

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAÍSO - CHILE**

**“CASO REAL Y EFECTOS EN LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO AL NO CONSTRUIR  
SU PROYECTO DE EVACUACIÓN DE AGUAS LLUVIAS”**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PRESENTADO POR  
ROMANO PABLO PASSALACQUA SEPÚLVEDA**

Como requisito para optar al título de

**INGENIERO CIVIL**

Profesor guía

**CARLOS WAHR DANIEL**

Marzo de 2021

Romano

Passalacqua

Firmado digitalmente por Romano  
Passalacqua  
Nombre de reconocimiento (DN):  
cn=Romano Passalacqua, o=UTFSM,  
ou=Obras Civiles,  
email=romano.passalacqua@gmail.com,  
c=CL  
Fecha: 2023.01.18 21:49:19 -03'00'



## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo representa el término de largos años de estudio, durante los cuales he recibido el apoyo y confianza de mi familia.

En primer lugar, quiero agradecer a mi padre y a mi madre quienes han sido fundamentales durante mi carrera por su apoyo y esfuerzo, sin los cuales no habría sido posible llegar a este momento.

También quiero dar infinitas gracias a Patricia, mi mujer, quien han estado junto a mí, entregándome toda su energía y ánimo para continuar en momentos difíciles, comprendiendo y aceptando que en muchas ocasiones haya debido quitarles tiempo por el estudio.

A mi Profesor guía el Sr. Carlos Wahr por su apoyo y colaboración durante el desarrollo de la investigación.

A mi padre y a mi madre  
quienes incondicionalmente  
estuvieron siempre entregándome  
su apoyo y confianza.

También a mi mujer Patricia



## RESUMEN

Las ingenierías de detalle que se realizan en empresas de proyectos multidisciplinarios deben considerar, al momento de la construcción, la correcta ejecución de todos los diseños que se desarrollan.

En el desarrollo de la memoria de título se presentará un caso en que se construye solo la pavimentación y no un sistema adecuado de evacuación de aguas lluvias, el que genera deterioros prematuros de pavimentos de adocretos contruidos sobre bases granulares<sup>1</sup>.

Una de las características primordiales de todo diseño de pavimentos es que requiere inevitablemente complementarse con un diseño de evacuación de aguas lluvias<sup>2</sup>. En este trabajo de titulación se presenta el caso de un proyecto en el que trabajó el suscrito, y en que se construyen los pavimentos sin un sistema de evacuación de aguas lluvias.

Los proyectos de pavimentación industrial<sup>3</sup> en nuestro país no tienen una revisión externa y es solo el mandante quien decide lo que se construye. Solo el proyecto de pavimentación del acceso requiere de una aprobación oficial y con relación a la evacuación de aguas lluvias solo se revisa si ésta descarga a la calle o camino, y su aprobación se da por el Serviu Regional o la Dirección Regional de Vialidad, dependiendo de quien tenga la tuición de la vía.

---

<sup>1</sup> Echaveguren Navarro, Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón, 2013

<sup>2</sup> Ministerios de Vivienda y Urbanismo, 1997

<sup>3</sup> Dirección de Vialidad, 2022 - "Manual de Carreteras 2022 – Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño"



## ABSTRACT

At construction time, detailed engineering specifications (all disciplines) must be built exactly as designed.

In the dissertation, a case considering only pavement will be presented. It will not include proper rainwater drainage system, because it generates premature deterioration of cobblestone - built on granular bases - pavement. (Echaveguren Navarro, Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón, 2013).

One of the main characteristics of any pavement design is that it should include a rainwater drainage design (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1997). In this dissertation, the author presents a case where pavement is built without a rainwater drainage system.

In Chile public paving projects do not require an external approval. The client is responsible of the design of what is been built. Only Access-Paving projects requires official approval. Rainwater drainage is reviewed whether it discharges into the street or road, and, depending on who is in charge of the road, its approval is responsibility of the Regional Serviu or the Regional Roads Authority.

---

<sup>1</sup> Echaveguren Navarro, Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón, 2013.

<sup>2</sup> Ministerios de Vivienda y Urbanismo, 1997

<sup>3</sup> Dirección de Vialidad, 2022 - "Manual de Carreteras 2022 – Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño"

## INDICE GENERAL

|       |                                                                                         |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | INTRODUCCIÓN.....                                                                       | 1  |
| 1.1   | Antecedentes generales.....                                                             | 1  |
| 1.2   | Objetivos del estudio.....                                                              | 1  |
| 1.3   | Alcances del estudio.....                                                               | 1  |
| 2.    | PROYECTOS DE SANEAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS.....                                          | 3  |
| 2.1   | Generalidades.....                                                                      | 3  |
| 2.2   | Antecedentes.....                                                                       | 4  |
| 2.3   | Etapas de Diseño.....                                                                   | 4  |
| 2.3.1 | Estudio Hidrológico.....                                                                | 4  |
| 3.    | PROYECTO DE PAVIMENTACIÓN.....                                                          | 12 |
| 3.1   | Introducción.....                                                                       | 12 |
| 3.2   | Revisión Bibliográfica respecto al Efecto de la Humedad en la Capacidad de Soporte..... | 12 |
| 3.2.1 | El Módulo Resiliente.....                                                               | 12 |
| 3.2.2 | Relación entre el Módulo Resiliente y el CBR.....                                       | 12 |
| 3.2.3 | Efecto de la Humedad en el Módulo Resiliente.....                                       | 13 |
| 3.2.4 | Coeficientes de Drenaje.....                                                            | 15 |
| 3.3   | Análisis de Sensibilidad.....                                                           | 16 |
| 3.3.1 | Efecto de contaminación en Base granular.....                                           | 16 |
| 3.3.2 | Efecto del Agua.....                                                                    | 18 |
| 3.4   | Estructura Existente.....                                                               | 20 |
| 3.5   | Rediseño de la Estructura.....                                                          | 20 |
| 3.5.1 | Manual de Diseño Utilizado.....                                                         | 20 |
| 3.5.2 | Cálculo de la Carga de Rueda.....                                                       | 20 |
| 3.5.3 | Caracterización de la Subrasante.....                                                   | 22 |
| 3.5.4 | Factores de Proximidad de Carga.....                                                    | 23 |
| 3.5.5 | Carga Rueda Simple Equivalente.....                                                     | 23 |



|       |                                                          |    |
|-------|----------------------------------------------------------|----|
| 3.5.6 | <i>Nº de Pasadas a través de la Vida de Diseño</i> ..... | 23 |
| 3.5.7 | <i>Determinación del Espesor de BTC 8/10</i> .....       | 23 |
| 3.5.8 | <i>Conversión de BTC a Materiales Granulares</i> .....   | 24 |
| 3.5.9 | <i>Estructura recomendada por este consultor</i> .....   | 26 |
| 4.    | <i>CONCLUSIÓN</i> .....                                  | 28 |
| 5.    | <i>REFERENCIAS</i> .....                                 | 29 |

## INDICE DE TABLAS

|            |                                                                               |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1  | Coeficientes de frecuencia para T años de periodo de retorno .....            | 5  |
| Tabla 2.2  | Coeficientes de duración para t horas .....                                   | 5  |
| Tabla 2.3  | Precipitaciones entre 1 y 24 horas para distintos periodos de retorno. ....   | 6  |
| Tabla 2.4  | Precipitaciones entre 5 y 60 minutos para distintos periodos de retorno ..... | 6  |
| Tabla 2.5  | Intensidades de lluvia entre 1 y 24 horas .....                               | 7  |
| Tabla 2.6  | Intensidades de lluvia entre 5 y 60 minutos .....                             | 7  |
| Tabla 2.7  | Coeficientes de escurrimiento.....                                            | 9  |
| Tabla 2.8  | Tiempos de concentración (minutos).....                                       | 10 |
| Tabla 3.1  | Coeficientes de drenaje según AASHTO 93 .....                                 | 15 |
| Tabla 3.2  | Resultados del análisis de sensibilidad en función del CBR .....              | 16 |
| Tabla 3.3  | Resumen ensayos de Laboratorio .....                                          | 17 |
| Tabla 3.4  | Manual de Carreteras 2015, Volumen 3, Tabla 3.604.106.B.....                  | 19 |
| Tabla 3.5  | Análisis de sensibilidad en función de los coeficientes de drenaje .....      | 19 |
| Tabla 3.6  | Espesor equivalente de BTC 8/10 .....                                         | 20 |
| Tabla 3.7  | Peso de la máquina y del contenedor .....                                     | 22 |
| Tabla 3.8  | Resumen de resultados .....                                                   | 22 |
| Tabla 3.9  | Carga Rueda simple Equivalente considerando Frenado y Giro .....              | 22 |
| Tabla 3.10 | Determinación de los factores de proximidad.....                              | 23 |
| Tabla 3.11 | Factores de Conversión.....                                                   | 25 |
| Tabla 3.12 | Diseño final .....                                                            | 25 |

## INDICE DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                        |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1  | Ubicación Proyecto .....                                                                                                               | 3  |
| Figura 2.2  | Curvas IDF .....                                                                                                                       | 8  |
| Figura 2.3  | Áreas aportantes para sistema de evacuación aguas lluvias .....                                                                        | 9  |
| Figura 2.4  | Ubicación Zanjas y Dimensiones en Planta .....                                                                                         | 11 |
| Figura 2.5  | Celdas de flotación .....                                                                                                              | 10 |
| Figura 2.6  | Pilas de lixiviación Minera Mantos Blancos .....                                                                                       | 11 |
| Figura 2.7  | Planta de electro-obtención de 180.000 tpa de Minera Escondida .....                                                                   | 12 |
| Figura 3.1  | Efecto del agua sobre el módulo resiliente de materiales de base y subbase .....                                                       | 14 |
| Figura 3.2  | Modelo revisado para materiales granulares .....                                                                                       | 15 |
| Figura 3.3  | Calicata N°1 .....                                                                                                                     | 17 |
| Figura 3.4  | Calicata N°2 .....                                                                                                                     | 18 |
| Figura 3.5  | Estructura Construida .....                                                                                                            | 20 |
| Figura 3.6  | Dimensiones y Pesos usados en los cálculos de la carga de rueda .....                                                                  | 21 |
| Figura 3.7  | Obtención del espesor de BTC mediante carta de diseño .....                                                                            | 24 |
| Figura 3.8  | Estructura equivalente con bases granulares de acuerdo a exigencia de mandante suponiendo existencia de sistema de aguas lluvias ..... | 26 |
| Figura 3.9  | Estructura adecuada suponiendo existencia de sistema de aguas lluvias .....                                                            | 27 |
| Figura 3.10 | Diseño del Pavimento 4 Contenedores Full .....                                                                                         | 27 |



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes generales**

Los proyectos de pavimentación industrial en nuestro país no tienen una revisión externa y es solo el mandante quien decide lo que se construye. Solo el proyecto de pavimentación del acceso requiere de una aprobación oficial y con relación a la evacuación aguas lluvias solo se revisa si ésta descarga a la calle o camino, y su aprobación se da por el Serviu Regional o la Dirección Regional de Vialidad, dependiendo de quien tenga la tuición de la vía

Durante mi experiencia laboral trabajando en la Empresa Pares y Álvarez Ingenieros, en calidad de ingeniero de proyectos a cargo del diseño del sistema de evacuación de aguas lluvias de la planta de fabricación de contenedores en San Antonio, se construye solo el diseño de pavimentación, lo que al no disponer de un sistema adecuado de evacuación de aguas lluvias genera deterioros prematuros de los pavimentos de adocretos contruidos sobre bases granulares.

Una de las características primordiales de todo diseño de pavimentos es que requiere inevitablemente complementarse con un diseño de evacuación de aguas lluvias. En este trabajo de titulación se presenta el caso de un proyecto en el que trabajó el suscrito, en que se construyen los pavimentos sin construirse el diseño hidráulico de la evacuación de aguas lluvias.

### **1.2 Objetivos del estudio**

El objetivo general de la memoria es exponer el diseño hidráulico para la evacuación de aguas lluvias y exponer los deterioros prematuros que se generan cuando no se construye el diseño hidráulico. Este trabajo de título se desarrolla de acuerdo al Reglamento para la Obtención de Título Profesional en Condiciones Especiales (DR N°019/2009).

- Su objetivo principal es presentar un caso real del efecto en los pavimentos de no construir un diseño de hidráulico para la evacuación de aguas lluvias.
- El objetivo secundario es presentar las etapas en que se participó, la alternativa que se construye y su efecto en el deterioro de los pavimentos.

### **1.3 Alcances del estudio**

Los alcances del estudio son los siguientes:

#### **1. Etapa de Diseño que comprende:**

- Estudio hidrológico
- Diseño hidráulico.
- Alternativas de solución.
- Proyecto aguas lluvias.
- Proyecto de pavimentación



2. Etapa construcción; solo se construye el proyecto de pavimentación.
3. Etapa evaluación del deterioro prematuro y colapso de los pavimentos.
  - La evaluación de los deterioros da origen a una demanda del mandante a constructora.
4. Conclusiones.
  - Como conclusiones se presenta y cuantifica los efectos del agua en subrasante y estructura del pavimento.

## 2. PROYECTOS DE SANEAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS

### 2.1 Generalidades

En el presente documento se incluyen las bases de cálculo que condicionan el diseño del sistema de evacuación de aguas lluvias del proyecto Planta Fabricación de Contenedores San Antonio. Éste tiene como objetivo principal la determinación de la definición de posibles soluciones de saneamiento de aguas lluvias al proyecto.

Por último, este informe se ha planteado como un estudio hidrológico cumpliendo el objetivo de la determinación de escorrentía superficial de aguas lluvias sobre plataformas para acopio de contenedores, calzadas y estructuras del proyecto.

El proyecto estará situado inmediatamente al sur de Autopista del Sol, Ruta 78, Paso Sepultura en ciudad de San Antonio, en la región de Valparaíso, Quinta Región. Podemos observar la ubicación del proyecto en la figura siguiente.

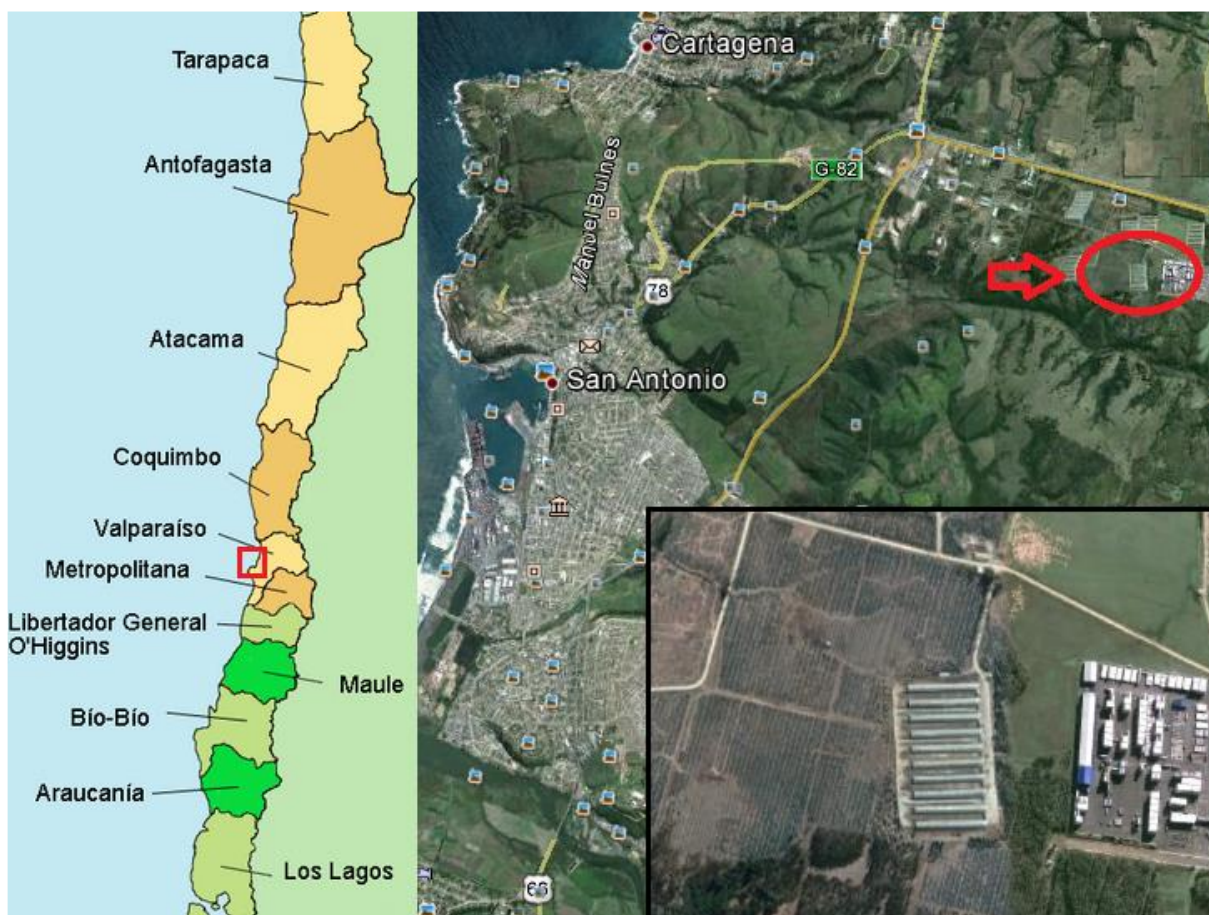


Figura 2.1: Ubicación Proyecto

## 2.2 Antecedentes

Para la elaboración del presente documento se utilizarán los siguientes antecedentes:

- American Association of State and Highway Transportation Officials, 1993 - "Guide for Design of Pavement Structures".
- AO, 2013 - "Informe de Mecánica de Suelos N° 108"
- Cancino, Fernando, 1996 - "Módulo Resiliente de Materiales Granulares Utilizados en Bases de Pavimentos en Chile"- Memoria Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Dirección de Vialidad, 2022 - "Manual de Carreteras 2022 – Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño".
- División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2008 - "Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación", División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2008.
- Knapton, John - "Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers", version 2 actualizada Mayo 2012, editado por David R. Smith, Interlocking Concrete Pavements Institute
- LEMCO - Universidad Técnica Federico Santa María, "INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 32429", 2015.
- NCHRP 01-37A, "Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures - APPENDIX DD-1: RESILIENT MODULUS AS FUNCTION OF SOIL MOISTURE-SUMMARY OF PREDICTIVE MODELS".
- Rada, C y Witczak, W.M., 1981 - "Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Materials", Transportation Research Record, 810, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Tomás Echaveguren Navarro, Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, año 2013.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos, División de Desarrollo Urbano, Chile, año 1997.

## 2.3 Etapa de Diseño

### 2.3.1 Estudio Hidrológico

A continuación, se presentan los cálculos realizados para el diseño del sistema de evacuación de aguas lluvias, que consisten en la caracterización pluviométrica del lugar, para lo cual se determinarán las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia).

#### 2.3.1.1 Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia.

La confección de las curvas IDF consiste principalmente en la determinación de la intensidad media de la lluvia ( $I_t^T$ ), asociada a un periodo de retorno T y a una duración igual a t horas.

### 2.3.1.2 Precipitación e Intensidad con duración entre 1 y 24 horas

Cuando no existen datos pluviográficos en la zona de interés, pueden estimarse las curvas IDF, siguiendo un procedimiento que considera la lluvia máxima diaria con 10 años de periodo de retorno, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_t^T = K \cdot CD_t \cdot CF_T \cdot P_{24}^{10}$$

Donde:

$P_t^T$ : Lluvia con periodo de retorno T y duración t horas (mm/h).

K: Coeficiente de corrección para precipitación máxima diaria, K = 1,1.

$CD_t$ : Coeficiente de duración para t horas.

$CF_T$ : Coeficiente de frecuencia para T años de periodo de retorno.

$P_{24}^{10}$ : Precipitación máxima diaria para periodo de retorno de 10 años (mm).

En las tablas 2.3.1 y 2.3.2 se muestran los coeficientes de frecuencia y duración respectivamente, asociados a distintos períodos de retorno, recomendados por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo en su manual Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos.

Tabla 2.1: Coeficientes de frecuencia para T años de periodo de retorno

|        | Periodo de Retorno (años) |      |      |      |      |      |
|--------|---------------------------|------|------|------|------|------|
|        | 2                         | 5    | 10   | 25   | 50   | 100  |
| $CF_T$ | 0,58                      | 0,83 | 1,00 | 1,17 | 1,39 | 1,56 |

Tabla 2.2: Coeficientes de duración para t horas

|        | Duración (horas) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        | 1                | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 18   | 24   |
| $CD_t$ | 0,14             | 0,23 | 0,33 | 0,42 | 0,55 | 0,64 | 0,70 | 0,78 | 0,90 | 1,00 |

La precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años se encuentra tabulada en manual Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos, cuyo valor es de 87,4 mm.

En la tabla 2.3.3 se muestran los resultados de las precipitaciones en milímetros calculadas para la zona, asociadas a distintos periodos y a duraciones entre 1 y 24 horas.

Tabla 2.3: Precipitaciones entre 1 y 24 horas para distintos periodos de retorno.

| Periodo de Retorno (años) | Precipitación para una duración (horas) |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
|---------------------------|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                           | 1                                       | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    | 12     | 14     | 18     | 24     |
| 2                         | 7,81                                    | 12,83 | 18,40 | 23,42 | 30,67 | 35,69 | 39,03  | 43,49  | 50,19  | 55,76  |
| 5                         | 11,17                                   | 18,35 | 26,33 | 33,51 | 43,89 | 51,07 | 55,86  | 62,24  | 71,82  | 79,80  |
| 10                        | 13,46                                   | 22,11 | 31,73 | 40,38 | 52,88 | 61,53 | 67,30  | 74,99  | 86,53  | 96,14  |
| 25                        | 15,75                                   | 25,87 | 37,12 | 47,24 | 61,87 | 71,99 | 78,74  | 87,74  | 101,24 | 112,48 |
| 50                        | 18,71                                   | 30,74 | 44,10 | 56,13 | 73,50 | 85,53 | 93,54  | 104,23 | 120,27 | 133,63 |
| 100                       | 21,00                                   | 34,50 | 49,49 | 62,99 | 82,49 | 95,99 | 104,98 | 116,98 | 134,98 | 149,98 |

### 2.3.1.3 Precipitación e Intensidad con duración menos que 1 hora.

Para precipitaciones de duración menor a 1 hora, en manual Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos se recomienda la aplicación de la expresión propuesta por Bell que ha sido corregida en Chile. De este modo, la precipitación se estima de la siguiente forma:

$$P_t^T = (0,21 \ln T + 0,52) (0,54 t^{0,25} - 0,50) P_{60}^{10}$$

Donde:

$P_t^T$  : Lluvia con periodo de retorno T y duración t minutos (mm/m).

t : Tiempo en minutos.

T : Periodo de retorno.

$P_{60}^{10}$  : Precipitación máxima en 1 hora para periodo de retorno de 10 años (mm).

En la tabla 2.3.4 se muestran los resultados de las precipitaciones en milímetros calculadas para la zona, asociadas a distintos periodos y a duraciones entre 5 y 60 minutos.

Tabla 2.4: Precipitaciones entre 5 y 60 minutos para distintos periodos de retorno.

| Periodo de Retorno (años) | Precipitación para una duración (minutos) |      |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 5                                         | 10   | 15    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    |
| 2                         | 2,75                                      | 4,12 | 5,04  | 5,75  | 6,84  | 7,69  | 8,38  | 8,98  |
| 5                         | 3,55                                      | 5,32 | 6,50  | 7,41  | 8,82  | 9,91  | 10,81 | 11,58 |
| 10                        | 4,15                                      | 6,22 | 7,60  | 8,67  | 10,32 | 11,59 | 12,64 | 13,55 |
| 25                        | 4,95                                      | 7,41 | 9,06  | 10,33 | 12,29 | 13,81 | 15,07 | 16,14 |
| 50                        | 5,55                                      | 8,31 | 10,16 | 11,59 | 13,79 | 15,49 | 16,90 | 18,11 |
| 100                       | 6,15                                      | 9,21 | 11,26 | 12,85 | 15,29 | 17,17 | 18,73 | 20,07 |

Finalmente, la intensidad de lluvia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_t^T = P_t^T / (t / 60)$$

Donde:

$I_t^T$  : Intensidad en mm/h

$t$  : Tiempo en minutos.

$P_t^T$  : Lluvia con periodo de retorno  $T$  y duración  $t$  horas (mm/h).

En las tablas 2.3.5 y 2.3.6 se muestran los resultados de las intensidades de lluvia calculadas para el lugar en estudio, asociada a distintos periodos de retorno y a duraciones entre 1 y 24 horas y 5 a 60 minutos.

Tabla 2.5: Intensidades de lluvia entre 1 y 24 horas.

| Periodo de Retorno (años) | Intensidad para una duración (horas) |       |       |       |       |      |      |      |      |      |
|---------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
|                           | 1                                    | 2     | 4     | 6     | 8     | 10   | 12   | 14   | 18   | 24   |
| 2                         | 7,81                                 | 6,41  | 4,60  | 3,90  | 3,83  | 3,57 | 3,25 | 3,11 | 2,79 | 2,32 |
| 5                         | 11,17                                | 9,18  | 6,58  | 5,59  | 5,49  | 5,11 | 4,65 | 4,45 | 3,99 | 3,32 |
| 10                        | 13,46                                | 11,06 | 7,93  | 6,73  | 6,61  | 6,15 | 5,61 | 5,36 | 4,81 | 4,01 |
| 25                        | 15,75                                | 12,94 | 9,28  | 7,87  | 7,73  | 7,20 | 6,56 | 6,27 | 5,62 | 4,69 |
| 50                        | 18,71                                | 15,37 | 11,02 | 9,35  | 9,19  | 8,55 | 7,80 | 7,45 | 6,68 | 5,57 |
| 100                       | 21,00                                | 17,25 | 12,37 | 10,50 | 10,31 | 9,60 | 8,75 | 8,36 | 7,50 | 6,25 |

Tabla 2.6: Intensidades de lluvia entre 5 y 60 minutos.

| Periodo de Retorno (años) | Intensidad para una duración (minutos) |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | 5                                      | 10    | 15    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    |
| 2                         | 33,05                                  | 24,74 | 20,16 | 17,25 | 13,68 | 11,53 | 10,06 | 8,98  |
| 5                         | 42,61                                  | 31,89 | 25,99 | 22,24 | 17,64 | 14,86 | 12,97 | 11,58 |
| 10                        | 49,84                                  | 37,30 | 30,40 | 26,01 | 20,63 | 17,38 | 15,17 | 13,55 |
| 25                        | 59,40                                  | 44,45 | 36,23 | 31,00 | 24,59 | 20,72 | 18,08 | 16,14 |
| 50                        | 66,63                                  | 49,86 | 40,64 | 34,77 | 27,58 | 23,24 | 20,28 | 18,11 |
| 100                       | 73,85                                  | 55,28 | 45,05 | 38,55 | 30,58 | 25,76 | 22,48 | 20,07 |

#### 2.3.1.4 Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia.

En la figura 2.2 se muestra el resultado gráfico de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia.

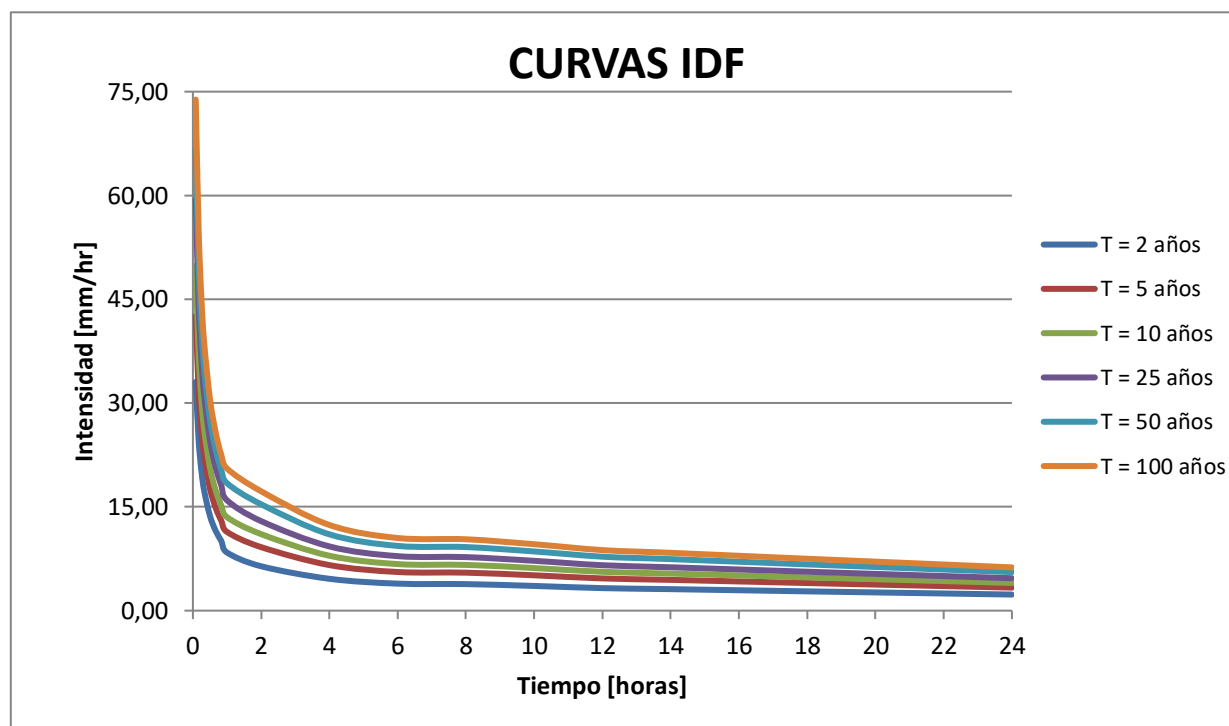


Figura 2.2: Curvas IDF

Estas curvas muestran el comportamiento de las precipitaciones en el lugar en estudio en relación a distintos periodos de retorno y tiempos de duración del evento de precipitación.

Se determina como lluvia de diseño la curva asociada a 100 años de periodo de retorno.

#### 2.3.1.5 Tiempo de Concentración.

Para seleccionar la duración de la lluvia de diseño, se tiene que determinar el tiempo de concentración para asegurar que la superficie aportante es la máxima y así obtener el máximo caudal a la salida.

El tiempo de concentración se define como el tiempo necesario para que la partícula de agua hidráulicamente más alejada alcance la salida.

El tiempo de concentración se calculará mediante la expresión de la Federal Aviation Agency (1970) recomendado por el Manual de Carreteras Volumen 3.

$$T_c = \frac{3,26 \cdot (1,1 - C) \cdot L^{0,5}}{(100 \cdot S)^{0,33}}$$

Donde:

$T_c$  : Tiempo de concentración (min).

$C$  : Coeficiente de Escurrimiento.

$L$  : Longitud del flujo superficial (m).

$S$  : Pendiente superficie (m/m)

De acuerdo al Manual Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos.

Tabla 2.7: Coeficientes de escurrimiento.

| Tipo terreno       | Coeficiente de escurrimiento |
|--------------------|------------------------------|
| Áreas Industriales | 0,80                         |

En la figura 2.3 se muestra la distribución de áreas aportantes para el sistema de evacuación de aguas lluvias.

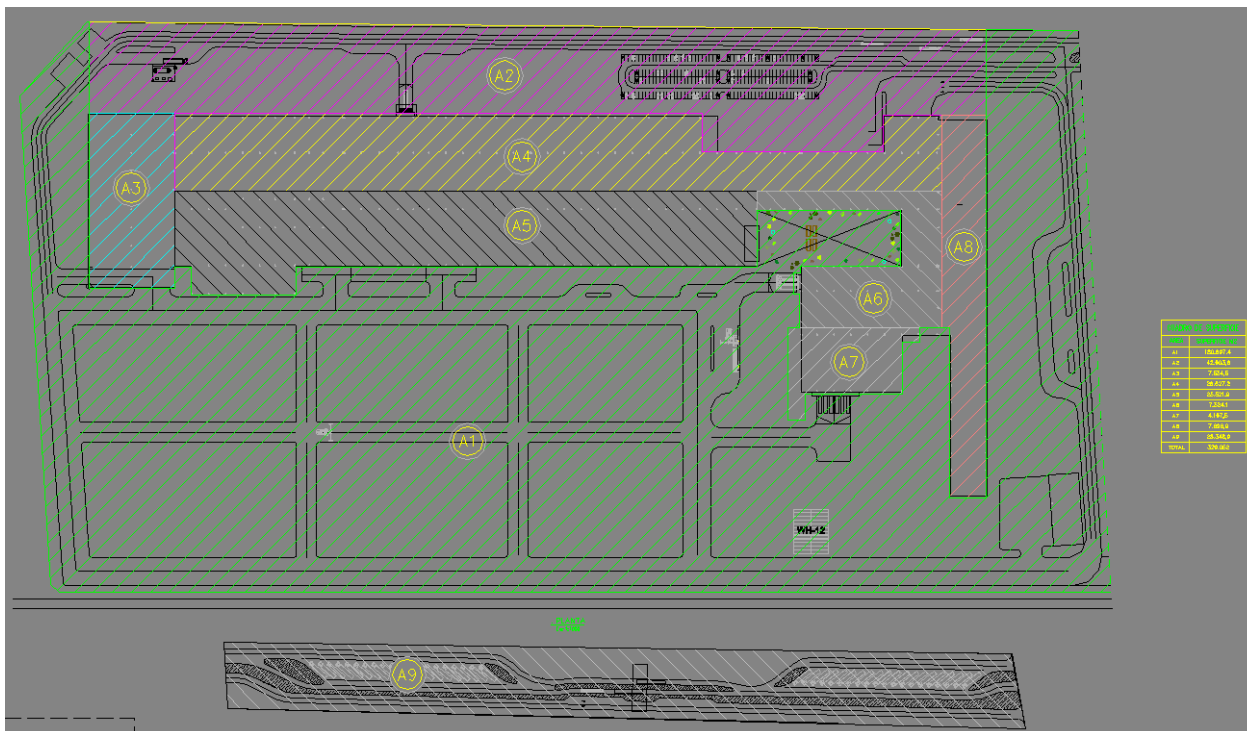


Figura 2.3: Áreas aportantes para sistema de evacuación aguas lluvias

### 2.3.1.6 Alternativas de Solución

A continuación, se muestra la tabla 2.3.8 resumen con los tiempos de concentración para cada área aportante.

**Tabla 2.8: Tiempos de concentración (minutos).**

| Superficies | L<br>[m] | S<br>[m/m] | C    | T <sub>ci</sub><br>[min] |
|-------------|----------|------------|------|--------------------------|
| <b>A1</b>   | 404,500  | 0,01       | 0,80 | 19,67                    |
| <b>A2</b>   | 87,300   | 0,01       | 0,80 | 9,14                     |
| <b>A3</b>   | 30,000   | 0,05       | 0,80 | 3,15                     |
| <b>A4</b>   | 55,600   | 0,05       | 0,80 | 4,29                     |
| <b>A5</b>   | 73,150   | 0,05       | 0,80 | 4,92                     |
| <b>A6</b>   | 52,800   | 0,05       | 0,80 | 4,18                     |
| <b>A7</b>   | 47,300   | 0,05       | 0,80 | 3,95                     |
| <b>A8</b>   | 31,700   | 0,05       | 0,80 | 3,24                     |
| <b>A9</b>   | 50,341   | 0,05       | 0,80 | 4,08                     |

De la tabla 2.3.8 se puede observar que solo para el área A1 el tiempo de concentración es superior a 10 minutos, por lo tanto, para el resto de las áreas el tiempo de concentración será de 10 mín., que para efectos de diseño se considera apropiado para la estimación de caudales.

### 2.3.1.7 Proyecto de Aguas Lluvias

Las zanjas de infiltración son obras longitudinales que reciben el agua en toda su longitud, interceptando el flujo superficial de una tormenta y evacuándolo mediante infiltración al subsuelo. Si la zanja no puede recibir el agua en toda su longitud, es posible alimentarla desde uno de los extremos empleando para ello una tubería perforada a lo largo de la parte superior, para lo cual es conveniente disponer de cámaras a la entrada y a la salida. En este caso la zanja propiamente tal puede cubrirse de manera de emplear la superficie para otros fines, como veredas, paseos o estacionamientos. El funcionamiento hidráulico de estas obras puede resumirse en tres etapas. La primera es el ingreso del agua proveniente de la tormenta a la zanja, la que se puede efectuar a través de la superficie o desde redes de conductos. Una vez que ingresa a la zanja, el agua se almacena temporalmente en su interior, para posteriormente ser evacuada a través del suelo mediante infiltración.

- Determinar el área aportante para la zanja.
- Calcular un coeficiente de escorrentía C promedio.
- Definir una intensidad de lluvia diaria (24 horas) con período de retorno de 100 años.
- Tasa de Infiltración, obtenida de la mecánica de suelos.
- Con los datos disponibles, calcular el volumen afluente, es decir, la cantidad de agua que aporta el área a la zanja.
- Con los datos disponibles, calcular el volumen infiltrado, es decir la cantidad de agua que es capaz de absorber el suelo.
- La diferencia entre estos dos valores anteriores, es el volumen de acumulación, para el cual se determinan las longitudes de la zanja.

- Se determinan los tipos de geotextil y relleno que se van a usar según recomendaciones del Manual de Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos.

Para cada una de las áreas aportantes se determinó una zanja de infiltración, las cuales tienen 5 metros de profundidad y 2,5 metros de ancho. La tasa de infiltración en el sector, según la mecánica de suelos es de 360 [mm/hora] ó  $1 \times 10^{-4}$  [m/seg].

A continuación, se muestra un esquema con la ubicación de las zanjas y sus dimensiones en planta.

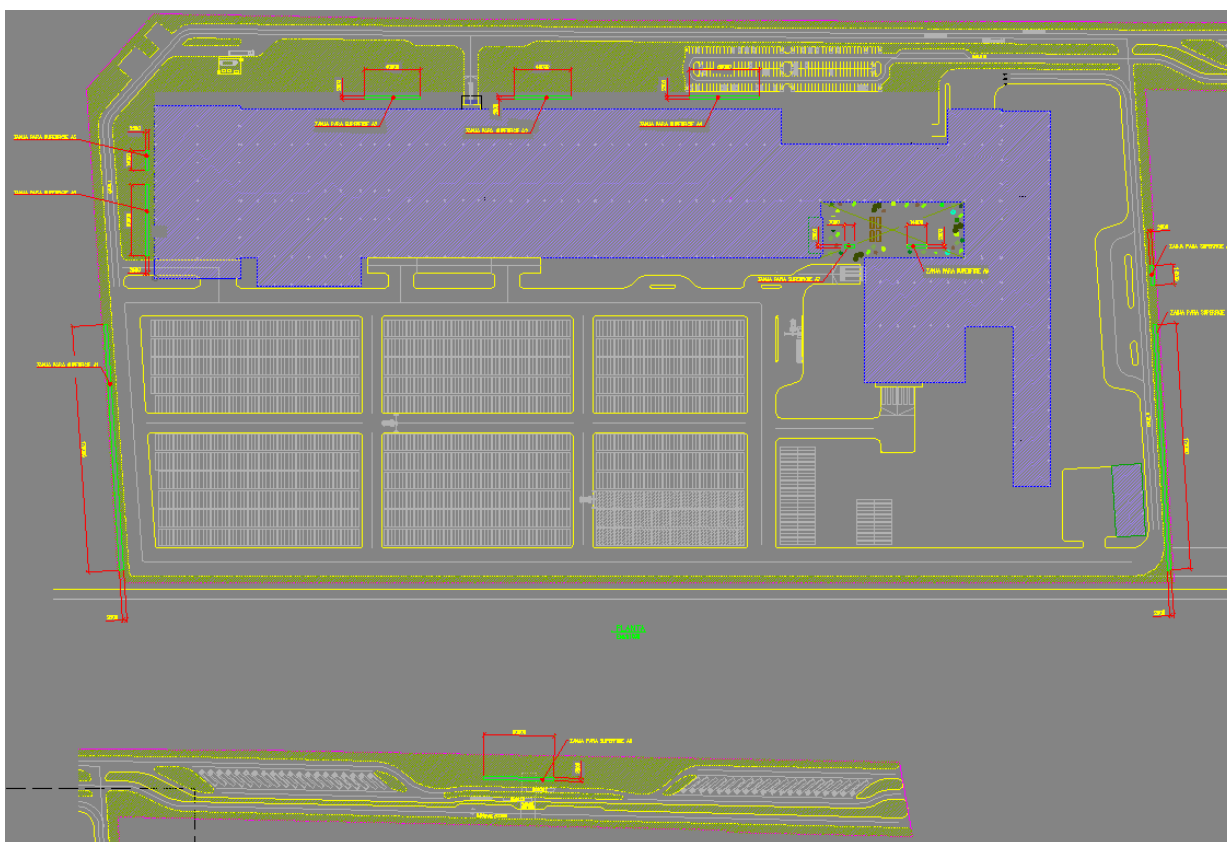


Figura 2.4: Ubicación Zanjas y Dimensiones en Planta



### **3. PROYECTO DE PAVIMENTACIÓN**

#### **3.1 Introducción**

Se evaluará el efecto que produce no disponer de un sistema adecuado de evacuación de aguas lluvias, lo que produce contaminación que trae consigo la incorporación de finos en las bases granulares, lo que provoca finalmente una disminución de la capacidad de soporte de la estructura de pavimento.

Para evaluar este efecto, se hará un análisis de sensibilidad evaluando como afecta una disminución de la capacidad de soporte en el espesor de base granular requerida en la estructura de pavimento.

Se mostrará el efecto en la estructura del pavimento de seleccionar un coeficiente de drenaje que usualmente se emplea en AASHTO para considerar el estancamiento del agua lluvia en el paquete estructural.

Finalmente, se rediseñará el pavimento de adocreto para la grúa Konecranes SMV 4531 TB5 de 71.780 kg de peso total, la cual es usada actualmente en la fábrica Maersk. El diseño se hace considerando base granular para efectos de análisis, aunque se recomienda no usarlas dado los malos resultados históricos registrados en Chile.

*Este diseño se hace suponiendo un sistema de evacuación de aguas lluvias adecuado.*

#### **3.2 Revisión Bibliográfica respecto al Efecto de la Humedad en la Capacidad de Soporte**

##### **3.2.1 El Módulo Resiliente**

El Módulo Resiliente es empleado en la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 93 para caracterizar el comportamiento mecánico. El módulo resiliente es un módulo dinámico para caracterizar el comportamiento elástico del material.

El método AASHTO 93 es el método vigente en nuestro país y es empleado por el Código de Normas y Especificaciones Técnicas del MINVU y en el Volumen 3 del Manual de Carreteras.

##### **3.2.2 Relación entre el Módulo Resiliente y el CBR**

Se sabe que los métodos de diseño de pavimentos de adocreto utilizan como parámetro principal para estimar la capacidad de soporte de las capas granulares y de subrasante, el valor del CBR. Sin embargo, existe una relación directa entre el valor del CBR y el módulo resiliente que se aplica en los métodos de diseño de pavimentos.

Por ejemplo, el Manual de Carreteras aplica la siguiente relación entre CBR y Módulo Resiliente:



$$M_R(MPa) = 17,6(CBR)^{0,64} \quad \text{Para } CBR < 12\%$$

$$M_R(MPa) = 22,1(CBR)^{0,55} \quad \text{Para } 12\% \leq CBR < 80\%$$

### 3.2.3 Efecto de la Humedad en el Módulo Resiliente

Se ha demostrado que aumentos en el contenido de humedad implican una disminución del módulo resiliente (Rada y Witczak, 1981).

El año 1996 en el Laboratorio Nacional de Vialidad, Fernando Cancino junto a Gabriel Palma, investigaron el módulo resiliente de materiales granulares. El estudio se titula "Módulo Resiliente de Materiales Granulares Utilizados en Bases de Pavimentos en Chile".

Dentro de los objetivos del estudio se encontraba el demostrar la influencia de la humedad en el módulo resiliente.

Las conclusiones del estudio evidenciaron gran influencia de la humedad. Se registraron variaciones de 15% en el módulo resiliente para cambios de 2 puntos porcentuales respecto a la óptima. El comportamiento se puede resumir que para un mismo nivel de tensiones, el valor del módulo resiliente disminuye cuando la humedad de compactación aumenta.

El efecto de la humedad en el módulo resiliente ha sido motivo de estudio en diversas publicaciones. Por este motivo se han planteado diversos modelos que buscan caracterizar este fenómeno.

Rada y Witczak demostraron que los módulos resilientes de las bases y subbases son afectados por variaciones en el nivel de humedad tal como se muestra en la Figura 1.

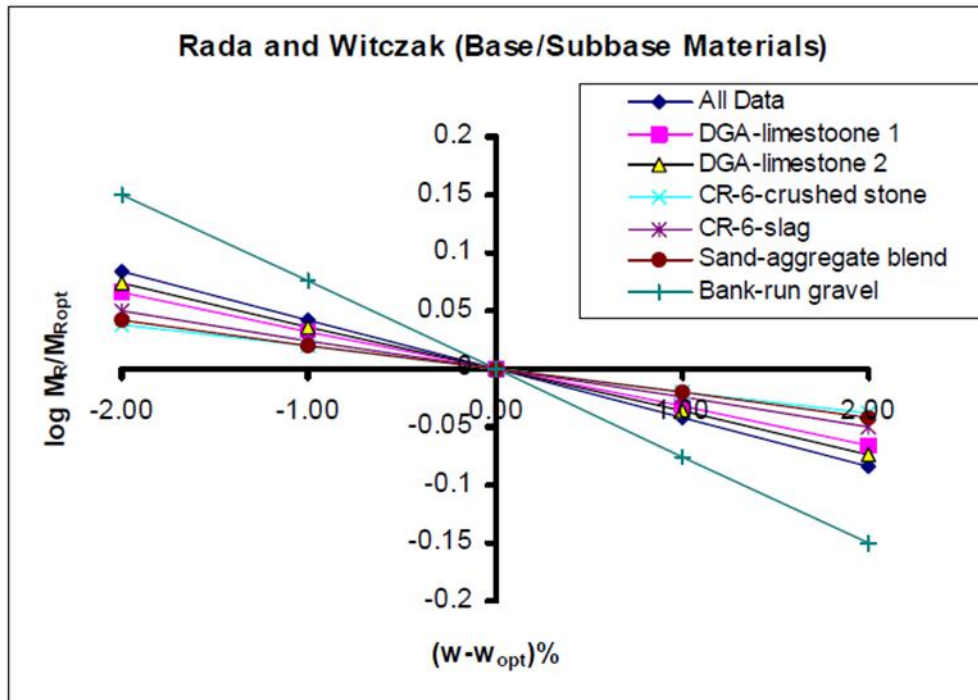


Figura 3.1: Efecto del agua sobre el módulo resiliente de materiales de base y subbase

El informe elaborado por la NCHRP en el contexto de la elaboración de la guía Empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos titulado “APPENDIX DD-1: RESILIENT MODULUS AS FUNCTION OF SOIL MOISTURE-SUMMARY OF PREDICTIVE MODELS” muestra el llamado “modelo revisado” en el cual se aprecia y ratifica que a medida que se aumentan los porcentajes de humedad (equivalentemente los grados de saturación) se produce una disminución del módulo resiliente y en consecuencia la capacidad de soporte. Gráficamente, este efecto se puede apreciar en la Figura 3.2.

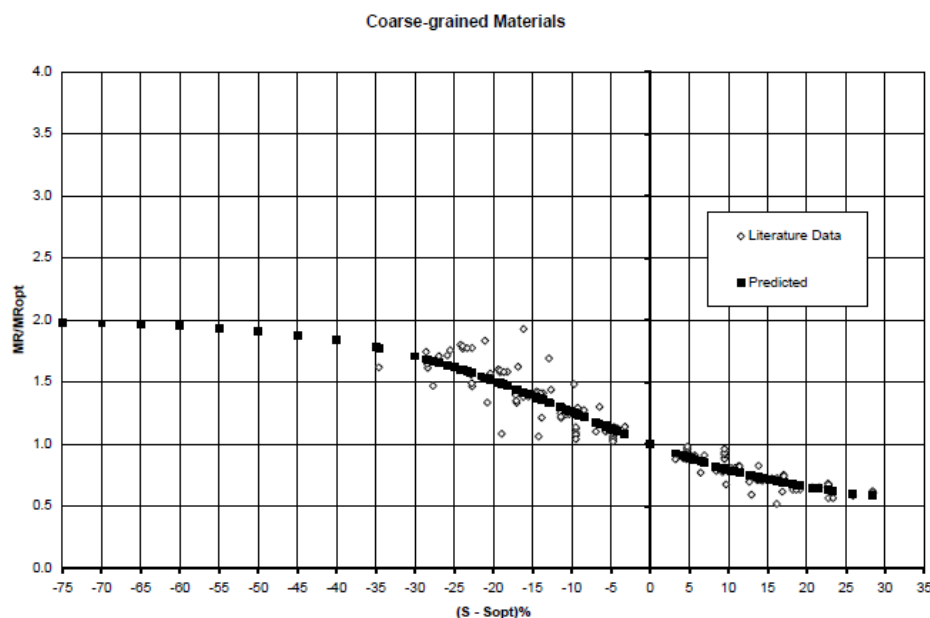


Figura 3.2: Modelo revisado para materiales granulares

De acuerdo a la revisión bibliográfica se puede concluir que el módulo resiliente disminuye al aumentar el contenido de humedad pudiendo llegar a un 60% de su valor a humedad óptima, lo que equivale a una disminución de la capacidad de soporte.

### 3.2.4 Coeficientes de Drenaje

El Método de diseño de pavimentos AASHTO 93 en uso en nuestro país considera coeficientes de drenaje “mi” que varían de 0.4 a 1,4 (Ver Tabla 3.). Estos coeficientes multiplican a los coeficientes estructurales del pavimento, en otras palabras, dan cuenta de la capacidad de soporte de una estructura sometida a distintos niveles de saturación.

**Tabla 3.1: Coeficientes de drenaje según AASHTO 93**

| Calidad del Drenaje | Porcentaje de Tiempo en que la Estructura del Pavimento es Expuesta a Niveles de Humedad Cercanas a la Saturación |           |           |               |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|---------------|
|                     | Menor que 1%                                                                                                      | 1% - 5%   | 5% - 15%  | Mayor que 25% |
| Excelente           | 1.40-1.35                                                                                                         | 1.35-1.30 | 1.30-1.20 | 1.20          |
| Bueno               | 1.35-1.25                                                                                                         | 1.25-1.15 | 1.15-1.00 | 1.00          |
| Regular             | 1.25-1.15                                                                                                         | 1.15-1.05 | 1.00-0.80 | 0.80          |
| Pobre               | 1.15-1.05                                                                                                         | 1.05-0.80 | 0.80-0.60 | 0.60          |
| Muy Pobre           | 1.05-0.95                                                                                                         | 0.95-0.75 | 0.75-0.40 | 0.40          |

En las zonas en que la subrasante es muy plástica, no existe la posibilidad de que el agua se infiltre ni que drene, por lo cual esta agua permanece en la estructura y es equivalente a tenerla

sumergida en una napa de agua, debiéndose incorporar por tanto un sistema de evacuación de aguas lluvias.

### 3.3 Análisis de Sensibilidad

#### 3.3.1 Efecto de contaminación en Base granular

Se estima que, en la condición actual del pavimento construido, se produjo una importante contaminación de las bases granulares, provocándose una degradación general de la base, así como un aumento de material fino lo cual se puede modelar con un descenso del CBR. Esta contaminación, tal como se mencionó en el anterior informe, fue producida por la acumulación de aguas que a su vez provocó el descenso de material fino a las bases granulares. Este fenómeno fue gatillado por la nula solución de aguas lluvias de este pavimento actualmente en servicio.

El análisis de sensibilidad se hace disminuyendo el CBR desde 100% hasta 50%. Esto provocará un cambio en los factores de conversión que irán aumentando a medida que disminuya el CBR. Por otro lado, para mantener el espesor de  $BTC_{8/10}$  equivalente se requerirá aumentar la capa de base granular que se está usando para la sensibilización, vale decir, la capa de base más cercana a la superficie. La Tabla muestra los resultados del análisis de sensibilidad.

**Tabla 3.2: Resultados del análisis de sensibilidad en función del CBR**

| CBR % | Factor de Conversión | Espesor Requerido [cm] |
|-------|----------------------|------------------------|
| 100   | 2                    | 92                     |
| 90    | 2,1                  | 97                     |
| 80    | 2,2                  | 101                    |
| 70    | 2,3                  | 105                    |
| 60    | 2,4                  | 110                    |
| 50    | 2,5                  | 115                    |

Por lo tanto, para el caso más crítico, se requeriría aumentar 23 cm el espesor de la capa de base granular más cercana a la superficie si ésta baja su CBR a un 50% producto de la contaminación por finos.

Para verificar el efecto real que tuvo la contaminación en la capacidad de soporte de la base granular, un laboratorio certificado extrajo dos muestras de la zona del patio de contenedores donde se presentaba daño en la estructura. Estas calicatas se muestran en la Figura 3.3 y Figura 3.4.

En esta visita también asistió el Ingeniero Civil, quien verificó que la base granular presenta una gran cantidad de finos que proviene de aportes superficiales y principalmente de aportes desde la subrasante, que producto de la humedad y el no tener un geotextil separador que impidiera la aparición de finos, éstos subieron hacia la superficie.

Con las muestras extraídas se procedió a hacer ensayos de granulometría para determinar la cantidad de finos que presenta actualmente la base granular. Adicionalmente, a las muestras se les practicó el ensayo de CBR para cuantificar el descenso en la capacidad de soporte producto de la contaminación.

El material ensayado es un material distorsionado, degradado, por lo cual es la peor situación que se puede encontrar. Las bases originales preparadas en planta, deberían tener un mejor comportamiento.

Los resultados se resumen en la Tabla.

**Tabla 3.3: Resumen ensayos de Laboratorio**

| Nº Muestra | % Pasando Malla Nº200 | % CBR al 95% del P.M. | Lugar de Extracción                                                           |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | 20                    | 64                    | Calicata Nº1, patio sur, eje 25 entre ejes P-Q.                               |
| 2          | 22                    | 60                    | Calicata Nº2, patio sur oriente a 15,0 m de intersección de eje 37 con eje U. |

De acuerdo a estos resultados hay un CBR promedio de 62%, lo que significa que de acuerdo a los manuales y la sensibilización existente, faltaría estructura por este concepto.

Sin embargo, repitiendo el ejercicio anterior y considerando el resultado del análisis de sensibilidad hecho en la Tabla 3.2 y el CBR real de 62%, se tiene que para mantener el espesor de  $BTC_{8/10}$  equivalente se requerirá aumentar la capa de base granular más cercana a la superficie a 109 cm, lo que constituye un aumento de 17 cm respecto al caso ideal con CBR 100%.



Figura 3.3: Calicata Nº1



Figura 3.4: Calicata N°2

### 3.3.2 Efecto del Agua

Al no poseer un sistema de evacuación de aguas lluvias terminado, la estructura de pavimentos se encuentra sobre una zona totalmente saturada y por lo tanto con capacidad de soporte disminuida como se muestra mediante el siguiente ejercicio.

El agua ha provocado una migración de finos, tanto de la subrasante como de la superficie. Es práctica habitual en obra viales, colocar un geotextil separador entre la subrasante con finos y la subbase, además de drenes para sacar el agua depositada.

Para considerar el efecto del agua, se variará el rango de los coeficientes de drenaje para una subrasante fina según lo indicado por el Manual de Carreteras 2015, Volumen 3, Tabla 3.604.106.B. (Ver Tabla 3.4).

**Tabla 3.4: Manual de Carreteras 2015, Volumen 3, Tabla 3.604.106.B.**

**TABLA 3.604.106.B**  
**COEFICIENTES DE DRENAJE ( $m_1$ )**

| REGION   | PRECIP.         | BASE PERMEABLE | BASE : FINOS HASTA 10% |               | BASE: MAS 10% FINOS |               |
|----------|-----------------|----------------|------------------------|---------------|---------------------|---------------|
|          |                 |                | SUBRAS. GRAN.          | SUBRAS. FINOS | SUBRAS. GRAN.       | SUBRAS. FINOS |
| IV       | $\leq 100$ mm   | 1,40 - 1,35    | 1,35 - 1,25            | 1,35 - 1,25   | 1,25 - 1,15         | 1,05          |
|          | $> 100$ mm      | 1,40 - 1,35    | 1,35 - 1,25            | 1,35 - 1,25   | 1,15 - 1,00         | 1,05 - 0,80   |
| V a VI   | $\leq 150$ mm   | 1,40 - 1,35    | 1,35 - 1,25            | 1,35 - 1,25   | 1,15 - 1,00         | 1,00          |
|          | $> 150$ mm      | 1,40 - 1,35    | 1,35 - 1,25            | 1,25 - 1,15   | 1,00                | 1,00 - 0,80   |
| VII a IX | $\leq 350$ mm   | 1,40 - 1,35    | 1,35 - 1,25            | 1,35 - 1,25   | 1,00                | 0,80          |
|          | $> 350$ mm      | 1,40 - 1,35    | 1,25 - 1,15            | 1,25 - 1,15   | 1,00-0,80           | 0,80          |
| X        | $\leq 1.500$ mm | 1,40 - 1,35    | 1,25 - 1,15            | 1,15          | 1,00-0,80           | 0,80 - 0,60   |
|          | $> 1.500$ mm    | 1,35 - 1,30    | 1,15 - 1,00            | 1,15 - 1,00   | 0,80                | 0,60          |
| XI y XII | $\leq 500$ mm   | 1,40 - 1,35    | 1,35 - 1,25            | 1,25 - 1,15   | 1,00                | 1,00 - 0,80   |
|          | $> 500$ mm      | 1,40 - 1,35    | 1,25 - 1,15            | 1,15          | 0,80                | 0,80          |

Base permeable: menos de 3% de finos y/o coeficiente de permeabilidad  $> 0,01$  cm/s  
Subras Gran.: subrasante granular, máximo 35% pasa tamiz de 0,08 mm  
Subras Finos: subrasante de suelo fino.

Como se puede observar en la Tabla 3.4, para la V Región y subrasante fina, con una precipitación mayor a 150 mm anuales, el coeficiente de drenaje varía de 1 a 0,8.

Nótese que el Manual de Carreteras supone que hay un diseño de aguas lluvias para carreteras.

El análisis de sensibilidad en función de los coeficientes de drenaje se muestra en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5: Análisis de sensibilidad en función de los coeficientes de drenaje**

| <b>Coeficiente de Drenaje</b> | <b>Espesor Requerido [cm]</b> |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1,00                          | 92                            |
| 0,96                          | 96                            |
| 0,92                          | 100                           |
| 0,88                          | 105                           |
| 0,84                          | 110                           |
| 0,80                          | 115                           |

Por lo tanto, una disminución de los coeficientes de drenaje de 1 a 0,8 requiere aumentar 23 cm el espesor de la capa de base granular más cercana a la superficie.

Esta disminución de los coeficientes de drenaje no considera el efecto de estar sumergido el paquete estructural (relleno estructural, sub base y base) en forma permanente como lo es en este caso, en que la disminución de la resistencia de la base se encuentra afectada por el efecto del tiempo de inmersión que va más allá de las propiedades del material, pudiendo llegar a afectarse en 40% la resistencia del material granular. Por lo tanto, evidentemente se requiere aumentar los espesores bastante más que 23 cm.

### 3.4 Estructura Existente

La estructura existente tomada del informe de AO – “Informe de Mecánica de Suelos N° 108” de abril de 2013, fue diseñada para la grúa SMV7/8 ECB90 y corresponde a la mostrada en la Figura 3.5.

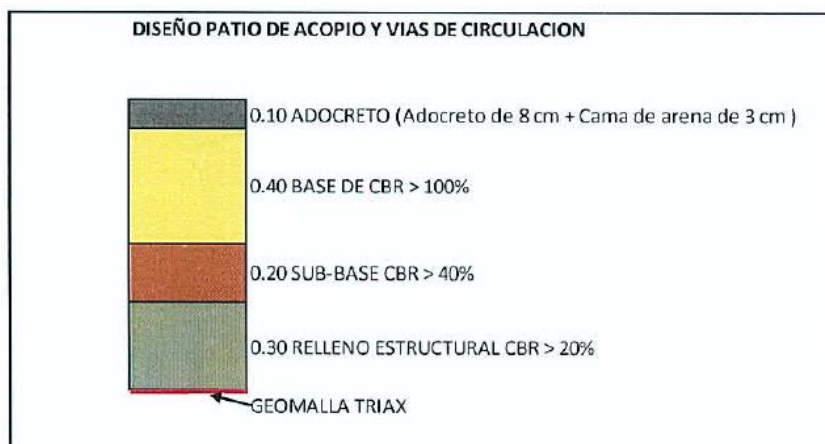


Figura 3.5: Estructura Construida

Aplicando factores de conversión (Ver Tabla 6), se llega a una estructura equivalente a un BTC 8/10 de 38 cm, la cual dista de los 64 cm adecuados determinados por esta consultora en el Capítulo 3.5.

Tabla 3.6: Espesor equivalente de BTC 8/10

| Capa     | Espesor Capa [cm] | Factor de Conversión | Espesor BTC 8/10 [cm] |
|----------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| CBR 100% | 40                | 2                    | 20                    |
| CBR 40%  | 20                | 2,6                  | 8                     |
| CBR 20%  | 30                | 2,8                  | 11                    |
|          |                   | <b>Total</b>         | <b>38</b>             |

### 3.5 Rediseño de la Estructura

#### 3.5.1 Manual de Diseño Utilizado

Para hacer este diseño se utilizará el "Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers", "del autor John Knapton.

#### 3.5.2 Cálculo de la Carga de Rueda

Se utilizará la configuración mostrada en la Figura 3.6

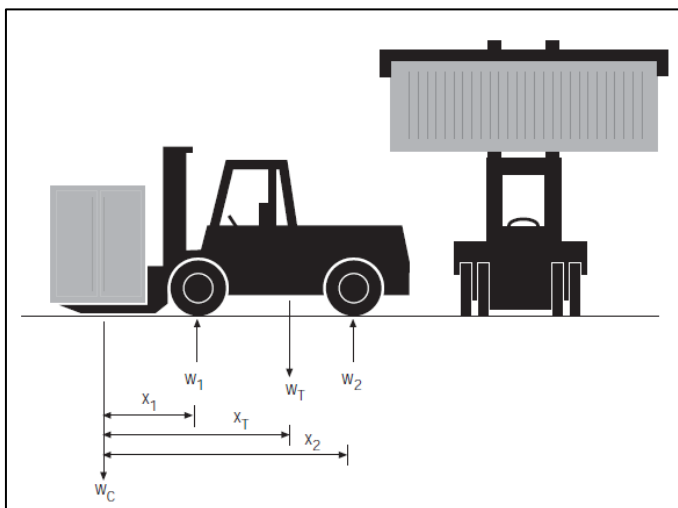


Figura 3.6: Dimensiones y Pesos usados en los cálculos de la carga de rueda

$$W_1 = f_d \times \frac{A_1 \cdot W_c + B_1}{M}$$

$$W_2 = f_d \times \frac{A_2 \cdot W_c + B_2}{2}$$

Donde

$W_1$ : Carga del eje delantero (kg)

$W_2$ : Carga del eje trasero (kg)

$W_c$ : Carga de contenedor (kg)

$M$ : Número de ruedas en el eje delantero

$f_d$ : Factor dinámico

$$A_1 = \frac{-X_2}{X_1 - X_2} \quad A_2 = \frac{-X_1}{X_2 - X_1}$$

$$B_1 = \frac{W_T (X_T - X_2)}{X_1 - X_2} \quad B_2 = \frac{W_T (X_T - X_1)}{X_2 - X_1}$$

$X_1$  y  $X_2$  mostrado en el diagrama

$W_T$  = Carga de la máquina

Para este caso se tiene para el peso de la máquina y del contenedor los datos mostrados en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7: Peso de la máquina y del contenedor**

|       |           |
|-------|-----------|
| $W_T$ | 71.780 kg |
| $W_C$ | 40.000 kg |

En el caso del factor dinámico, se considera el efecto de frenado y giro que es tomado de la Tabla N°17 del manual de referencia.

La Tabla 3.8 resume los resultados para los cálculos de los parámetros involucrados.

**Tabla 3.8: Resumen de resultados**

| Parámetro | Valor     |
|-----------|-----------|
| $X_1$     | 2.800 mm  |
| $X_2$     | 9.200 mm  |
| $X_T$     | 6.000 mm  |
| $A_1$     | 1,44      |
| $A_2$     | -0,44     |
| $B_1$     | 35.890 kg |
| $B_2$     | 35.890 kg |
| $f_d$     | 1,7       |
| $W_1$     | 39.691 kg |

Por lo tanto, se pueden obtener finalmente los resultados de la Tabla

**Tabla 3.9: Carga Rueda simple Equivalente considerando Frenado y Giro**

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Carga Rueda simple Equivalente considerando Frenado y Giro</b> | 39.691 kg |
| <b>Carga Rueda simple Equivalente considerando Frenado y Giro</b> | 389 KN    |

### 3.5.3 Caracterización de la Subrasante

Se considerará una subrasante de CBR 2% según mediciones dadas en el informe de mecánica de suelos “AO – Informe de Mecánica de Suelos N° 108, Abril 2013”.

Del manual de diseño se obtiene la expresión para el “Espesor Efectivo de Base  $C_{8/10}$ ”:

$$\text{Espesor Efectivo de Base } C_{8/10} = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35.000}{CBR \times 10}}$$

Para este caso, se tiene:

$$\text{Espesor Efectivo de Base } C_{8/10} = 3.615 \text{ mm}$$

### 3.5.4 Factores de Proximidad de Carga

Para esta grúa se tiene los siguientes factores de proximidad de carga, interpolando de la Tabla 19 del Manual de Referencia y considerando 3.000 mm de Espesor Efectivo de Base  $C_{8/10}$ , obteniendo lo mostrado en la Tabla.

**Tabla 3.10: Determinación de los factores de proximidad**

| Espaciamiento de Ruedas [mm] | Factor de Proximidad |
|------------------------------|----------------------|
| 560                          | 1,94                 |
| 3.590                        | 1,05                 |
| Mayor que 4.500              | 1,00                 |

Por lo tanto, se tiene un factor  $B=0,94+0,05+1=1,99$

### 3.5.5 Carga Rueda Simple Equivalente

Por lo tanto, se tiene:

**Carga Rueda simple Equivalente considerando (Frenado y Giro) x B = 774 KN**

### 3.5.6 N° de Pasadas a través de la Vida de Diseño

Se estima un número de pasadas en la vida de diseño de:

$= 180 \times 365 \times 20 = 1.314.000$  pasadas, considerando 180 pasadas diarias para 20 años de vida de diseño.

### 3.5.7 Determinación del Espesor de $BTC_{8/10}$

De acuerdo a las cartas de diseño del Manual de referencia y los datos calculados anteriormente:

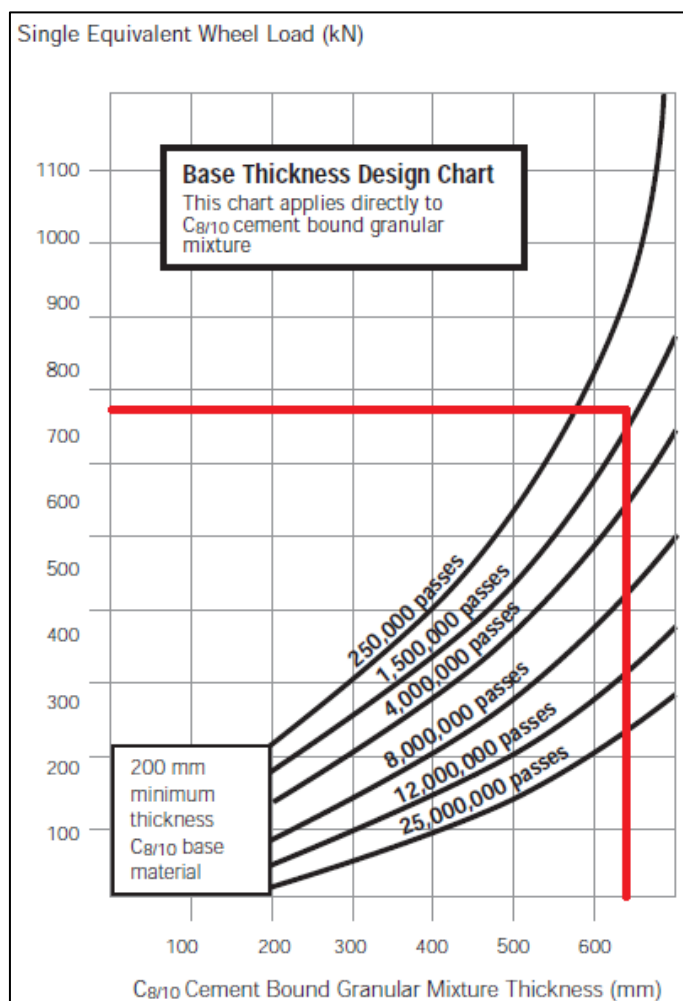


Figura 3.7: Obtención del espesor de BTC mediante carta de diseño

se requieren 640 mm de BTC 8/10

### 3.5.8 Conversión de BTC a Materiales Granulares

Para esta conversión se toma la BTC calculada en 5.7 y se lleva a espesores de materiales granulares con factores de conversión obtenidos de la

Tabla sacada del manual "Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers", de John Knapton.

**Tabla 3.11 Factores de Conversión**

Table 10. Different pavement base, subbase, and capping materials with permissible flexural strengths and conversion factors from 1,400 psi (10 MPa) cement-treated base.

| Pavement Layer                                                 | Compressive Strength<br>in psi (MPa) | Conversion Factor<br>from 1,400 psi<br>Cement-treated base |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| (i) Pavement quality concrete                                  | 4,200 (29)                           | 0.80                                                       |
| (ii) Pavement quality concrete                                 | 5,600 (38.6)                         | 0.70                                                       |
| (iii) Asphalt-treated Base (Modulus = 350,000 psi) (2,414 MPa) | -                                    | 0.93                                                       |
| (iv) Asphalt-treated Base (Modulus = 170,000 psi) (1,172 MPa)  | -                                    | 1.40                                                       |
| (v) Asphalt Treated Base (Modulus = 90,000 psi) (621 MPa)      | -                                    | 2.80                                                       |
| (vi) Cement-treated Base (Modulus = 1,100,000 psi) (7,586 MPa) | 1,400 (10)                           | 1.00                                                       |
| (vii) Cement-treated Base (Modulus = 820,000 psi) (5,655 MPa)  | 800 (5.5)                            | 1.27                                                       |
| (viii) Cement-treated Base (Modulus = 620,000 psi) (4,276 MPa) | 420 (2.9)                            | 1.75                                                       |
| (ix) Cement-treated Base (Modulus = 470,000 psi) (3,241 MPa)   | 140 (1)                              | 2.80                                                       |
| (x) Granular subbase Layer (Modulus = 21,000 psi) (145 MPa)    | 100% CBR                             | 2.00                                                       |
| (xi) Granular subbase Layer (Modulus = 13,600 psi) (94 MPa)    | 22% CBR                              | 2.80                                                       |
| (xii) Granular subbase Layer (Modulus = 12,000 psi) (83 MPa)   | 15% CBR                              | 3.00                                                       |
| (xiii) Granular subbase Layer (Modulus = 7,000 psi) (48 MPa)   | 6% CBR                               | 4.67                                                       |

Note: Strengths for pavement quality concrete are 28 days and 7 days for cement-treated bases. Elastic moduli for cement-treated bases are in-service moduli and represent a cracked condition.

Se propone utilizar un mejoramiento CBR 20% y una de base granular de CBR 100%.

La Tabla 3.12 muestra el resumen del diseño final:

**Tabla 3.12: Diseño final**

| Material     | Espesor de Material<br>[cm] | Factor de<br>Conversión | Espesor BTC $C_{8/10}$<br>equivalente [cm] |
|--------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| CBR 100%     | 92                          | 2                       | 46                                         |
| CBR 20%      | 50                          | 2,8                     | 18                                         |
| <b>Total</b> |                             |                         | <b>64</b>                                  |

La Figura muestra la estructura equivalente con bases granulares de acuerdo a exigencia de mandante, suponiendo existencia de sistema de evacuación de aguas lluvias:

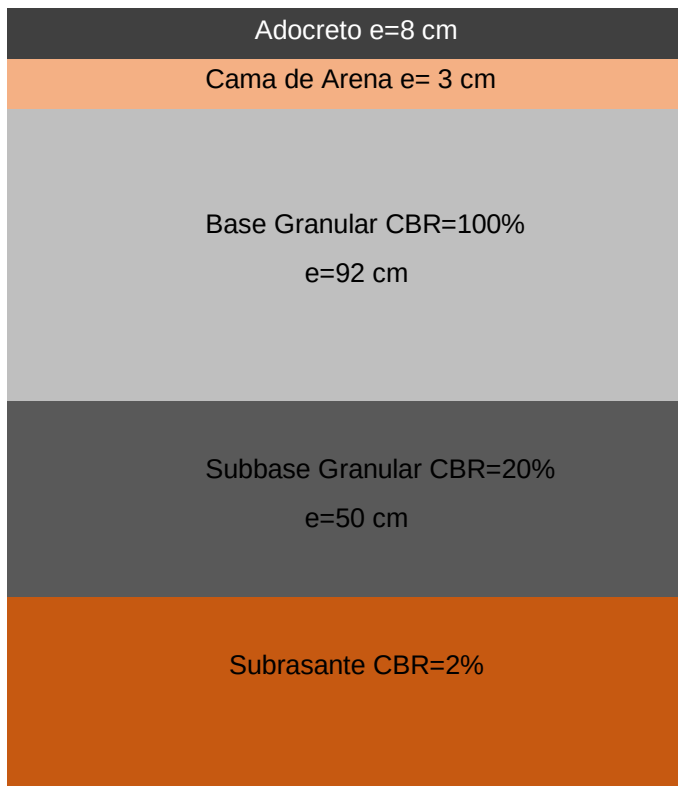


Figura 3.8: Estructura equivalente con bases granulares de acuerdo a exigencia de mandante suponiendo existencia de sistema de aguas lluvias

### 3.5.9 Estructura recomendada por este consultor

Debe tenerse presente que:

El Manual "Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers", versión 2 actualizada Mayo 2012 PhD John Knapton y editado por David R. Smith, Interlocking Concrete Pavements Institute en la página 19 establece que se debe tener cuidado con su empleo cuando las cargas exceden 11.400 kg, por lo que se recomienda emplear BTC para cargas superiores. Este manual considera factor de conversión 2.

El Manual "The structural design of heavy duty pavements for Ports and other Industries". IV edición 2007, PhD John Knapton publicado por Interpave, en sus páginas 3 a 9 define el alcance de su aplicación y es siempre sobre BTC. Si bien considera factor de conversión para base

granular de  $\text{CBR} \geq 80\%$  igual a 3 para BTC 10 Mpa, esto se aplica a estructuras que tienen una capa de BTC. No acepta el reemplazo total de BTC.

Por lo cual en opinión de esta consultora no debe emplearse reemplazo total de BTC por granular.

Por lo tanto, la estructura de pavimento de adocreto que se recomienda, con una combinación de BTC y base granular, sería la mostrada en la

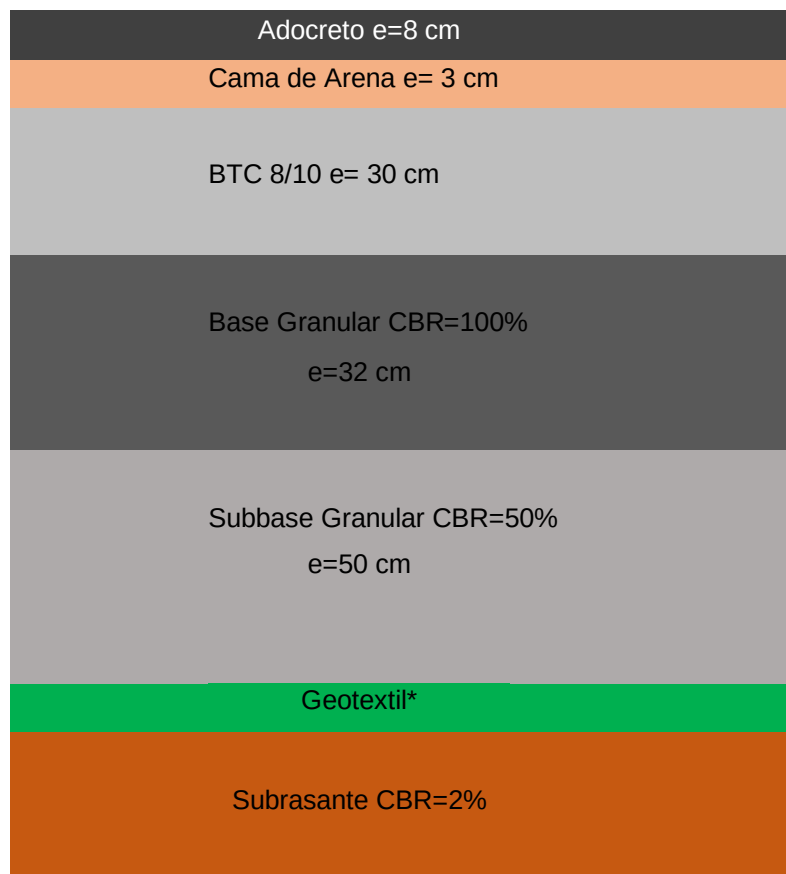
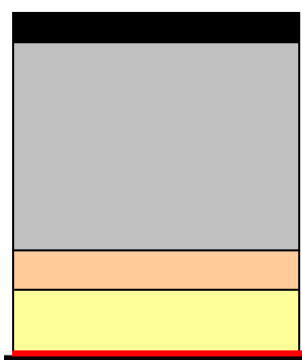


Figura 3.9: Estructura adecuada suponiendo existencia de sistema de aguas lluvias

**\*Especificación en Tabla MC 5.204.202.b "Requisito para Geotextiles para Separación de Materiales"**

#### DISEÑO DEL PAVIMENTO 4 CONTENEDORES FULL



Terreno natural CBR 2%

#### **4. CONCLUSIÓN**

El colapso de la estructura del pavimento se debe a la falta de un sistema de drenaje que reduce la resistencia de la base hasta en un 40%, sumado a una sobre carga producida por una grúa más pesada que la considerada en su diseño original (su peso es cercana al doble de la considerada en el diseño original). La contaminación de la base por finos, cuyo impacto es de menor magnitud respecto de los dos factores antes mencionados, es consecuencia de aguas lluvias no drenadas y excesos de carga que movilizan finos de la subrasante o superficie hacia la base.

Si las bases granulares se encuentran contaminadas con finos, su efecto es producido por la saturación del paquete estructural debido a no tener un diseño hidráulico para las aguas lluvias.

Si se hubiese colocado la estructura correcta mostrada en este informe, también sería insuficiente sin estar acompañada de un diseño hidráulico para las aguas lluvias.

Mediante el rediseño se demuestra que la estructura colocada es insuficiente.



## 5. REFERENCIAS

American Association of State and Highway Transportation Officials, 1993 - "Guide for Design of Pavement Structures".

AO, 2013 - "Informe de Mecánica de Suelos N° 108"

Cancino, Fernando, 1996 - "Módulo Resiliente de Materiales Granulares Utilizados en Bases de Pavimentos en Chile"- Memoria Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.

Dirección de Vialidad, 2022 - "Manual de Carreteras 2022 – Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño".

División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2008 - "Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación", División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2008.

Knapton, John - "Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers", version 2 actualizada Mayo 2012, editado por David R. Smith, Interlocking Concrete Pavements Institute

LEMCO - Universidad Técnica Federico Santa María, "INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 32429", 2015.

NCHRP 01-37A, "Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures - APPENDIX DD-1: RESILIENT MODULUS AS FUNCTION OF SOIL MOISTURE-SUMMARY OF PREDICTIVE MODELS".

Rada, C y Witczak, W.M., 1981 - "Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Materials", Transportation Research Record, 810, Transportation Research Board, Washington, D.C.



---

Tomás Echaveguren Navarro, Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, año 2013.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos, División de Desarrollo Urbano, Chile, año 1997.