	4704094,429
Tramo 3B	Decreciente	0,820	5,91	0,00622	0,00551	0,00488	0,00370	9739,65	29,62	32,25	187,57	3923816,324
Tramo 3B	Decreciente	0,780	5,91	0,00197	0,00122	0,00075	0,00055	9801,98	19,68	14,52	2912,40	2506128,561
Tramo 3B	Decreciente	0,740	5,91	0,00476	0,00402	0,00374	0,00276	9599,40	29,01	30,02	278,50	4373166,537
Tramo 3B	Decreciente	0,700	5,91	0,00378	0,00256	0,00240	0,00220	9786,40	25,25	21,08	723,32	2762618,49
Tramo 3B	Decreciente	0,660	5,91	0,00059	0,00047	0,00039	0,00035	9786,40	27,20	24,94	3314,00	24784378,37
Tramo 3B	Decreciente	0,620	5,91	0,00354	0,00256	0,00220	0,00217	9848,73	25,80	22,04	710,41	3244604,558
Tramo 3B	Decreciente	0,580	5,91	0,01047	0,00823	0,00728	0,00520	9614,98	26,75	23,93	193,26	1264314,278
Tramo 3B	Decreciente	0,540	5,91	0,00291	0,00220	0,00197	0,00150	9755,23	26,27	22,94	790,67	4234232,431
Tramo 3B	Decreciente	0,500	5,91	0,00358	0,00272	0,00244	0,00165	9599,40	26,37	23,15	621,52	3443607,555
Tramo 3B	Decreciente	0,460	5,91	0,00283	0,00268	0,00236	0,00130	9755,23	30,08	34,18	367,13	9690798,473
Tramo 3B	Decreciente	0,420	5,91	0,00157	0,00118	0,00098	0,00079	9614,98	25,50	21,51	1638,78	6782773,296
Tramo 3B	Decreciente	0,380	5,91	0,00390	0,00283	0,00043	0,00039	9209,81	16,67	12,37	1898,23	858784,7513
Tramo 3B	Decreciente	0,340	5,91	0,00441	0,00315	0,00291	0,00287	9568,23	26,41	23,22	500,12	2261278,514
Tramo 3B	Decreciente	0,300	5,91	0,00394	0,00280	0,00236	0,00161	9848,73	24,18	19,42	822,39	2263161,756
Tramo 3B	Decreciente	0,260	5,91	0,00465	0,00386	0,00362	0,00272	9632,90	28,83	29,43	300,01	4351098,341
Tramo 3B	Decreciente	0,220	5,91	0,00390	0,00268	0,00209	0,00154	9708,48	23,03	17,90	963,01	1911569,033
Tramo 3B	Decreciente	0,180	5,91	0,00504	0,00374	0,00315	0,00213	9443,56	24,94	20,57	549,70	1902871,458
Tramo 3B	Decreciente	0,140	5,91	0,00189	0,00138	0,00122	0,00106	9537,06	25,88	22,16	1273,94	5965577,34
Tramo 3B	Decreciente	0,100	5,91	0,00315	0,00236	0,00163	0,00154	9632,90	24,38	19,70	983,04	2866547,341
Tramo 3B	Decreciente	0,060	5,91	0,00720	0,00539	0,00449	0,00260	9209,81	24,62	20,08	393,44	1236341,397
Tramo 3B	Decreciente	0,020	5,91	0,00236	0,00217	0,00197	0,00185	9661,73	31,70	43,36	271,35	18588250,59

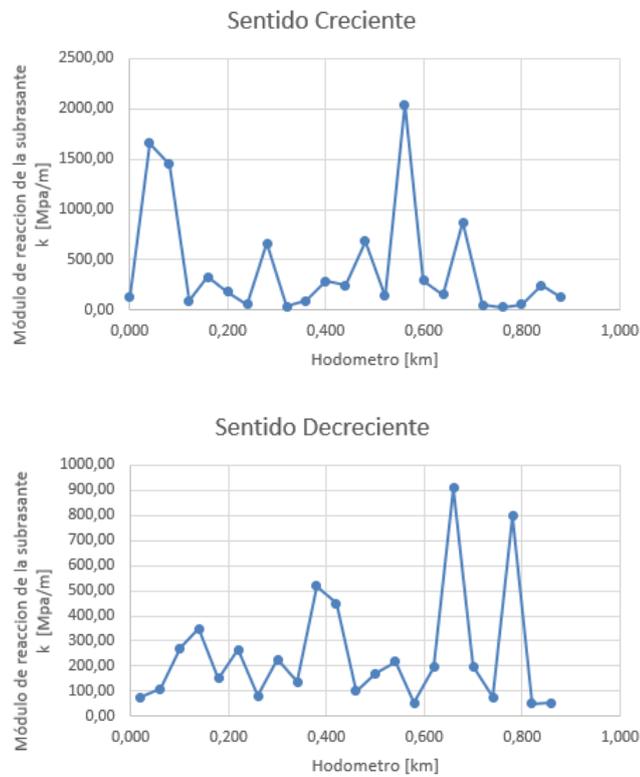
Fuente: Adaptado de ITAIPU (2020).

**Tabla 24 – Módulo de reacción de la subrasante (MPa/m)**

Sentido Creciente		Sentido Decreciente	
Hodometro	k	Hodometro	k
[km]	[Mpa/m]	[km]	[Mpa/m]
0,000	131,18	0,860	52,08
0,040	1656,41	0,820	51,39
0,080	1449,96	0,780	797,91
0,120	87,80	0,740	76,30
0,160	327,34	0,700	198,17
0,200	179,77	0,660	907,94
0,240	59,19	0,620	194,63
0,280	660,18	0,580	54,59
0,320	32,14	0,540	216,62
0,360	90,79	0,500	170,28
0,400	283,05	0,460	100,58
0,440	244,50	0,420	448,98
0,480	683,89	0,380	520,06
0,520	136,91	0,340	137,02
0,560	2043,27	0,300	225,31
0,600	290,41	0,260	82,19
0,640	152,78	0,220	263,84
0,680	869,67	0,180	150,60
0,720	49,49	0,140	349,02
0,760	26,81	0,100	269,32
0,800	53,65	0,060	107,79
0,840	242,78	0,020	74,34
0,880	127,18		

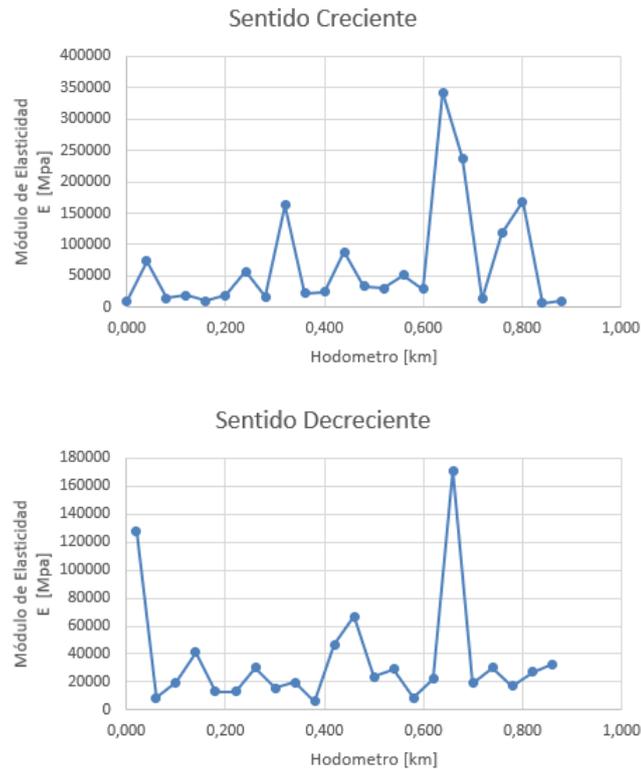
**Fuente:** Adaptado de ITAIPU (2020).

**Figura 38 – Módulo de reacción de la subrasante – Sentido creciente (arriba) y decreciente (abajo)**



**Fuente:** El autor (2021)

**Figura 39** – Módulo de elasticidad – Sentido creciente (arriba) y decreciente (abajo)



**Fuente:** El autor (2021)

Se mostró un comportamiento bastante heterogéneo de la subrasante la cual consiste en la losa de hormigón armado de la casa de fuerza con valores correspondientes al módulo de reacción bastante variados y en un rango muy amplio tanto en el trayecto como entre los carriles. El comportamiento de la pista es heterogéneo con mucha variación en lo que respecta a deflexiones medidas y también como ya mencionado la capacidad de soporte de la fundación.

La capacidad de soporte de la fundación en base al módulo de reacción de la subrasante se mostró heterogénea a lo largo de la pista pero buena, con un valor medio de 429,53 MPa/m para el sentido creciente y 236,91 MPa/m para el sentido decreciente.

Para el análisis del módulo de elasticidad hormigón fue considerado un espesor de 21,5 centímetros considerando lo medido por el GPR y un coeficiente de Poisson  $\nu=0,15$  también mostró un comportamiento heterogéneo con un módulo de elasticidad con mucha variación a lo largo de la pista en ambos sentidos, pero con valores medios de 67785,59 MPa para el sentido creciente y 34136,96 MPa en el sentido decreciente.

## 4 CONCLUSIONES

El estado de la pista es concordante con los años de uso de esta y el tránsito y los esfuerzos a los cuales estuvo sujeta durante ese periodo. La pista de aguas arriba se muestra en mejor estado pese a tener un volumen de tránsito ligeramente mayor debido al proyecto inicial, es válido recordar que la pista de aguas abajo sufrió manifestaciones patológicas de intensidad considerable a temprana edad, esto fue fuertemente influenciado por la disposición de juntas y el elevado esfuerzo al que fue sometida, no obstante, las reparaciones implementadas permitieron extender su vida útil y prevenir un fallo temprano de la pista además de otras posibles consecuencias derivadas de las obstrucciones del drenaje, aun siendo conservadores el pavimento presenta una condición superficial mayoritariamente buena, estructuralmente hablando es muy heterogéneo presentando deflexiones heterogéneas pero bajas en general, por otra parte el retro análisis indica valores de AREA que varían de bajo a alto; estos factores pueden ser indicativos de una subrasante (losa de la casa de fuerza) fuerte sumada a una estructura del pavimento variando entre fuerte y débil.

Las reparaciones pueden extender la vida útil del pavimento, sin embargo, el factor principal para la toma de decisiones referente a reparar o reconstruir es la impermeabilización de la losa de la casa de fuerza. Si la restauración de esa impermeabilización requiere una intervención muy grande en la pista lo más correcto sería la reconstrucción. No habiendo encontrado documentación correspondiente a las infiltraciones, se recomienda verificar el estado de estas y determinar el grado de intervención necesario con base a la condición de la infiltración, deberá ser priorizada la impermeabilización y recuperación de partes dañadas por la infiltración puesto que el riesgo asociado a estos problemas es mayor

Se propone un nuevo proyecto que podrá ser implementado en una eventual reconstrucción del pavimento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p. (978-85-86238-90-1).

FRITSCH, K. **Análise comparativa de manifestações patológicas em pistas paralelas de pavimento rígido**. 2016. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Dinâmica das Cataratas, Foz do Iguaçu, 2016.

ITAIPU BINACIONAL. **Relatório técnico do estado atual do pavimento da pista de jusante da casa de força – Elevação 144,00**. 1988. 62p.

ITAIPU BINACIONAL. **Levantamiento no destructivo de condiciones actuales y evaluación de pavimento existente del área industrial y la subestación de margen derecha de la central hidroeléctrica de Itaipu**. 2020. 798p.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 060/2004 - PRO. **Pavimento rígido - Inspeção visual - Procedimento**. Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponível em: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit060\\_2004\\_pro.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit060_2004_pro.pdf). Acesso em: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Norma DNIT 062/2004 - PRO. **Pavimento rígido – Avaliação Objetiva – Procedimento**. Rio de Janeiro: Ministério de Transportes, 2004. Disponível em: [http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit062\\_2004\\_pro.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dnit062_2004_pro.pdf). Acesso em: 13 abr. 2020.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011. 189p. (IPR. Publ. 745).

## ANEXOS

Figura 40 – Ficha de inspección del levantamiento 2016

FICHA DE INSPEÇÃO							
PISTA: Jusante		TRECHO: _____					
DATA: ____/____/____.							
PLACAS: _____		FOLHA: 001					
OBS: _____		ASSINATURA _____					
_____.							
Placa Nº	PLACA D	PLACA E	TIPOS DE DEFEITOS				
1		3-B	1. Alçamento de placas	11. Bombeamento			
		8-B	2. Fissura de canto	12. Quebra localizadas			
		15	3. Placa dividida	13. Passagem de nível			
2	15	3-B	4. Degrau de junta	14. Rendilhamento e			
		15	5. Def. selag.	15. Fissuras de retração			
			6. Desn. Pav.	16. Quebra de canto			
			7. Fissuras lineares	17. Esborciamento de juntas			
3	3-B	7-B	8. Grandes reparos	18. Placa bailarina			
	15	15	9. Pequenos	19. Assentamento			
			10. Desgaste	20. Buracos			
4	7-B	7-B	TIPOS - SEVERID ADE	Nº DE PLACAS AFETADA	% DE PLACAS AFETADA	VALOR DEDUTÍVEL	VD >5
	15	15	3-B	13	68,42%	43	43
5	3-B	3-B	3-M				
	15	15	5-M	X	X	4	
			7-B	5	26,32%	10	11
			7-M				
6	7-B	3-B	8-B	4	21,05%	7	7
	15	15	9-B				
			10				
			12-B				
7	3-B	3-B	12-M				
	15	15	15	19	100,00%	4	
	8-B		16-B				
			17-B			2	
8	3-B	3-B					
	8-B	15					
	15						
9	3-B	3-B	TOTAL	41	215,79%		
	15	15	VALOR DEDUTÍVEL TOTAL				61
10	3-B	7-B	VALOR DEDUTÍVEL CORRIGIDO (VDC) q=				39
	15	15	ICP= 61				
	8-B		CONCEITO=				BOM

Fuente: Adaptado de Fritsch (2016)

Figura 41 – Ficha de inspección del levantamiento 2019

Rodovia	Tramo 3B	Segmento:	Tramo		Sentido:	Crescente		
Data:	17/09/2019	km:	0,000	Faixa:	1,0	Avaliador:	Junior Maia	
CADASTRO				TIPOS DE DEFEITO (VER DNIT 061/2004 - TER)				
Nº Placa	DEFEITO	Nº Placa	DEFEITO					
1		11	3B	1. Alçamento de placas 2. Fissura de canto (< 1,80 m) 3. Placa dividida 4. Degrau de junta 5. Defeito na selagem das juntas 6. Desnível pavimento-acostamento 7. Fissuras lineares 8. Grandes reparos (> 0,45 m <sup>2</sup> ) 9. Pequenos reparos (≤ 0,45 m <sup>2</sup> )		10. Desgaste superficial 11. Bombeamento 12. Quebras localizadas 13. Passagem de nível 14. Rendilhamento e escamação 15. Fissuras de retração plástica 16. Quebra de canto (< 0,60 m) 17. Esborcinamento de juntas (L < 60 cm) 18. Placa bailarina		
2		12	3B					
3		13	7B	TIPOS DE DEFEITOS	GRAUS DE SEVERIDADE	Nº DE PLACAS AFETADAS	% DE PLACAS AFETADAS	VALOR DEDUZÍVEL
4	7B	14	3B	7	Baixo	8	40%	16
				7	Médio	5	25%	17
5	3B	15	7B					
6	7B	16	7B					
7	7M	17	7B					
8	7M	18	7M					
9	7M	19	7B					
				VALOR DEDUZÍVEL TOTAL				32
10	7M	20	7B	VALOR DEDUZÍVEL CORRIGIDO (VDC) q =1				2
				IPC = 100 - VDC		74	CONCEITO	Muito Bom

Fuente: ITAIPU (2020)



















































**APÉNDICE C – PROPUESTA DE PROYECTO DE PISTA DE AGUAS ABAJO –  
MEMORIAL DE CÁLCULO Y PROYECTO GEOMÉTRICO Y DE JUNTAS**



**Ministerio de Educación**  
**Universidad Federal de la Integración Latinoamericana**  
**Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio**  
Centro Interdisciplinar de Tecnología e Infraestructura  
Ingeniería Civil de Infraestructura

**PROPUESTA DE PROYECTO DE PISTA DE AGUAS ABAJO –  
MEMORIAL DE CÁLCULO Y PROYECTO GEOMÉTRICO Y DE  
JUNTAS**

**Orientando:** Christian Gabriel González Denton

**Orientador:** Prof°. Dr°. Noé Villegas Flores

Foz de Iguazú, PR

Junio de 2021

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Pista de Aguas Abajo .....	261
<b>Figura 2</b> – Sección Transversal .....	262
<b>Figura 3</b> – Factores ESALF para cada vehículo .....	265
<b>Figura 4</b> – Relación de soporte de CBR .....	269
<b>Figura 5</b> – Ecuaciones AASHTO 1993 por el Ing. Vásquez .....	271
<b>Figura 6</b> – Ventana gráfica EqAASHTO 93 .....	271
<b>Figura 7</b> – Resultado de Salida del Software.....	272
<b>Figura 8</b> – Captura de Pantalla Software PCAcálculo .....	273
<b>Figura 9</b> – Captura de Pantalla de la interfaz del software .....	273
<b>Figura 10</b> – Captura de Pantalla del archivo .txt generado por el software .....	274
<b>Figura 11</b> – Análisis de Sensibilidad de la estructura propuesta .....	275
<b>Figura 12</b> – Interfaz DowelCAD. ....	276
<b>Figura 13</b> – Diámetro, longitud y espaciamiento de barras de transferencia.....	276
<b>Figura 14</b> – Disposición de las barras de anclaje .....	278
<b>Figura 15</b> – Tela Soldada tipo Q (Acero CA-60).....	279
<b>Figura 16</b> – Longitud de placa – Espesor de placa ( $L/l = 4,4$ ) .....	280
<b>Figura 17</b> – Longitud de placa – Espesor de placa ( $L/l \leq 5,0$ ).....	280
<b>Figura 18</b> – Croquis disposición de placas y armaduras. ....	281
<b>Figura 19</b> – Tamaños recomendados por la ACPA .....	284
<b>Figura 20</b> – Profundidad de Backer Rod recomendado por el Departamento de Transporte de Florida .....	285
<b>Figura 21</b> – Implementación Backer Rod .....	285
<b>Figura 22</b> – Plano del Proyecto Propuesto .....	286
<b>Figura 23</b> – Análisis de Sensibilidad – Espesor de Losa .....	288
<b>Figura 24</b> – Análisis de Sensibilidad – Módulo de Rotura .....	288
<b>Figura 25</b> – Análisis de Sensibilidad – Módulo de Reacción del Conjunto .....	289

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> – Característica de la Pista de Aguas Abajo .....	263
<b>Tabla 2</b> – Conteo de Tráfico (2016) .....	264
<b>Tabla 3</b> – Conteo de Tráfico Estimado (2020) .....	264
<b>Tabla 4</b> – Factor de Daño Ejes Equivalentes .....	265
<b>Tabla 5</b> – Ejes Equivalentes y Tráfico Acumulado .....	266
<b>Tabla 6</b> – Ejes / 1000 .....	267
<b>Tabla 7</b> – Confiabilidad AASHTO 93.....	267
<b>Tabla 8</b> – Desvío Estándar AASHTO 93.....	268
<b>Tabla 9</b> – Índice de Serviciabilidad - Manual de Carreteras del Paraguay.....	268
<b>Tabla 10</b> – Coeficiente de Drenaje AASHTO 93.....	269
<b>Tabla 11</b> – Resistencia a la flexo tracción (promedio a los 28 días) .....	270
<b>Tabla 12</b> – Coeficiente de Transferencia de Carga AASHTO 93.....	270

## INDICE

<b>1 GENERALIDADES .....</b>	<b>261</b>
<b>2 MEMORIAL DE CÁLCULO .....</b>	<b>261</b>
2.1 Proyecto .....	261
2.1.1 Descripción.....	261
2.1.2 Antecedentes .....	262
2.1.3 Memorial de Cálculo.....	264
2.1.3.1 <i>Conteo de tránsito</i> .....	264
2.1.3.2 <i>Determinación de Ejes Equivalentes</i> .....	265
2.1.3.3 <i>Confiabilidad y Desviación Estándar</i> .....	267
2.1.3.4 <i>Serviciabilidad</i> .....	268
2.1.3.5 <i>Determinación del coeficiente de drenaje (<math>C_d</math>)</i> .....	268
2.1.3.6 <i>Módulo de reacción de la subrasante (<math>k</math>)</i> .....	269
2.1.3.7 <i>Propiedades del Hormigón</i> .....	270
2.1.3.8 <i>Coeficiente de Transferencia de Carga (<math>J</math>)</i> .....	270
2.1.3.9 <i>Verificación AASHTO 93</i> .....	271
2.1.3.10 <i>Verificación PCA – 1984</i> .....	272
2.1.3.11 <i>Verificación Pasadores</i> .....	275
2.1.3.12 <i>Verificación de Barras de Anclaje</i> .....	276
2.1.3.13 <i>Armadura de retracción</i> .....	278
<b>3 PROYECTO GEOMÉTRICO Y DE JUNTAS .....</b>	<b>279</b>
3.1 Implementación de las juntas .....	279
3.1.1 Juntas Transversales .....	279
3.1.1.1 <i>Junta Transversal de retracción:</i> .....	281
3.1.1.2 <i>Junta Transversal de Expansión:</i> .....	282
3.1.2 Juntas Longitudinales.....	283
3.1.3 Sellante de Juntas .....	283
3.1.4 Impermeabilización de la Casa de Fuerza .....	285

3.1.5 Plano del Proyecto Propuesto .....	286
3.1.6 Ejecución del hormigonado de las placas .....	286
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>287</b>
<b>APENDICE.....</b>	<b>288</b>
<b>ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....</b>	<b>288</b>
<b>PLANO – PROPUESTA DE PROYECTO DE PISTA DE AGUAS ABAJO.....</b>	<b>290</b>

## 1 GENERALIDADES

El presente documento consiste en la propuesta de un nuevo proyecto para la pista de aguas abajo en base a lo expuesto en el documento al que da continuación “Análisis de defectos e histórico de la pista de aguas abajo”.

## 2 MEMORIAL DE CÁLCULO

### 2.1 PROYECTO

#### 2.1.1 Descripción

El proyecto tiene lugar en la elevación 144,00 m aguas abajo del eje extendiéndose desde el Área de Montaje Derecha hasta el Bloque V1 y es de vital importancia para el buen desenvolvimiento de las actividades en la entidad y la integración de ambas márgenes.

Figura 1 – Pista de Aguas Abajo

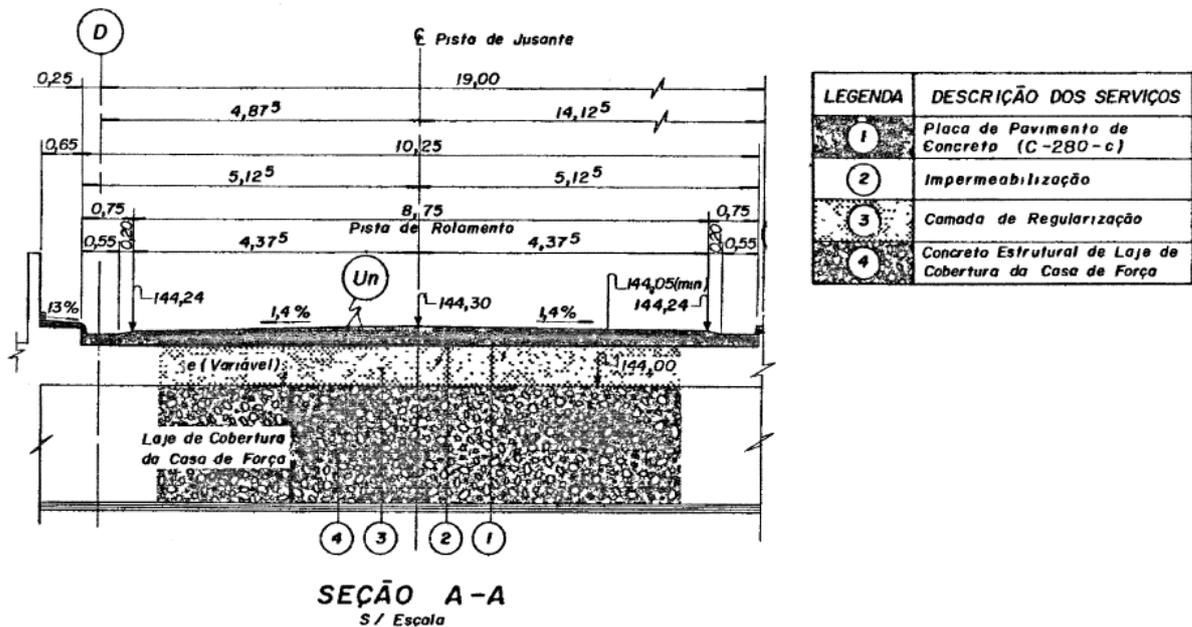


Fuente: El autor (2020).

2.1.2 Antecedentes

Se verificó la información existente del proyecto original y actual de la pista de pavimento rígido de aguas abajo de la elevación 144,00 m. En la figura a continuación se presenta la sección transversal tipo entre las unidades U1 y U15, esta configuración de materiales se mantiene en toda la extensión de la casa de fuerza.

Figura 2 – Sección Transversal



Fuente: ITAIPU (2020).

Estructura de la pista:

- Capa de rodadura/ Estructural: Consta de una placa en hormigón de espesor variable;
- Capa de Impermeabilización y Amortiguamiento;
  - Capa de amortiguamiento consistente en Filtros Asfálticos 500/20 y Masilla Anti-compresión;
  - Impermeabilización a base de solución de Neopreno e Hypalon.
- Sub-Base y Fundación;
  - Capa de regularización en hormigón pobre de espesura variable pero no menor a cinco centímetros;
  - Apoyado sobre el hormigón estructural de la losa de cobertura de la casa de fuerza.

La tabla a continuación resume las características principales de la pista posterior a los reparos ejecutados tras los defectos presentados en 1988.

**Tabla 1 – Característica de la Pista de Aguas Abajo**

<b>Pista de Aguas Abajo</b>						
<b>Trecho</b>	<b>Espesor de la placa [m]</b>	<b>Ancho de las placas [m]</b>	<b>Largo de las placas [m]</b>	<b>Armadura Distribuida</b>	<b>Juntas Longitudinales</b>	<b>Juntas Transversales</b>
AMD	≈ 0,15	5,075	8,5	No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal)	Junta de Articulación sin barras de transferencia	Juntas de retracción a cada 34 m. Juntas de Control a cada 8,50 m.
U1 - U15	≈ 0,15	5,075	2,83	No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal)	Juntas de Articulación. Tipo Macho y Hembra, con barras de unión Ø20 c/60 cm (CA-50) L=76 cm.	Juntas de expansión a cada 34 m. Juntas de retracción a cada 8,50 m. <hr/> Juntas de contracción a cada 2,83 m.
U16- U18A	≈ 0,15	5,075	4,25	No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal)	Juntas de Articulación. Tipo Macho y Hembra, con barras de unión Ø20 c/60 cm (CA-50) L=76 cm.	Juntas de expansión con labios poliméricos a cada 17 m. Juntas de Retracción a cada 4,25m
V1	≈ 0,15	5,075	3,93	No Estructural Ø 5,6 mm c/30 cm (Transversal) Ø 7,1 mm c/10 cm (Longitudinal)	Juntas de Articulación. Tipo Macho y Hembra, con barras de unión Ø20 c/60 cm (CA-50) L=76 cm.	Juntas de expansión con labios poliméricos a cada 19,65 m. Juntas de Retracción con labios poliméricos a cada 3,93m

Referencias: Archivo Técnico Itaipu

Fuente: El Autor (2020).

### 2.1.3 Memorial de Cálculo

A seguir se detalla el procedimiento seguido para determinación de la estructura del nuevo pavimento propuesto de la pista de aguas abajo. Para la elaboración del proyecto se utilizaron los métodos de American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO 93 y el método definido por la Portland Cement Association – PCA 84.

#### 2.1.3.1 Conteo de tránsito

A partir de los datos de conteo de tránsito obtenidos en el 2016 se realizó una equivalencia al año 2020 considerando un crecimiento del 2% al año en la cantidad de vehículos que transitan diariamente por la pista de aguas abajo.

**Tabla 2 – Conteo de Tráfico (2016)**

<b>Conteo de tráfico Pista de Aguas Abajo</b>				
<b>Vehículo</b>	<b>Sentido B-P</b>	<b>Sentido P-B</b>	<b>Dos Sentidos</b>	<b>%</b>
A	67	198	265	36,3
B	51	84	135	18,5
C (2C)	158	68	226	31,0
D (3C)	80	9	89	12,2
E (2C)	4	8	12	1,6
F (3C)	1	0	1	0,1
G	0	2	2	0,3
Total	361	369	730	100,0

**Fuente:** El Autor (2020).

**Tabla 3 – Conteo de Tráfico Estimado (2020)**

<b>Conteo de tráfico Pista de Aguas Abajo Equivalente (2020)</b>				
<b>Vehículo</b>	<b>Sentido B-P</b>	<b>Sentido P-B</b>	<b>Dos Sentidos</b>	<b>%</b>
A	74	219	293	36,3
B	56	93	149	18,5
C (2C)	174	75	250	31,0
D (3C)	88	10	98	12,2
E (2C)	4	9	13	1,6
F (3C)	1	0	1	0,1
G	0	2	2	0,3
Total	399	407	806	100,0

**Fuente:** El Autor (2020).

### 2.1.3.2 Determinación de Ejes Equivalentes

Se determinaron los ejes equivalentes en el periodo de diseño considerado de **20 años** a partir de la determinación de los números de repeticiones de un eje simple con rodadura doble de 8,2 t que causarían los mismos daños que los vehículos considerados (ESALF por sus siglas en inglés).

Se calculan entonces los factores de daño correspondiente a los ejes de cada vehículo a partir de las fórmulas a continuación:

**Figura 3** – Factores ESALF para cada vehículo

Valores de ESALF para diferentes ejos	
Simple Rodagem Simple	$ESALF = (P/6,6)^4$
Simple Rodagem Dupla	$ESALF = (P/8,16)^4$
Tandem Duplo Rodagem Dupla	$ESALF = 2(P/7,55)^4$
Tandem Triplo Rodagem Dupla	$ESALF = 3(P/7,63)^4$
P = Peso por eixo em toneladas Peso Total do Conjunto Tandem, dividido por 2 para Tandem Duplo e por 3 para Tandem Triplo	

Fuente: DNIT (2005)

Los factores de daño para cada vehículo están descritos a continuación:

**Tabla 4** – Factor de Daño Ejes Equivalentes

Factor de Daño							
Vehículo	Peso por eje (t)			Equivalencia ESALF			F.D
	E1	E2	E2E3	FcE1	FcE2	FcE2E3	
Bus (2C)	6,00	10,00		0,68	2,26		2,94
Bus (3C)	6,00		13,50	0,68		1,28	1,96
Camión (2C)	6,00	10,00		0,68	2,26		2,94
Camión (3C)	6,00		17,00	0,68		3,21	3,90

Fuente: Adaptado de DNIT (2005).

A seguir se determina el Número de Ejes Equivalentes en el carril de diseño a través de la siguiente expresión:

$$W_{18} = D_D \times D_L \times W_{18}^{\wedge}$$

Donde:

- $W_{18}$  = Tráfico en el carril de diseño;
- $D_D$  = Factor de distribución direccional, toma en cuenta la distribución de las cargas por dirección. Se toma como **0,8** considerando que la mayor parte del tránsito pesado se encuentra en el sentido Brasil – Paraguay y siendo este el valor medio de la relación entre el tránsito en este sentido y el tránsito total correspondiente a los buses;
- $D_L$  = Factor de distribución por carril, considera la distribución de cargas cuando hay dos o más carriles en un mismo sentido. Por tratarse de una pista con un carril para cada sentido, se considera este valor de **100%**;
- $W_{18}^{\wedge}$  = Tránsito acumulado previsto en ambas direcciones para el período de diseño, el cual es calculado a través de la expresión a seguir.

$$W_{18}^{\wedge} = TMDA_{horizonte\ de\ diseño} \times \frac{[(1 + i)^n - 1]}{i} \times 365$$

**Tabla 5 – Ejes Equivalentes y Tráfico Acumulado**

Vehículos	Conteo	%	F.D	Trafico Equivalente	Trafico Acumulado
<b>Autos</b>	293	36,3	0	0	
<b>Camionetas</b>	149	18,5	0	0	
<b>Buses</b>					
<b>2C</b>	250	31,0	2,94	733	1770319
<b>3C</b>	98	12,2	1,96	193	697161
<b>Camiones</b>					
<b>2C</b>	13	1,6	2,94	39	93999
<b>3C</b>	1	0,1	3,90	4	7833
<b>Motos</b>	2	0,3	0	0	
<b>Total</b>	806	100,0		969	
<b>W18</b>				6875799	2569312

**Fuente:** El Autor (2020).

Tabla 6 – Ejes / 1000

Ejes/1000			
Simples		Tandem	
6t	2569,3	13,5t	697,2
10t	1864,3	17t	7,8

Fuente: El Autor (2020).

### 2.1.3.3 Confiabilidad y Desviación Estándar

La probabilidad de que el pavimento cumpla con su función prevista para el periodo de diseño y condiciones proyectadas se define como confiabilidad, esta tiene un impacto en el costo de construcción, pavimentos con alta confiabilidad tienen un mayor costo inicial entre tanto que pavimentos con una menor confiabilidad tienen un mayor costo de mantenimiento.

En el sistema vial que comprenden las pistas de la usina de Itaipu la pista de aguas abajo podría ser considerada como una arteria principal, en base a las recomendaciones de la AASHTO presentes en la tabla a continuación, se optó por una confiabilidad de  $Z=85\%$ .

Tabla 7 – Confiabilidad AASHTO 93

Tipo de Vía	Confiabilidad R (%)	
	Zona Urbana	Zona Rural
Rutas Interestatales y Autopistas	85-99,9	80-99,9
Arterias Principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

En lo que a desviación estándar se refiere, los valores que la AASHTO recomienda a partir de un análisis de varianza que existía en el AASHTO Road Test y predicciones de tránsito futuro se encuentran en la tabla a continuación. Se toma como valor de desvío  $S_0=0,39$ .

**Tabla 8 – Desvío Estándar AASHTO 93**

Variación del comportamiento del tránsito	Desvío Estándar $S_0$	
	Rígido	Flexible
Con variación	0,39	0,49
Sin variación	0,34	0,44

**Fuente:** Adaptado de AASHTO (1993)

#### 2.1.3.4 Serviciabilidad

Es la capacidad de servir al tráfico que hará uso de la infraestructura, el índice de serviciabilidad presente (PSI) sirve como parámetro para medir la transitabilidad de la vía y varía desde 0 (intransitable) a 5 (Perfectas condiciones).

El índice de serviciabilidad inicial corresponde a la serviciabilidad al momento de poner a servicio el camino, entre tanto que el índice de serviciabilidad final corresponde al menor valor que puede tener un pavimento antes de que resulte molesto el tránsito por el mismo.

En la tabla 8 se encuentran los valores recomendados en el Manual de Carreteras del Paraguay. Sin embargo, para la serviciabilidad inicial será adoptado un valor de  $p_i=4,5$  y serviciabilidad final  $p_f=2,5$ .

**Tabla 9 – Índice de Serviciabilidad - Manual de Carreteras del Paraguay**

<b>Índice de Serviciabilidad Inicial (<math>p_i</math>)</b>	4,2
<b>Índice de Serviciabilidad Final (<math>p_f</math>)</b>	2

**Fuente:** Adaptado de MOPC (2011).

#### 2.1.3.5 Determinación del coeficiente de drenaje ( $C_d$ )

Se considera un valor coeficiente de drenaje  $C_d=1,0$  para una calidad de drenaje regular y un porcentaje de tiempo en el que el pavimento está expuesto a valores próximos a la saturación de entre 5 y 25 % conforme indicado en la tabla 10.

**Tabla 10 – Coeficiente de Drenaje AASHTO 93**

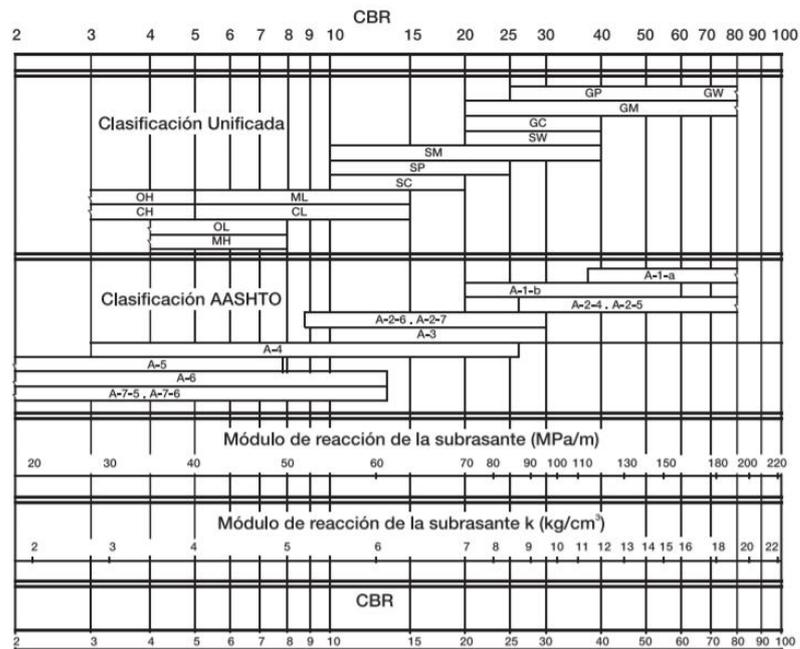
Calidad de Drenaje	Porcentaje de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	<1%	1 a 5%	5 a 25%	>25%
Excelente	1,25 a 1,20	1,20 a 1,15	1,15 a 1,10	1,10
Buena	1,20 a 1,15	1,15 a 1,10	1,10 a 1,00	1,00
Regular	1,15 a 1,10	1,10 a 1,00	1,00 a 0,90	0,90
Pobre	1,10 a 1,00	1,00 a 0,90	0,90 a 0,80	0,80
Muy pobre	1,00 a 0,90	0,90 a 0,80	0,80 a 0,70	0,70

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

2.1.3.6 Módulo de reacción de la subrasante (k)

Se considera un **CBR=3%** para la subrasante, utilizando las relaciones en la siguiente figura podemos obtener un valor de módulo de reacción de la subrasante **k=28.40 MPa/m** o bien **k=104.62 Psi/in.**

**Figura 4 – Relación de soporte de CBR**



Fuente: AASHTO (1993)

Al adicionar una subbase en hormigón pobre considerando módulo de elasticidad de **10350 MPa** y considerar espesor de la subbase 50 mm el valor combinado es **k=64.8 MPa/m** o **238.72 Psi/in.**

### 2.1.3.7 Propiedades del Hormigón

El hormigón debe tener como resistencia a la flexotracción a los 28 días de entre 4,8 – 5,4 MPa considerando como vía principal dentro del sistema vial de la represa conforme la tabla 21.1 del Manual de Carreteras del Paraguay, para lo cual se considera al hormigón con **fck=40 MPa** o **5801,51 PSI** y por ende una resistencia a la flexotracción de **5,2 MPa** o **754.196 PSI**. El módulo de elasticidad del hormigón considerado es de **E=35100 MPa** o **5090824.6 PSI**.

**Tabla 11 – Resistencia a la flexo tracción (promedio a los 28 días)**

Tipo de Vía	Resistencia a la Flexotracción (Mpa)
Vías principales y Autopistas	4,8 - 5,4
Vías Colectoras	4,6 - 5,0
Caminos Secundarios	4,2 - 4,8

**Fuente:** Adaptado de MOPC (2011).

### 2.1.3.8 Coeficiente de Transferencia de Carga (J)

Por tratarse de un pavimento en hormigón simple con juntas y berma anclada se considera el valor de **J=2.8**. Nota: el pavimento se considera como berma unida por su extensión de carril en el proyecto geométrico que permite mantener el tráfico alejado del borde.

**Tabla 12 – Coeficiente de Transferencia de Carga AASHTO 93**

Berma	Asfalto		PCC unido	
	Si	No	Si	No
<b>Dispositivos de Transferencia de Cargas</b>				
<b>Tipo de Pavimento</b>				
<b>1. Simple con juntas y reforzado con juntas</b>	3,2	3,8 - 4,4	2,5 - 3,1	3,6 - 4,2
<b>2. CRCP</b>	2,9 - 3,2	N/A	2,3 - 2,9	N/A

**Fuente:** Adaptado de AASHTO (1993)

### 2.1.3.9 Verificación AASHTO 93

Para efectuar el cálculo por medio de la Fórmula de la Guía de Pavimentos de la AASHTO 93 se hará uso del freeware desarrollado por el Ingeniero Luis Ricardo Vásquez Varela de la Universidad Nacional de Colombia.

**Figura 5** – Ecuaciones AASHTO 1993 por el Ing. Vásquez

#### **ECUACIONES AASHTO 1993 – EqAASHTO93 ver 2.0**

CONCEPCIÓN Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN  
Octubre de 2000 – Enero de 2004.

Por:

Luis Ricardo Vásquez Varela  
Ingeniero Civil, Especialista en Vías y Transporte.  
Universidad Nacional de Colombia.

**Fuente:** Vásquez (2004)

En la figura 6 se ilustra la ventana gráfica tras aplicar los valores obtenidos para las variables. En la figura 7 se tienen los resultados de salida proporcionados por el software.

**Figura 6** – Ventana gráfica EqAASHTO 93

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vásquez

**Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)**  
Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento:  Flexible  Rígido

Confiabilidad (R) y desviación estándar (So): 85 %  $Z_r = -1.037$  So: 0.39 Ayuda

Serviciabilidades inicial y final: PSI inicial: 4.5 PSI final: 2.5 Ayuda

Tránsito de diseño: W18: 6875799

Pavimento rígido: Diseñar Ver informe

Módulo de reacción de la subrasante - k (psi/in): 238.72 Ver Guía AASHTO para su obtención

Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi): 4341556 ¿Ec/Sc?

Módulo de rotura del concreto - Sc (psi): 580

Coeficiente de transmisión de carga - J: 2.8 J

Coeficiente de drenaje - Cd: 1.00 Cd

Espesor de losa D (plg): 9.05

D redondeado (plg): 9.50

W18 real: 9.52E+00E

Cálculo de W18 para un D (plg): D: W18:

Quitar el control de variables Salir

**Fuente:** El autor (2021)

**Figura 7 – Resultado de Salida del Software**

```

GUÍA AASHTO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS (1993)
Por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, Colombia. 2005.

PAVIMENTO RÍGIDO

Confiabilidad : 85 % Zr = - 1.037
Desviación estándar (So) : 0,39
PSI inicial : 4,50
PSI final : 2,50
Tránsito de diseño (W18) : 6,876E+006

Módulo de reacción efectivo de la subrasante (k) -pci- : 2,387E+002

Módulo de elasticidad del concreto (Ec) -psi- : 4,342E+006
Módulo de rotura del concreto (Sc) -psi- : 5,800E+002

Coeficiente de transferencia de carga (J) : 2,80
Coeficiente de drenaje (Cd) : 1,00

Espesor de la losa (D) -plg- : 9,05E+00
Espesor de la losa redondeado (D) -plg- : 9,50E+00

Tránsito real para la estructura dispuesta : 9,518E+006
  
```

**Fuente:** El autor (2021)

La solución de las ecuaciones establecidas en la Guía de Pavimentos de AASHTO 93 para pavimentos rígidos, atendiendo a las características propias de esta pista indican un espesor de la losa de **9,05** pulgadas, y un espesor de la losa redondeado recomendado de **9,50** pulgadas, se adopta por lo tanto **e = 24 centímetros** como resultado de la verificación por AASHTO 93. Este espesor atiende un tráfico solicitante de 9.518.000 ESAL's.

#### 2.1.3.10 Verificación PCA – 1984

Para la verificación de los factores de fatiga y erosión para el espesor de losa del pavimento obtenido por medio de la verificación de las ecuaciones AASHTO para el periodo de diseño se hará uso del software PCACálculo desarrollado por el Ing. Armando Orobio el cuál utiliza la metodología Portland Cement Association – 1984 (PCA – 84) conforme la figura 8.

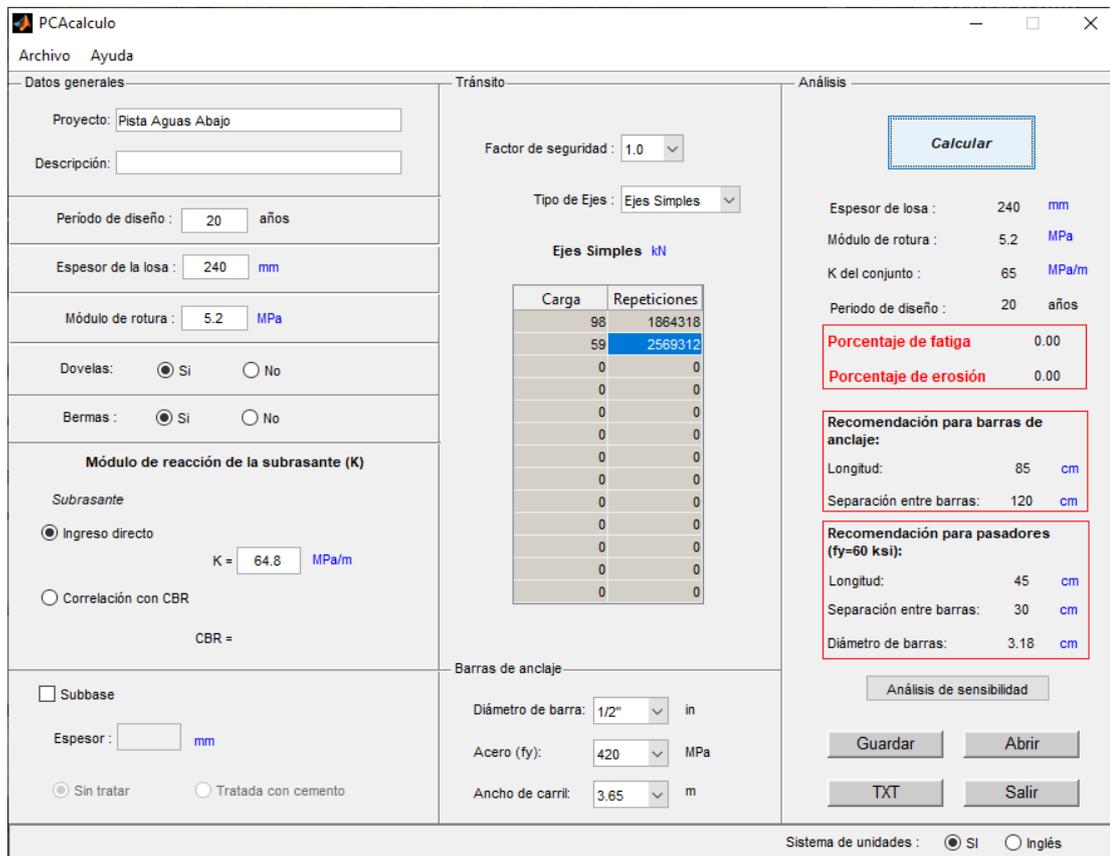
**Figura 8 – Captura de Pantalla Software PCAcálculo**



**Fuente:** El autor (2021)

En la figura 9 se ilustra la interfaz gráfica del software con los valores obtenidos para las variables, los valores calculados de fatiga y erosión y las recomendaciones para las barras de transferencia (pasadores) y de anclaje por el programa se encuentran resaltadas en la imagen en forma de recuadro.

**Figura 9 – Captura de Pantalla de la interfaz del software**



**Fuente:** El autor (2021)

**Figura 10** – Captura de Pantalla del archivo .txt generado por el software

PCAcálculo  
DISEÑO PARA PAVIMENTO RÍGIDO METODOLOGÍA PCA-84

Nombre del Proyecto: Pista Aguas Abajo  
Descripción:

Periodo de Diseño: 20 años  
Espesor de Losa: 240.00 mm  
Módulo de rotura (MR): 5.20 Mpa  
Espesor de Subbase: 0.0 mm  
Base tratada con Cemento: No  
CBR de subrasante: No  
Módulo de reacción (K): 64.80 Mpa/m  
Factor de seguridad: 1.00  
Unión con Dovelas: Si  
Pavimento con Bermas: Si

EJES SIMPLES:

Carga por eje KN	Multiplicado por F.S	Expectativa de repeticiones	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones admisibles	porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	porcentaje de erosión
98	98	1864318	Inf	0.00	Inf	0.00
59	59	2569312	Inf	0.00	Inf	0.00

EJES TÁNDEM:

Carga por eje KN	Multiplicado por F.S	Expectativa de repeticiones	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones admisibles	porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	porcentaje de erosión
167	167	7833	Inf	0.00	Inf	0.00
132	132	697161	Inf	0.00	Inf	0.00

Recomendación para barras de anclaje:  
Longitud de barras: 85.0 cm  
Separación entre centros: 120.0 cm

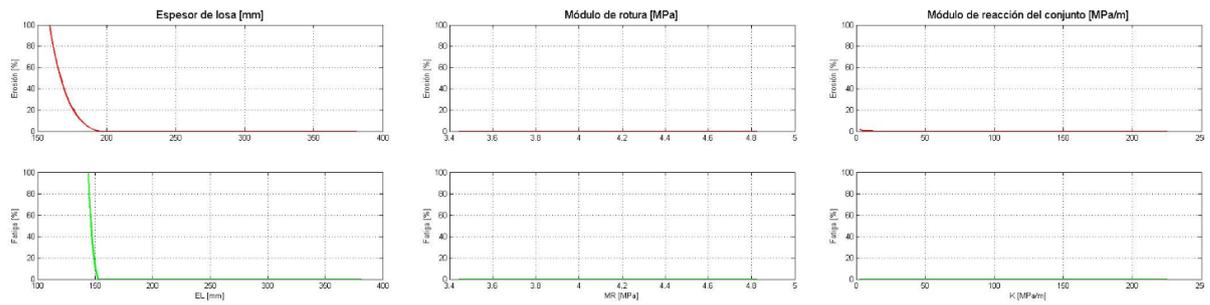
Recomendación para pasadores:  
Longitud de barras: 45.0 cm  
Separación entre centros: 30.0 cm  
Diámetro de la barra: 3.2 cm

PORCENTAJE TOTAL DE FATIGA: 0.00  
PORCENTAJE TOTAL DE EROSIÓN: 0.00

**Fuente:** El autor (2021)

El análisis de sensibilidad proporciona los siguientes gráficos donde se indica el efecto de la variación de valores como el módulo de reacción del suelo, módulo de rotura del hormigón o espesor de la losa. Las imágenes ampliadas se encuentran en la sección de Anexos. Ver figuras 23 a 25.

**Figura 11 – Análisis de Sensibilidad de la estructura propuesta**



**Fuente:** El autor (2021)

Comentario: El análisis en base a la metodología PCA-84 indica que el pavimento podría estar sobredimensionado, no obstante, se optó por mantener el valor considerando que fue el mínimo calculado por la metodología AASHTO 93 y como factor de seguridad adicional.

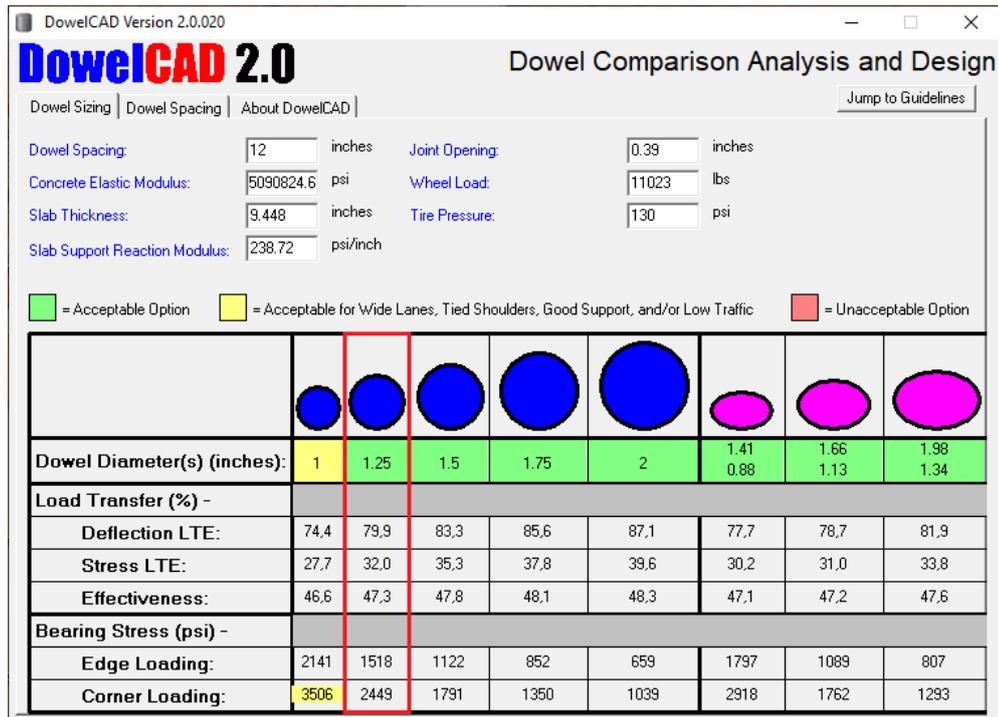
El análisis de sensibilidad indica que un espesor de aproximadamente 16 centímetros es suficiente para el tráfico y los demás factores considerados, por lo que se recomienda esa medida como mínimo espesor de la placa.

#### 2.1.3.11 Verificación Pasadores

Se propone la inclusión de pasadores en las juntas transversales para proporcionar una mejor transferencia de carga entre una placa y otra en base al tránsito predominantemente pesado existente.

Para la verificación de los pasadores en las juntas se hace uso del software desarrollado por la American Concrete Pavement Association (ACPA) denominado DowelCAD. A partir del análisis de los datos y para una carga por rueda de **5 t (11023 lb)** y presión de neumático de **130 psi** conforme la figura 12 se muestra como una opción viable de implementación varillas lisas de Acero CA-25 de 32 mm espaciadas a 30 centímetros con un largo de 46 centímetros para pavimentos con espesor de 24 cm.

Figura 12 – Interfaz DowelCAD.



Fuente: El autor (2021)

Cabe resaltar que la opción seleccionada se encuentra de acuerdo con lo presentado en el Manual de Pavimentos Rígidos del Departamento Nacional de Infraestructura de transportes (DNIT).

Figura 13 – Diámetro, longitud y espaciamiento de barras de transferencia

Espessura da Placa (cm)	Diámetro (cm)	Comprimento (mm)	Espaçamento (mm)
Até 17,0	20	460	300
17,5 – 22,0	25	460	300
22,5 – 30,0	32	460	300
> 30,0	40	460	300

Fuente: DNIT (2005)

De esta forma tenemos CA-25 Ø 32,0 mm L = 46 cm @ 30 cm.

2.1.3.12 Verificación de Barras de Anclaje

Se propone también la inclusión de barras de anclaje en la junta longitudinal que acompaña al eje de la pista con el objetivo de prevenir posibles movimientos laterales manteniendo así las placas unidas y mejorando la transferencia de carga.

La verificación de las barras de anclaje se ejecuta por medio de las ecuaciones presentadas en el Manual de Pavimentos Rígidos – DNIT (2005).

Para ello se procede al cálculo del área de acero necesario ( $A_s$ ) por medio de la siguiente fórmula:

$$A_s = \frac{b \times f \times \gamma_c \times h}{100 \times S}$$

Para lo cual se adopta:

- $b = 5,00$  m - Distancia de la junta considerada al borde libre
- $f = 1,5$  - Coeficiente de fricción placa – subrasante
- $\gamma_c = 24000$  N/m<sup>2</sup> - Masa específica del hormigón
- $h = 0,24$  m - Espesor de la placa
- $S = 276$  Mpa - Tensión admisible del acero (conservativo)

Por lo tanto:

$$A_s = \frac{5,0 \times 1,5 \times 24000 \times 0,24}{100 \times 276} = 1,567 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$A_s^{\text{Placa}} = 4,25 \times 1,567 = 6,659 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Por lo cual se adoptan varillas de acero CA-50 de **12,5 mm** de diámetro espaciadas a **68 cm** entre sí, considerando que el área de acero aportada por cada varilla es de 1,227 cm<sup>2</sup> por varilla y por lo tanto es requerido el uso de 6 varillas entre cada placa (7,362 cm<sup>2</sup>)

La longitud de las varillas será calculada a través de la siguiente ecuación propuesta por Huang (2004) indicada a continuación:

$$l = \frac{1}{2} \times \frac{f_s \times d}{\mu} + 7,6$$

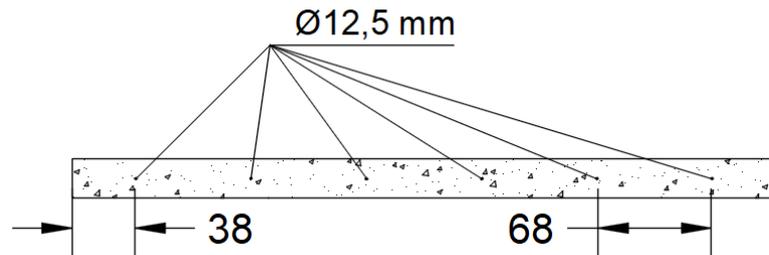
Para lo cual se adopta:

- $f_s = 276$  Mpa - Tensión admisible del acero (conservativo)
- $d = 1,25$  cm - Diámetro de la barra
- $\mu = 2,45$  MPa - Tensión de adherencia hormigón-acero admisible
- 7,6 - Margen de seguridad para prevenir descentralización de la barra

$$l = \frac{1}{2} \times \frac{276 \times 1,25}{2,45} + 7,6 = 78,0 \text{ cm}$$

Las barras deberán ser ubicadas a una distancia de las juntas transversales superior o igual a 380 mm priorizando este criterio por encima del espaciamiento entre barras en base a la recomendación del Federal Highway Administration. En la imagen a seguir se puede apreciar un croqui de la disposición de las barras en la losa.

**Figura 14** – Disposición de las barras de anclaje



**Fuente:** El autor (2021)

#### 2.1.3.13 Armadura de retracción

Se propone una armadura no estructural con el objetivo de combatir las tensiones internas provocadas por la variación volumétrica del hormigón principalmente esfuerzos causados por retracción térmica (variación de temperatura), hidráulica (perdida de agua).

La armadura será de Acero tipo CA-60 siendo que el cálculo del área de acero se realizará a partir de la siguiente ecuación disponible en el Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005).

$$A_s = \frac{f \times L \times h}{333}$$

Para lo cual se adopta:

- $f = 1,5$  - Coeficiente de fricción placa – subrasante
- $L = 4,375 \text{ m}$  - Mayor dimensión de la placa
- $h = 24 \text{ cm}$  - Espesor de la placa

$$A_s = \frac{1,5 \times 4,375 \times 24}{333} = 0,63 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

**Figura 15 – Tela Soldada tipo Q (Acero CA-60)**

Designación (CA-60)	Espaciamiento entre varilla (cm)		Diámetro de las varillas (mm)		Sección de las varillas (cm <sup>2</sup> /m)		Masa kg/m <sup>2</sup>	Rollos		Paneles	
	Long. ET	Trans. ET	Long. DL	Trans. DL	Long. A <sub>SL</sub>	Trans. A <sub>ST</sub>		Comp. (m)	Masa kg	Comp. (m)	Masa kg
Q47	15	15	3,0	3,0	0,47	0,47	0,75	120	222,0		
Q61	15	15	3,4	3,4	0,61	0,61	0,97	230	285,1		
Q75	15	15	3,8	3,8	0,75	0,75	1,21	120	356,1		
Q92	15	15	4,2	4,2	0,92	0,92	1,48	60	217,5		
Q113	10	10	3,8	3,8	1,13	1,13	1,80	60	264,4		
Q138	10	10	4,2	4,2	1,38	1,38	2,20	60	323,0	6	32,3
Q159	10	10	4,5	4,5	1,59	1,59	2,52			6	37,1
Q196	10	10	5,0	5,0	1,96	1,96	3,11			6	48,8
Q246	10	10	5,6	5,6	2,46	2,46	3,91			6	57,4
Q283	10	10	6,0	6,0	2,83	2,83	4,48			6	65,9
Q335	15	15	8,0	8,0	3,35	3,35	5,37			6	78,9
Q396	10	10	7,1	7,1	3,96	3,96	6,28			6	92,3
Q503	10	10	8,0	8,0	5,03	5,03	7,97			6	117,2
Q636	10	10	9,0	9,0	6,36	6,36	10,09			6	148,3
Q785	10	10	10,0	10,0	7,85	7,85	12,46			6	183,2

Nota: Se corrigió el espaciamiento d la tela Q335 de 10 cm para 15 cm conforme diámetros comerciales en Brasil

**Fuente:** Adaptado de DNIT (2005)

Conforme la figura es posible percibir que la tela Q 75 satisface el requisito de acero mínimo, no obstante, se propone el uso de la tela **Q 335** (3,35 cm<sup>2</sup>/m Ø 8,0 mm @ 15 cm) teniendo en cuenta su implementación previa en la pista de aguas arriba y el buen desempeño presentado en la misma.

### 3 PROYECTO GEOMÉTRICO Y DE JUNTAS

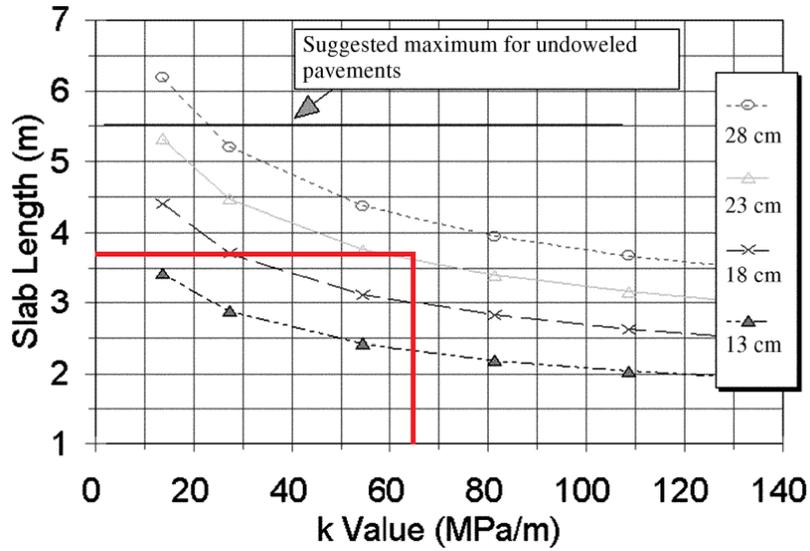
#### 3.1 IMPLEMENTACIÓN DE LAS JUNTAS

Serán implementadas juntas transversales y longitudinales dispuestas conforme indicado a continuación:

##### 3.1.1 Juntas Transversales

Desde un punto de vista conservativo en lo que a juntas transversales se refiere y en base al gráfico propuesto por el American Concrete Institute en su documento ACI 325 (2002) se opta por una separación entre juntas transversales igual o menor a 3,7 metros teniendo en cuenta un espesor de 240 mm y un módulo de reacción k de 64,8 MPa para una relación Longitud (L)/Radio de rigidez relativa (l) igual a 4,4.

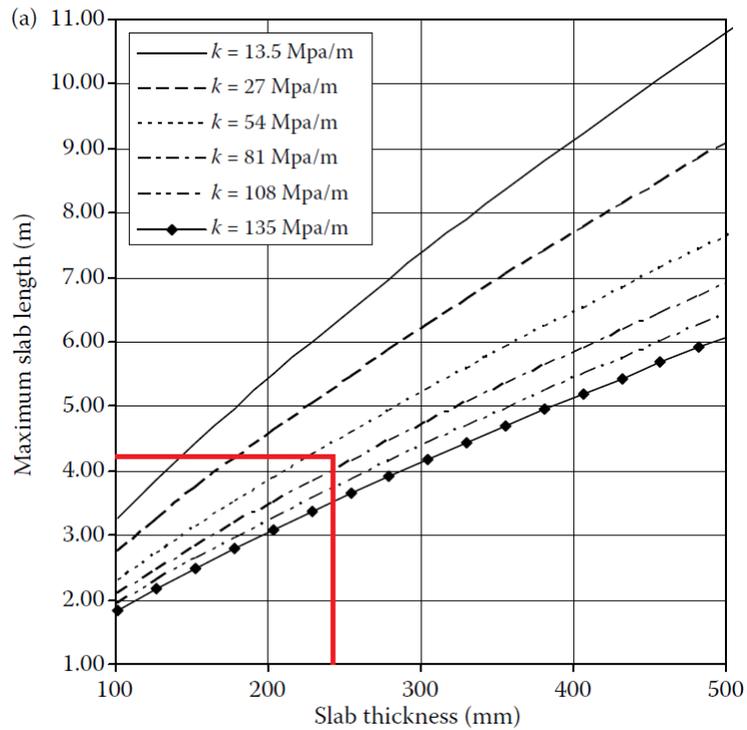
**Figura 16** – Longitud de placa – Espesor de placa ( $L/l = 4,4$ )



Fuente: ACI 325 (2004)

Otra opción viable sería considerar la relación  $L/l \leq 5,0$  (cuando  $L/l$  excede 5,0 se aumenta la incidencia de fisuras transversales) para lo cual la figura anterior quedaría como sigue, y la longitud de la placa debería ser menor a 4,5 metros aproximadamente, por lo cual se podría considerar 4,25 m:

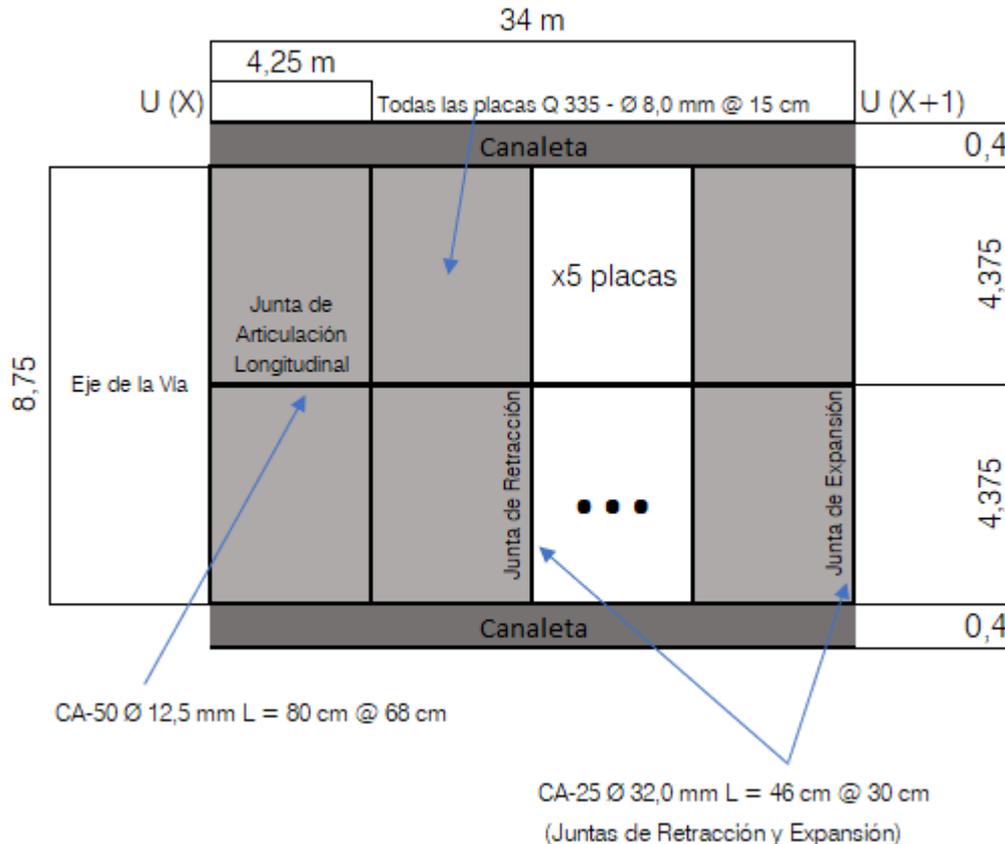
**Figura 17** – Longitud de placa – Espesor de placa ( $L/l \leq 5,0$ )



Fuente: Delatte (2014)

Las dimensiones de las placas deben ser submúltiplo de las dimensiones de los bloques. Se adopta por lo tanto **4,25 metros** como longitud de placa máxima recomendada conforme croquis a continuación para los bloques de la casa de fuerza conforme la figura 18:

**Figura 18** – Croquis disposición de placas y armaduras.



**Fuente:** El autor (2021)

Se propone la disposición de pasadores en las juntas de retracción y expansión. Otras variaciones de longitudes de placa pueden presentarse y se encuentran detallado en el plano en anexo.

A continuación, se detallan las juntas y sus características:

### 3.1.1.1 Junta Transversal de retracción:

Se propone el empleo de juntas de retracción con barras de transferencia espaciadas entre si a una distancia de **4,25 metros** con una abertura de 10 mm y una

profundidad de 5 cm; aserrada no tan temprano para que el pavimento tenga resistencia adecuada para evitar desportillamiento o descamación pero no tan tarde para evitar la aparición de fisuras aleatorias esparcidas por la placa, efectuar el corte entre 4 y 24 horas dependiendo de las condiciones ambientales (temperatura, viento, humedad, luz solar de incidencia directa) del día de ejecución de la placa.

Las barras de transferencia se ubicarán con el eje de estas coincidiendo con la mitad del espesor de la placa de profundidad, es decir, 12 cm. Deberán poseer la mitad más dos centímetros pintadas y engrasadas para permitir el libre movimiento de la junta.

### *3.1.1.2 Junta Transversal de Expansión:*

Entre las Unidades U1 a U15 deberá coincidir con las juntas de dilatación de la represa, por lo tanto, estarán ubicadas a una distancia de **34 metros** una de las otras, pudiendo ser alterada esta distancia conforme disposición de las juntas de dilatación de la represa y adicionadas nuevas juntas conforme sea necesario, además deberán estar ubicadas en los encuentros del pavimento con la losa del Área de montaje central. La abertura de las juntas de expansión será de 2,5 cm y una profundidad de 5,5 cm.

En las demás áreas priorizar la coincidencia con las juntas de dilatación de la represa alterando la disposición conforme sea necesario tras verificación en obra y colocando una junta de expansión intermedia cuando sea necesario.

Las barras de transferencia se ubicarán con el eje de estas coincidiendo con la mitad del espesor de la placa de profundidad, es decir, 12 cm. Deberán poseer la mitad más dos centímetros pintadas y engrasadas para permitir el libre movimiento de la junta.

Deberá ser empleado también un sombrero o cápsula de expansión en la punta de la barra de transferencia de carga que permita el movimiento de la barra cuando ocurra dilatación de las placas garantizando un espacio libre de por lo menos 3 cm.

El material compresible empleado en la junta de expansión podrá ser mediante uso de material bituminoso concordante con la normativa AASHTO M 33, Poliestireno expandido (isopor) o material de características similares.

### 3.1.2 Juntas Longitudinales

Se propone para la junta longitudinal que acompaña al eje de la pista una junta de articulación/construcción la cual será del tipo de encaje macho-hembra para posibilitar la transferencia de carga y con barras de anclaje para mantener unidas las placas conforme indicado previamente en la sección correspondiente. La abertura de la junta será de 20 mm con una profundidad mínima de 4,5 cm.

### 3.1.3 Sellante de Juntas

El objetivo del sellante en las juntas es el de minimizar la infiltración de agua y materiales incompresibles en la junta además de disminuir la chance de corrosión en las barras de transferencia.

Las juntas serán selladas con silicona autonivelante del tipo 890 – SL, resistente a la intemperie y a los rayos U.V o sellante de similares características y aplicados siguiendo las indicaciones del fabricante.

Podrá ser empleado varilla de respaldo (Backer Rod), de polietileno o material impermeable y elástico similar, para controlar la profundidad del sellante considerando su facilidad de aplicación, flexibilidad y compresibilidad, además deberá poseer una buena resistencia a la temperatura y no absorber agua. El diámetro variará para cada varilla permitiendo que sean comprimidos en un 25% y de esa manera asegurar que se ubiquen en la profundidad deseada como recomendado por la ACPA, resultando como sigue: 13 mm, 32 mm, 22 mm para las juntas transversal de retracción, transversal de expansión y longitudinal respectivamente.

**Figura 19** – Tamaños recomendados por la ACPA

Espesor del Reservatorio	Diámetro del Backer Rod
1/8 in. (3 mm)	1/4 in. (6 mm)
3/16 in. (5 mm)	1/4 in. (6 mm)
1/4 in. (6 mm)	3/8 in. (10 mm)
5/16 in. (8 mm)	3/8 in. (10 mm)
3/8 in. (10 mm)	1/2 in. (13 mm)
1/2 in. (13 mm)	5/8 in. (16 mm)
5/8 in. (16 mm)	3/4 in. (19 mm)
3/4 in. (19 mm)	7/8 in. (22 mm)
7/8 in. (22 mm)	1 in. (25 mm)
1 in. (25 mm)	1-1/4 in. (32 mm)
1-1/4 in. (32 mm)	1-1/2 in. (38 mm)
1-1/2 in. (38 mm)	2 in. (50 mm)

**Fuente:** El autor (2021)

El procedimiento de sellado será ejecutado como sigue:

- Limpieza de la junta mediante remoción de hormigón suelto haciendo uso de martillo y cincel y de suciedad y contaminantes y barrido de la zona para evitar perjudicar la adherencia.
- Aplicación de backer rod de diámetro correspondiente a la abertura de la junta
- Aplicación de la silicona autonivelante o material seleccionado, se recomienda uso de cinta en los lados para reducir el desorden causado por exceso de sellante y simplificar la limpieza posterior.

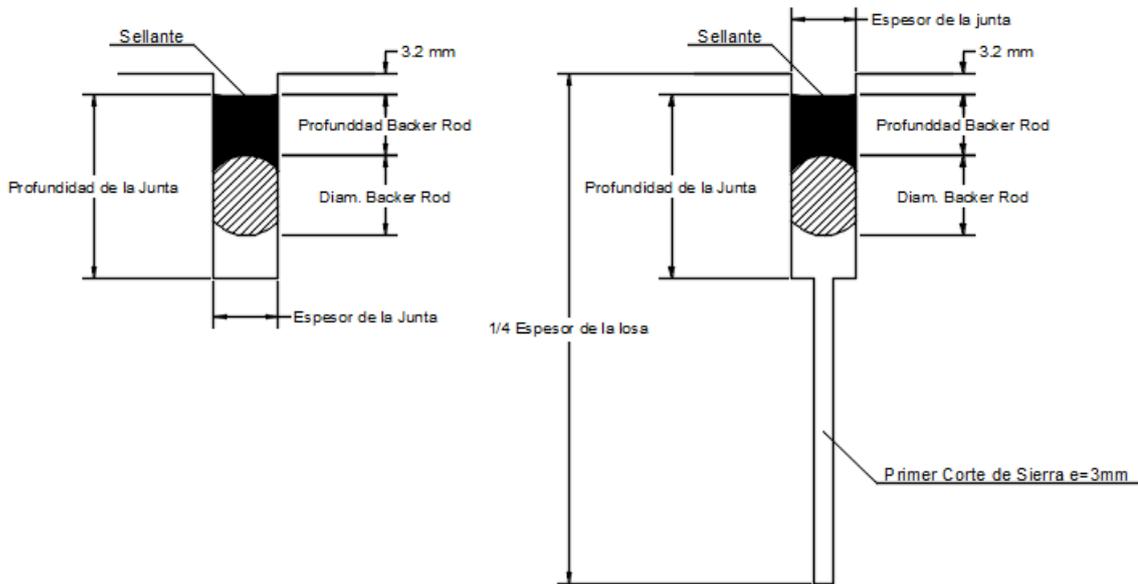
Las imágenes a continuación sirven como guía para implementación del backer rod:

**Figura 20** – Profundidad de Backer Rod recomendado por el Departamento de Transporte de Florida

CONTROLADOR DE PROFUNDIDAD BACKER ROD (JUNTA CONCRETO - CONCRETO)				
Dimensiones de la junta (mm)				
Ancho de la junta	Espesor de cuentas sellantes	Diámetro Backer ROD	Profundidad mínima de la junta	Profundidad de colocación del Backer Rod
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
6	6	10	25	13
10	6	13	32	13
13	6	16	32	13
16	8	19	38	14
19	10	25	45	16
22	11	29	45	18
25	13	32	50	19
>25	13	32+	50+	19

Fuente: Adaptado de FDOT (2019)

**Figura 21** – Implementación Backer Rod



Fuente: El autor (2021)

### 3.1.4 Impermeabilización de la Casa de Fuerza

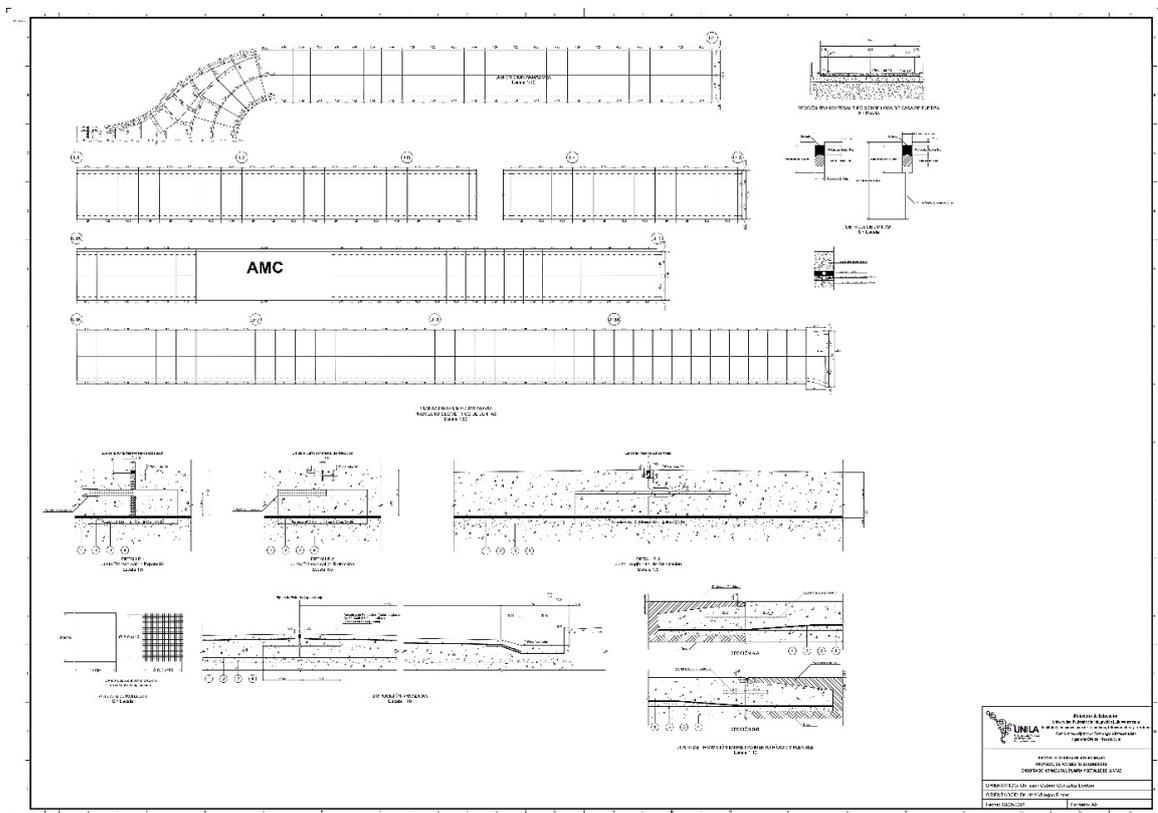
Para la impermeabilización de la losa de la casa de fuerza podrá ser empleado impermeabilizante de tipo membrana de impermeabilización híbrida de poliuretano, elástica y con resistencia química moderada (Tipo Sikalastic – 851 o similar).

La capa de amortiguamiento podrá ser compuesta por 2 capas de fieltro asfáltico 500/20 con una composición de emulsión asfáltica, arena fina y cemento en una relación de 1:2,5:0,4 teniendo en consideración el desempeño presentado a lo largo de los años por esta composición tras su uso en la pista actual.

### 3.1.5 Plano del Proyecto Propuesto

EL plano del proyecto se encuentra en tamaño completo en la última página del presente documento.

**Figura 22 – Plano del Proyecto Propuesto**



**Fuente:** El autor (2021)

### 3.1.6 Ejecución del hormigonado de las placas

Deberá ser ejecutado en etapa única por faja de tráfico entre una junta de expansión y otra.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guía AASHTO para diseño de estructura de pavimentos**, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 325. **Guide for design of jointed concrete pavements for streets and local roads (ACI 325.12R-02)**. Farmington Hills, 2002, 32 p.

DELATTE, N. J. **Concrete, pavement design, construction, and performance**. 2. ed. Flórida: Taylor & Francis Group, 2014.

FDOT - FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **FDOT Design standards: CONCRETE PAVEMENT JOINT**. [S. l.: s. n.], 2019.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2. ed. Upper Saddle River, USA: PEARSON, 2004. 775 p.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentos rígidos**. Rio de Janeiro, 2005. 234p. (IPR. Publ. 714).

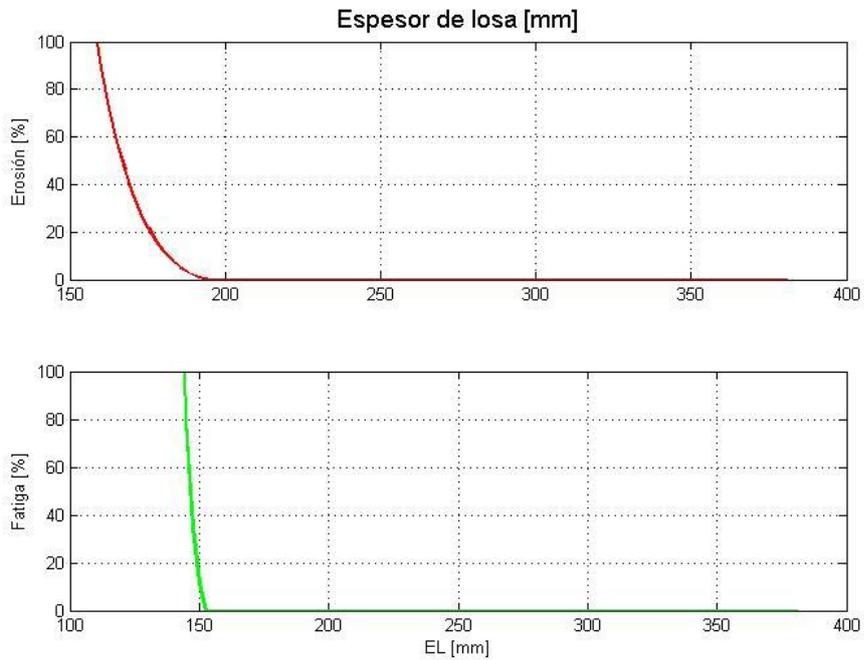
MINISTÉRIO DE TRANSPORTES (Brasil). DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro, 2006. 384p. (IPR. Publ. 723).

MOPC - MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y COMUNICACIONES (Paraguay). **Manual de carreteras del Paraguay: Normas para la estructura del pavimento**. 1. ed. Paraguay: [s. n.], 2011. v. I - Tomo 2.

VÁSQUEZ, L. **Ecuaciones AASHTO 1993 – EQAASHTO93 ver 2.0: concepción y ejemplos de aplicación**, 2004.

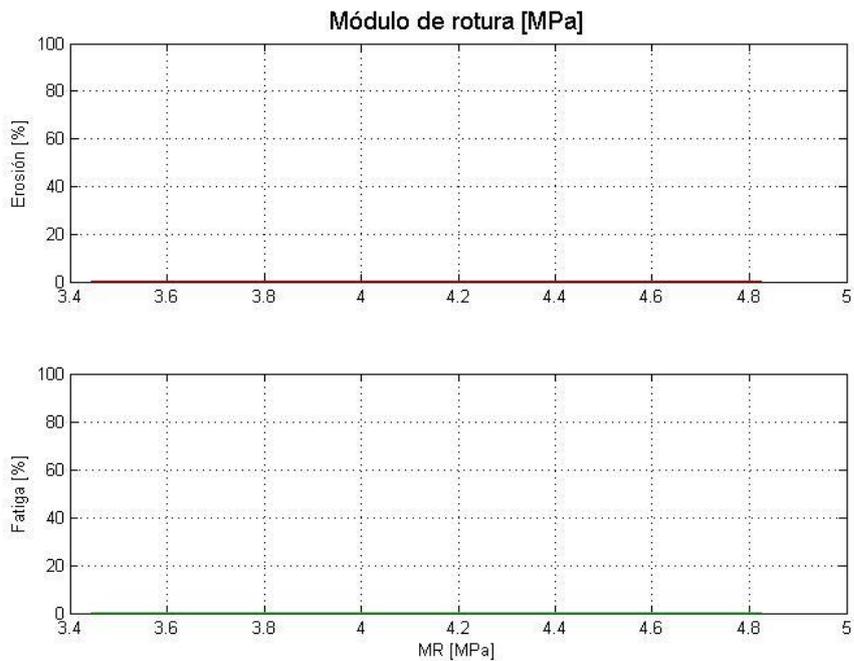
**APENDICE  
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

**Figura 23 – Análisis de Sensibilidad – Espesor de Losa**

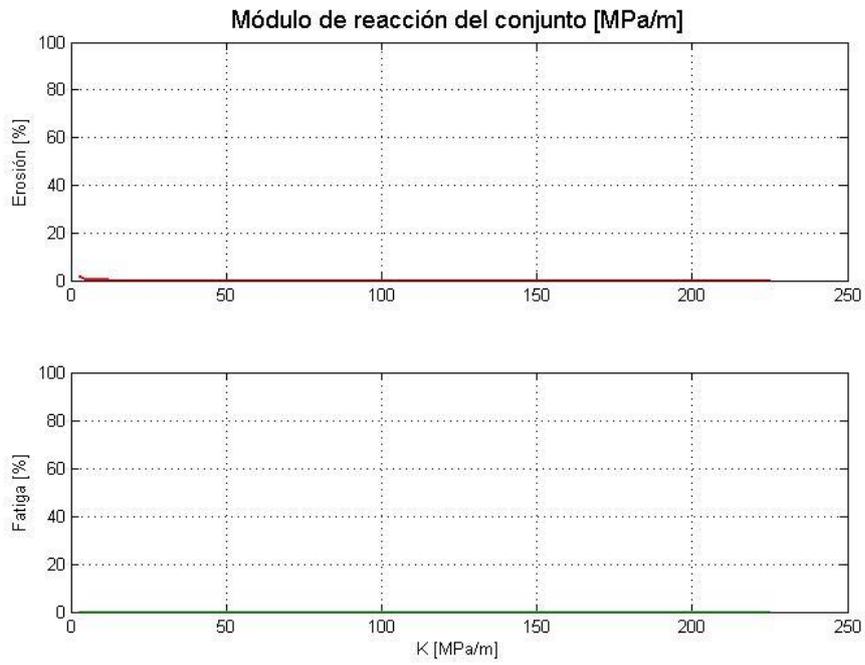


**Fuente:** El autor (2021)

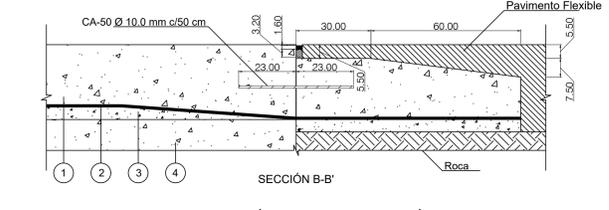
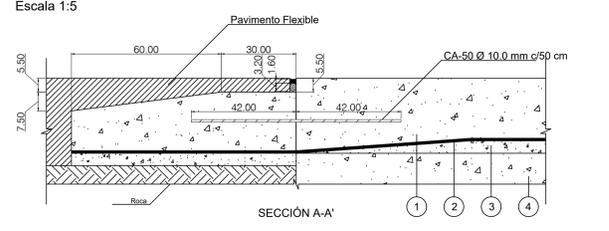
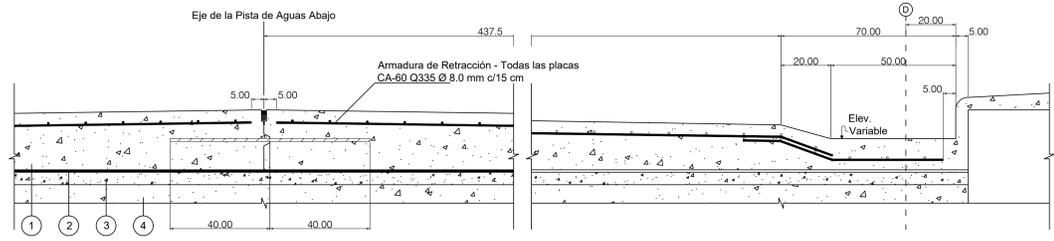
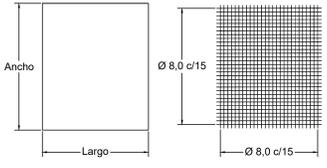
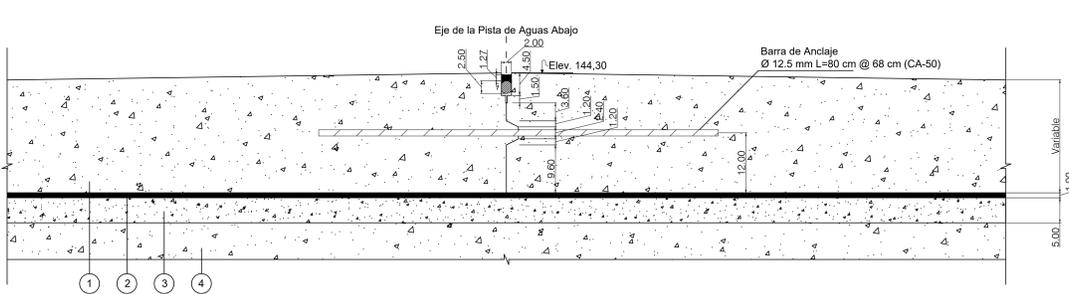
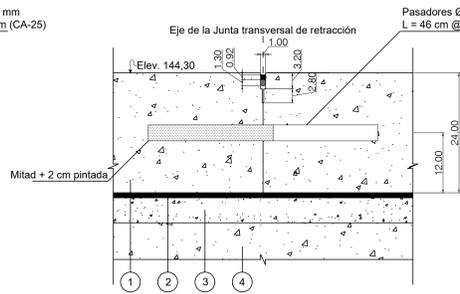
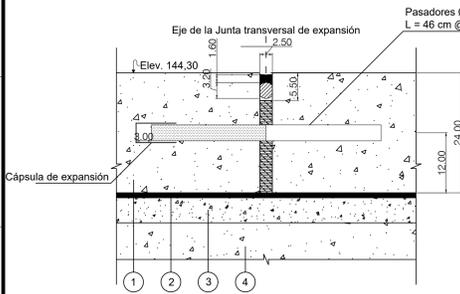
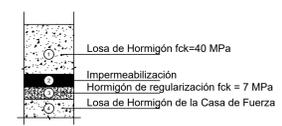
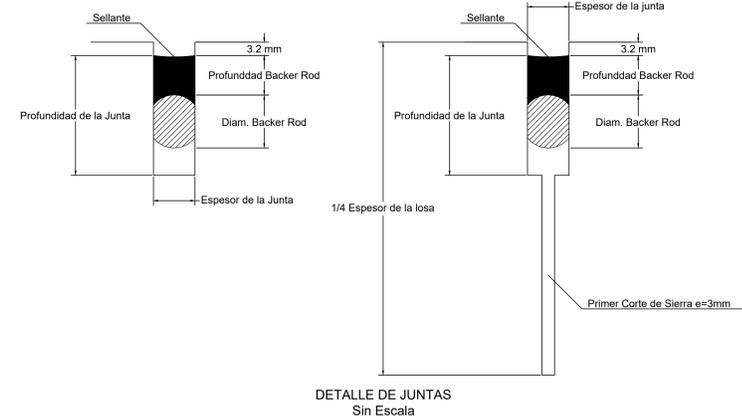
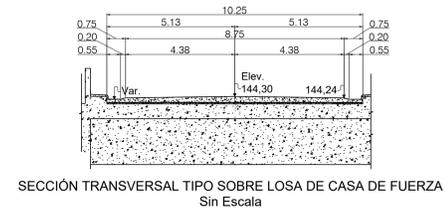
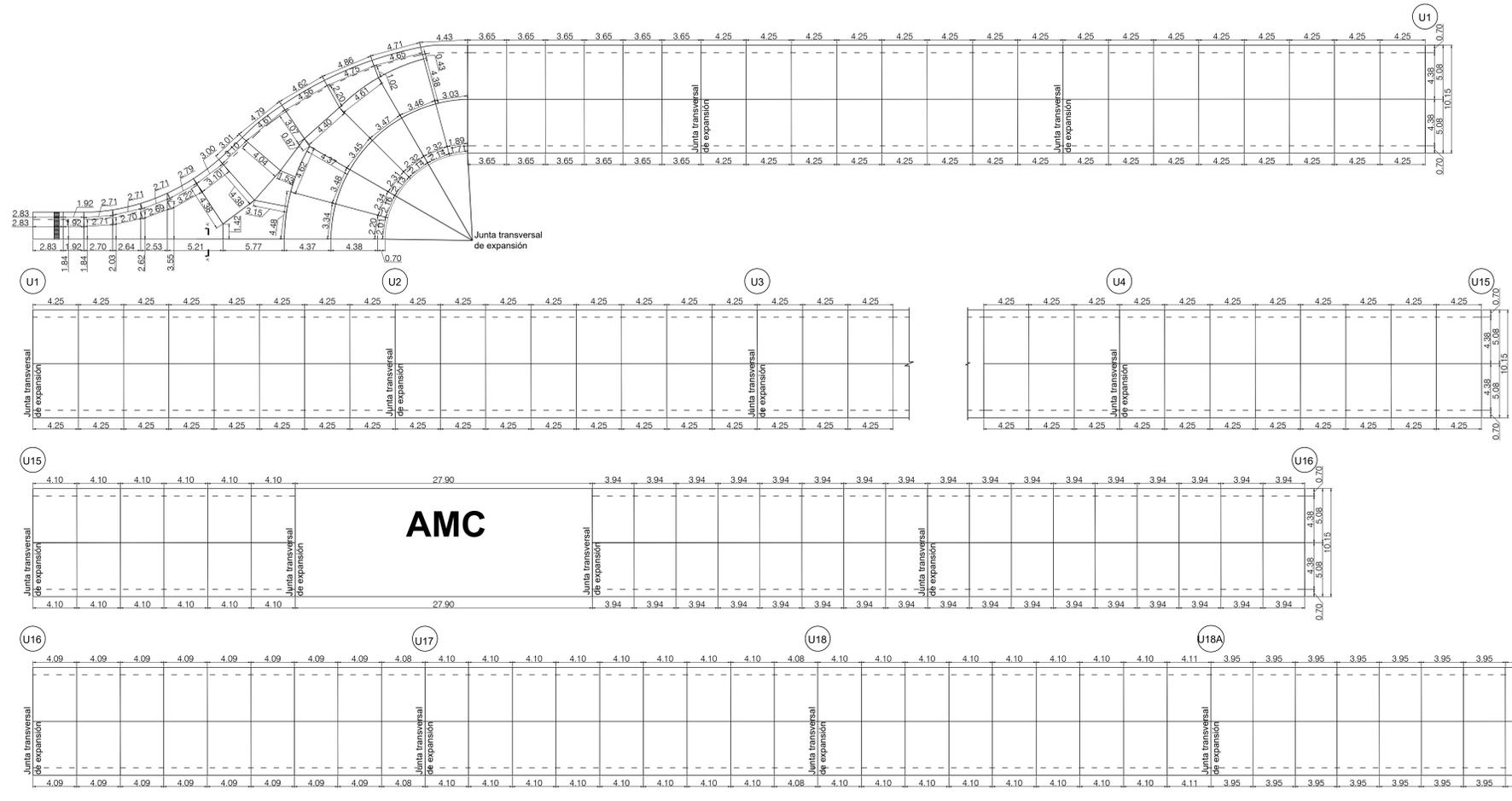
**Figura 24 – Análisis de Sensibilidad – Módulo de Rotura**



**Fuente:** El autor (2021)

**Figura 25** – Análisis de Sensibilidad – Módulo de Reacción del Conjunto

**Fuente:** El autor (2021)



JUNTA DE TRANSICIÓN ENTRE PAVIMENTO RÍGIDO Y FLEXIBLE  
Escala 1:10