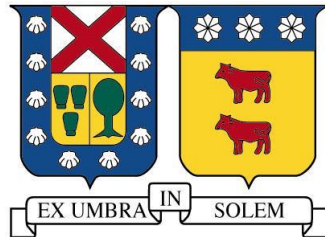


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PROTOTIPO DE PAVIMENTOS Y SUPERFICIES DRENANTES

Memoria de titulación presentada por
LORETO JACQUELINE OYARZÚN CÁRDENAS

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
DANIEL NAVARRO JARA

Octubre de 2018

REV A

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres por el sacrificio que hicieron a lo largo de estos años para verme realizada profesionalmente, sin ellos nada de esto habría sido posible. En conjunto agradezco a mi familia con la que viví prácticamente todos mis años de estudio, por su comprensión y apoyo incondicional.

A mis profesores, quienes constituyeron parte fundamental durante mi proceso de aprendizaje y formación como ingeniera.

Gracias en especial a aquellos amigos que gane en esta universidad, quienes estuvieron conmigo en los momentos de alegría y de dificultad, y que de alguna manera hicieron posible cumplir esta meta.

A los amigos de la vida por siempre estar ahí cuando los necesité.

Por último, agradezco a todas aquellas personas que conocí en Najjar Ingenieros S.A. y en Sociedad Construcciones Y Servicios Najjar Ltda por su hospitalidad y generosidad a la hora de compartir experiencia profesional, y por, sobre todo, por darme el último empujón para completar esta etapa de mi vida.

RESUMEN

La infraestructura vial es un asunto transversal al crecimiento económico y el desarrollo social de las comunidades y el mismo bienestar ciudadano del país. Si bien, en esta última década se ha producido un avance significativo en este ámbito, no ha sido capaz de cubrir las necesidades de construcción de todas aquellas vías que se consideran pertinentes en lugares donde la rentabilidad no es suficiente, o las condiciones presentes no permiten pavimentación de acuerdo a la normativa, recurriendo a la implementación de caminos básicos.

El siguiente trabajo presenta un estudio de la aplicabilidad de un mejoramiento de la performance de las condiciones de una capa granular, a través de la utilización de geocelda y materiales excedentes de la producción normal de agregados de las plantas de áridos. Lo anterior enmarcado dentro del desarrollo del proyecto I+D y ejecutado por la empresa NAJAR y la Universidad Técnica Federico Santa María, a través de su departamento de Obras Civiles.

Esta investigación persigue realizar un análisis conceptual previo de las propiedades, funcionamiento y aplicaciones de la geocelda con el fin de determinar las características más incidentes en su posterior diseño de capa de rodadura con material pétreo.

Se efectúan ensayos de campo mediante la construcción de tres pistas de pruebas; de éstas, dos con geocelda de diferentes alturas y otra sin refuerzo, por las cuales circulan camiones cargados provenientes de una planta de áridos. Se realizan mediciones de las deflexiones, y se analizan y comparan los comportamientos de las pistas. El material de relleno a utilizar es la gravilla 3/8" producida en la planta de áridos de la empresa, la cual corresponde a un material de descarte que no es comercializado.

Dentro de los resultados de esta investigación, en el ámbito económico, la nueva alternativa resultó ser considerablemente más económica que un pavimento de hormigón, y a pesar de ser una superficie menos rígida, las mejoras de las características mecánicas con respecto a una carpeta granular tradicional, a nivel de costo-beneficio la hace más atractiva.

Como conclusión se establece que la implementación de este nuevo prototipo de capa de rodadura cumple con su condición de superficie drenante, y a pesar de que se presentaron desprendimientos superficiales del material granular de relleno, 5 meses después de terminado el monitoreo, el camino se muestra en buenas condiciones. Este pavimento alternativo demostró tener un mejor desempeño que el de un camino compuesto sólo por material granular.

ABSTRACT

Road infrastructure is a cross-cutting issue for the economic growth and social development of communities, and the very well-being of the country. Although there has been significant progress in this area in the last decade, it has not been able to cover the needs to build all those roads that are considered relevant in places where profitability is not sufficient, or the current conditions do not allow paving according to regulations, resorting to the implementation of basic roads.

The following work exposes a study of the applicability of a performance improvement on the conditions of a soil layer, through the use of geocell and surplus materials of the normal aggregate production of aggregate plants. This was framed within the development of the I+D project and executed by the NAJAR company and Federico Santa María Technical University, through its civil engineering department.

This research pursues to carry out a preliminary conceptual analysis of the properties, operation and applications of the geocell, in order to determine the most transcendent characteristics in the design of the surface course with stone material.

Field experiments are performed with the construction of three test tracks; of this two of them with different heights of geocell and the other one without any reinforcement, in which loaded trucks circulate from an aggregate plant. Deflections are measured, and the behavior of the tracks is analyzed and compared. The filler material to use is the 3/8" gravel produced in the company's aggregate plant, which is non-discarded material that is not marketed.

Within the results of this research, in the economic area, the new alternative proved to be considerably cheaper than concrete pavement, and despite being a less rigid surface, the mechanical characteristics improvements, compared to a traditional granular binder, makes it more attractive at a cost-benefit level.

In conclusion, the implementation of this new surface course prototype complies with its draining surface condition, and despite the fact that surface releases filler granular material, 5 months after the completion of the monitoring, the road is shown in good condition. This alternative pavement proved to have a better performance than that composed only of granular material road.

GLOSARIO

A	Radio de carga de la huella circular
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	California Bearing Ratio
C_c	Coefficiente de Curvatura
C_u	Coefficiente de Uniformidad
DCP	Dynamic Cone Penetrometer
DMA	Differential Mechanical Analysis
DSC	Differential Scanning Calorimetry
D	Distancia entre la pared de las ruedas
d_{50}	Tamaño de partícula donde pasa el 50% del material
E_{ll}	Módulo de elasticidad material de llenado
E_{nr}	Módulo de elasticidad de capa de rodadura con refuerzo
E_r	Módulo de elasticidad de capa de rodadura sin refuerzo
E_s	Módulo de elasticidad material de soporte
E_{subr}	Módulo de elasticidad de subrasante
ESWL	Equivalent Single Wheel Load
F_d	Factor de deflexión vertical por rueda doble
F_s	Factor de deflexión vertical por rueda simple
H	Espesor de la capa
HDPE	High Density Polyethylene
IRI	International Roughness Index
L	Factor de carga
MIF	Modulus Improvement Factor

M_r	Módulo Resiliente
OIT	Oxidation Induction Time
P_d	Carga de rueda doble
P_s	Carga de rueda simple
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
S_d	Distancia entre ruedas dobles
Q	Presión de Carga
QW	Quarry Waste
w_d	Deflexión provocada por rueda doble
w_s	Deflexión provocada por rueda simple
Z	Profundidad
ν	Relación de Poisson
σ_p	Presión de neumático
σ_z	Esfuerzo Vertical a una profundidad z

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT	IV
GLOSARIO.....	V
1 INTRODUCCION	1
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO.....	3
1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO.....	4
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	5
2 ASPECTOS GENERALES DE LA GEOCELDA	6
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 PROPIEDADES DE LA GEOCELDA	8
2.2.1 Material	8
2.2.2 Forma.....	8
2.3 ANTECEDENTES DE USO DE GEOCELDA	9
2.3.1 Protección de Canales y de Riberas de ríos.....	10
2.3.2 Protección de capa vegetal en pendientes o taludes	11
2.3.3 Muros verdes o ecológicos.....	11
2.3.4 Vías férreas para confinamiento del balastro.....	11
2.3.5 Estacionamientos	12
2.3.6 Estabilización de suelos	12
2.4 MARCO TEÓRICO DE GEOCELDA EN REFUERZO VIAL	13
2.4.1 Contribución de la geocelda a la estructura.....	13
2.4.2 Comportamiento de acuerdo a material de llenado	18
2.4.3 Material de Relleno	20
3 METODOLOGÍA DE DISEÑO	21
3.1 INTRODUCCIÓN	21
3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO CON APLICACIÓN DE GEOCELDA	22
3.2.1 Elementos de Diseño	23
3.3 CARACTERÍSTICAS DE GEOCELDA.....	34
4 PISTAS DE PRUEBA.....	36
4.1 INTRODUCCIÓN	36
4.2 UBICACIÓN.....	37
4.3 PARÁMETROS DE DISEÑO.....	37
4.3.1 Caracterización de Agregados y Suelos	37
4.3.2 Definición del modelo de cargas.....	40
4.3.3 Características de Geocelda	43
4.3.4 Parámetros Geométricos.....	45
4.4 PROCESO CONSTRUCTIVO	47
4.4.1 Preparación Del Terreno	47
4.4.2 Colocación Y Anclaje.....	48
4.4.3 Traslape y Unión	49

4.4.4	Relleno.....	50
4.5	ESTUDIO DE COSTOS.....	52
5	TRABAJO DE CAMPO	55
5.1	INTRODUCCIÓN	55
5.2	SISTEMA DE MEDICIÓN.....	56
5.3	LEVANTAMIENTO TOPOGÁFICO INICIAL	58
5.4	LEVANTAMIENTO TOPOGÁFICO DESPUÉS DE 6 SEMANAS	64
5.5	MODELACIÓN DE PISTAS CON BISAR 3.0	72
6	ANÁLISIS DE MEDICIONES.....	74
6.1	INTRODUCCIÓN	74
6.2	PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE DEFLEXIONES.....	75
6.3	ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI).....	76
7	CONCLUSIONES	80
8	BIBLIOGRAFÍA	85
9	ANEXOS.....	87
9.1	ANEXO I	87
9.2	ANEXO II	92
9.3	ANEXO III	97
9.4	ANEXO IV.....	102
9.6	ANEXO V	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Valores típicos del MIF. [5]	26
Tabla 3-2 Límites de Carga por Tipo de Eje [21].....	27
Tabla 3-3 Pesos máximos permitidos en función de la configuración de ejes [20].....	28
Tabla 3-4 Valores mínimos ensayo DMA. [5]	35
Tabla 4-1 Relación de Poisson de los materiales del pavimento	38
Tabla 4-2 CBR de los materiales de la estructura del pavimento.....	38
Tabla 4-3 Módulos de los materiales del pavimento	38
Tabla 4-4 Valores de los módulos reforzados con MIF típicos [29].....	39
Tabla 4-5 Carga de Camiones	41
Tabla 4-6 Datos para cálculo de ESWL.....	42
Tabla 4-7 Cargas por eje de cada camión [29].....	42
Tabla 4-8 P_d para eje y cada camión [29].....	42
Tabla 4-9 ESWL para cada camión [29]	43
Tabla 4-10 Propiedades de los materiales de geocelda seleccionada.[7]	43
Tabla 4-11 Propiedades Físicas de geoceldas [7].....	44
Tabla 4-12 Características geométricas de geoceldas [7].....	44
Tabla 4-13 Especificación de Capa de Rodadura de Pistas de Prueba [29].....	46
Tabla 4-14 Precio unitario considerando geocelda de espesor 75 [mm] [29]	52
Tabla 4-15 Precio unitario considerando geocelda de espesor 100 [mm] [29]	53
Tabla 4-16 Precio unitario sin geocelda [29].....	53
Tabla 4-17 Precio unitario pavimento de hormigón [29].....	54
Tabla 5-1 Deflexiones de pista con geocelda de espesor 75 [mm] [29].....	69
Tabla 5-2 Deflexiones de pista con geocelda de espesor 100 [mm] [29].....	69
Tabla 5-3 Deflexiones de pista sin geocelda [29]	69
Tabla 5-4 Parámetros de servicio obtenidos de BISAR 3.0	72
Tabla 5-4 Resumen de mediciones [29]	75
Tabla 5-5 Mediciones de ejes transversales [29]	75
Tabla 5-6 Mediciones de ejes longitudinales [29]	76
Tabla 5-7 Pendientes de recta teórica continua perfecta (IRI=0)	77
Tabla 5-8 Diferencia cotas entre perfil teórico y perfil real en [m] e IRI para semana 0	78
Tabla 5-9 Diferencia cotas entre perfil teórico y perfil real en [m] e IRI para semana 6	78
Tabla 5-10 IRI inicial y final para perfiles longitudinales 1, 2 y 3	78
Tabla 9-1 Características de los bases ensayadas [3]	87
Tabla 9-2 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 1 Geocelda de 75[mm]	92
Tabla 9-3 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 1 Geocelda de 100[mm]	92
Tabla 9-4 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 2 Geocelda de 75[mm]	93
Tabla 9-5 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 2 Geocelda de 100[mm]	94
Tabla 9-6 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 3 Geocelda de 75[mm]	95
Tabla 9-7 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 3 Geocelda de 100[mm]	96
Tabla 9-8 Especificaciones de Modelo de Estación Total [23]	102
Tabla 9-9 Banda Granulometrica de la Sub-Base	106
Tabla 9-10 Propiedades de geocelda seleccionada	108

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Configuraciones de elementos reforzados con geoceldas. [2]	9
Figura 2-2 Geocelda utilizada para protección de Canales y de Riberas de ríos. [9]	10
Figura 2-3 Geocelda utilizada en camino de arena. [9]	13
Figura 2-4 Esquema de funcionamiento de geoceldas. Meyer & Emersleben (2005). [13]	15
Figura 2-5 Cohesión aparente. Meyer & Emersleben (2005). [13]	15
Figura 2-6 Efecto de la geocelda en el pavimento sin y con geocelda. [6]	16
Figura 2-7 Geocelda utilizada como refuerzo para base en un camino. [5]	17
Figura 2-8 Esquema de esfuerzos y deformaciones para estructura con y sin refuerzo. [5]	17
Figura 2-9 Ilustración del comportamiento de materiales granulares bajo carga con y sin geocelda. [6]	18
Figura 2-10 Geocelda con distintos materiales de relleno.....	19
Figura 3-1 Esfuerzos y deformaciones para la estructura con y sin refuerzos. [5].....	25
Figura 3-2 Distribución del confinamiento en la zona reforzada. [5]	26
Figura 3-3 Modelo de Criterio de igual esfuerzo vertical [25]	29
Figura 3-4 Comportamiento d ESWL en función de la profundidad [26]	30
Figura 3-5 Localización del esfuerzo vertical o deflexión máxima en la subrasante [26].....	31
Figura 3-6 Gráfico para determinar la carga de una rueda simple [26].....	32
Figura 4-1 Ubicación de pistas de prueba.	37
Figura 4-2 Ábacos de módulos modificados de acuerdo con el MIF [29].....	39
Figura 4-3 Tipos de ejes [20]	40
Figura 4-4 Dimensiones de camiones	41
Figura 4-5 Modelización de la carga [22].....	42
Figura 4-6 Tamaño de celda de geocelda seleccionada [7]	45
Figura 4-7 Tamaño de panel de geocelda seleccionada [7].....	45
Figura 4-8 Estructura de las pistas [29]	46
Figura 4-9 Remoción de escombros [29].....	47
Figura 4-10 Colocación de Subbase [29].....	47
Figura 4-11 Proceso de extensión de la Geocelda de Pistas de Prueba [29]	48
Figura 4-12 Geocelda Extendida Pistas de Prueba [29].....	49
Figura 4-13 Unión de Geoceldas [29]	49
Figura 4-14 Compresor de Aire [29]	50
Figura 4-15 Generador Portátil [29]	50
Figura 4-16 Llenado de Geocelda con gravilla mediante pala mecánica en Pistas de Prueba [29]	51
Figura 4-17 Geocelda en proceso de llenado [29].....	51
Figura 5-1 Medida de Perfil.....	56
Figura 5-2 Modelo de Estación Total Nikon Nivo 5c [29].....	57
Figura 5-3 Prisma de Estación Total [29].....	57
Figura 5-4 Pista de Prueba Construida con Geocelda de Espesor 100 [mm] [29].....	58
Figura 5-5 Pista de Prueba Construida con Geocelda de Espesor 75 [mm] [29].....	58
Figura 5-6 Pista de Prueba Construida sin Geocelda [29]	59
Figura 5-7 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 75 [mm] inicial [29]	60
Figura 5-8 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 100 [mm] inicial [29]	61
Figura 5-9 Perfiles transversales de pista sin geocelda inicial [29]	62
Figura 5-10 Pista con geocelda de espesor 75[mm] después de una semana de tránsito [29]..	63
Figura 5-11 Pista con geocelda de espesor 100[mm] después de una semana de tránsito [29]	63
Figura 5-12 Pista de prueba sin refuerzo de geocelda [29].....	64
Figura 5-13 Pista con geocelda de 100[mm] después de 6 semanas de tránsito [29].....	64
Figura 5-14 Pista con geocelda de 75 [mm] después de 6 semanas de tránsito [29].....	65
Figura 5-15 Geocelda deformada [29]	65
Figura 5-16 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 75 [mm] semana 6 [29] ..	66
Figura 5-17 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 100 [mm] semana 6 [29]	67
Figura 5-18 Perfiles transversales de pista sin geocelda semana 6 [29]	68
Figura 5-19 Distribución de deflexiones en pista con geocelda de espesor 75 [mm] [29]	70

Figura 5-20 Distribución de deflexiones en pista con geocelda de espesor 100 [mm] [29]	71
Figura 5-21 Distribución de deflexiones en pista sin geocelda [29]	71
Figura 9-1 Curva esfuerzo-deformación de la geocelda utilizada. [3]	88
Figura 9-2 Curva de compactación y valores de CBR para la subrasante. [3].....	88
Figura 9-3 Distribución del tamaño de partículas de AB3 y QW. [3]	88
Figura 9-4 Curva de compactación y valores de CBR de AB3 y QW. [3].....	89
Figura 9-5 Curva de compactación y valores de CBR de RAP. [3]	89
Figura 9-6 CBR para el test de DCP (Penetrómetro de cono dinámico). [3].....	90
Figura 9-7 Profundidad por rodada versus número de pasadas. [3]	90
Figura 9-8 Deformación vertical versus el número de pasadas. [3]	91

1 INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

En la actualidad el desarrollo de las obras de infraestructura son una de las necesidades más importante para la sociedad. Dentro de estas se destacan obras tales como escuelas, hospitales, aeropuertos, carreteras, entre otros.

El transporte y la red de caminos es sin duda uno de los factores indispensables para el desarrollo económico y social del país, es por ello que los gobiernos siempre han comprometido considerables recursos para desarrollo y mantención. Sin embargo, de acuerdo a la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) aproximadamente el 20% de los pavimentos fallan debido a la insuficiencia en la resistencia estructural [27]. Otros factores involucrados en su deterioro son el tránsito y el clima al cual se encuentran sometidos, lo cual está ligado directamente con la zona o ubicación geográfica en donde se desarrolle el proyecto.

De lo anterior se hace necesario trabajar en el desarrollo de nuevas alternativas que pretendan mejorar las condiciones de los caminos en nuestro país, y que al mismo tiempo procuren cumplir con los requisitos económicos y los tiempos de ejecución mínimos para cubrir las necesidades de la población con eficiencia. Un caso en particular es el de la Provincia de Chiloé ubicada en la Décima Región de Los Lagos, la cual se caracteriza por su clima lluviosa durante todo el año, además de la dificultad geográfica que presenta para el desarrollo de proyectos viales al tratarse de una isla.

De acuerdo a antecedentes de la Dirección Nacional de Vialidad perteneciente al Ministerio de obras Públicas [1], hasta el año 2014, la Décima Región debía mantener aproximadamente 7439 kilómetros de caminos en el país (el 9,56% del total de caminos del país), de los cuales el 23% correspondían a vías pavimentadas, el 6% a soluciones de caminos básicos y por último, el 71% a caminos no pavimentados, y en el Plan Chiloé durante el 2015 se consolidó la construcción de 267 kilómetros de caminos, de los cuales 150 corresponden a caminos básicos. El problema con la construcción de caminos pavimentados en la provincia se debe fundamentalmente al alto costo del material que esto conlleva, es por ello que la implementación de caminos básicos refleja la solución más viable y económica. El concepto fundamental de los Caminos Básicos es el de conservar aquellos caminos rurales de menor tránsito que deben atenderse a través de obras de ripiaduras, reperfilados, recibos de material

granular y/o conservación rutinaria, las cuales se entienden como acciones que se ejecutan frecuentemente y no afectan directamente el comportamiento de la carpeta de rodadura, como la limpieza de faja y aquellas que intervienen los sistemas de saneamiento y drenaje, y de seguridad vial, realizadas sobre el mismo trazado y características actuales, y aplicar sobre la superficie de rodadura alguna solución sin mejorar la geometría, de tal manera de disminuir ostensiblemente o eliminar la emisión de polvo al paso de los vehículos. Se utilizan dos tipos de soluciones, las cuales son la aplicación de un estabilizador – supresor de polvo a la carpeta o colocación de una capa delgada de asfalto. Las obras de conservación de Caminos Básicos tienen como ventaja sobre un cambio de estándar a un camino, que éste no necesita de una evaluación del MIDEPLAN, por los que tiempos del proyecto se reducen considerablemente.

Este trabajo plantea evaluar la aplicación de una nueva alternativa, la cual permita mejorar el desempeño en Caminos Básicos o menores a través de la utilización de geoceldas y material excedente de plantas de áridos.

Desde 1970 la estabilización con geosintéticos (recursos sostenibles) ha sido una técnica utilizada para mejorar el comportamiento de vías pavimentadas y no pavimentadas [28] . Uno de estos geosintéticos son las geoceldas, las cuales son usadas comúnmente como protección y estabilizador. A menudo se utilizan para ayudar a mejorar el rendimiento de los materiales de construcción estándar y tratamientos de control de erosión. La propuesta consiste en el uso de geoceldas como elemento confinador de materiales granulares con granulometría abierta, que reduce el escurrimiento de las aguas pluviales y forma un depósito de retención de agua. La característica de camino drenante resulta una gran ventaja debido a la zona de estudio, ya que la zona de la Provincia de Chiloé se en una zona que posee una calidad de suelos regular a mala y condiciones climáticas regulares a adversas debido a las altas tasas de precipitación y periodos de heladas o escarcha.

A continuación, se presentan los objetivos, alcances y metodologías para el desarrollo del presente estudio.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Este estudio tiene por objetivo general diseñar y construir un prototipo de pavimento granular alternativo de bajo costo, mediante la utilización de geocelda y material pétreo de descarte de las plantas de áridos en Chile. De lo anterior se definen los objetivos específicos:

- (1) *Estudiar diferentes aplicaciones de geocelda en la actualidad utilizadas en Chile y en el extranjero.*
- (2) *Realizar análisis conceptual de las propiedades y funcionamiento de la geocelda con el fin de determinar características más incidentes en su utilización en conjunto con material granular.*
- (3) *Diseñar alternativas de pavimento granular con geoceldas.*
- (4) *Realizar ensayos de campo de pistas con y sin geocelda para análisis y comparación del comportamiento y desempeño de la geocelda con gravilla bajo cargas.*

1.3 ALCANCES DEL ESTUDIO

Los alcances de este trabajo en relación a los objetivos definidos son:

- *Estudio de normativas y recomendaciones nacionales e internacionales en la utilización de geoceldas en aplicaciones viales.*
- *Estructura:* Se limita al estudio de un árido, el cual corresponde a la gravilla TM 10.
- *Ubicación Geográfica:* República de Chile.
- *Tipo de Vías:* Secundarias o privadas.
- *Tránsito:* Liviano y pesado.

1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO

Para el desarrollo de la presente memoria, se ha definido la siguiente metodología:

- *Estudio bibliográfico:* Revisión sistemática de la información existente sobre el tema.
- *Recopilación de antecedentes:* A partir de las memorias de título existentes, publicaciones nacionales e internacionales, y estudios económicos relacionados al tema.
- *Recopilación de datos:* A partir de ensayos de campo a partir de una pista de prueba.
- *Análisis de antecedentes:* Se analizará la información recolectada y se seleccionarán las de mayor utilidad.
- *Cotización de geoceldas:* Se cotizarán los distintos tipos de geoceldas dentro del mercado nacional.
- *Estudio del modelo propuesto:* Análisis conceptual y teórico de la metodología propuesta.
- *Propuesta pista de prueba:* Definición de materiales, dimensiones, parámetros, ubicación.
- *Evaluación de los resultados:* Verificación de los resultados obtenidos, producto de la aplicación de la tecnología.
- *Evaluación económica de los resultados:* Verificación y análisis de los resultados obtenidos por el estudio, como los costos asociados al proyecto y beneficios del mismo.
- *Conclusiones y comentarios del estudio.*

1.5

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Este trabajo se encuentra estructurado en 8 capítulos, a saber:

- *Capítulo 1: Introducción.*
- *Capítulo 2: Aspectos Generales sobre la Geocelda.* Se describen propiedades, tipos de geocelda, aplicaciones y marco teórico de geoceldas en refuerzo vial.
- *Capítulo 3: Metodología de diseño para Pavimento de Bajo Costo.* En este capítulo se presenta el método de diseño y los criterios para la estructuración de una nueva alternativa que utiliza geocelda en conjunto con material pétreo, que puede actuar como capa de rodadura de bajo costo o como refuerzo de la base de un pavimento.
- *Capítulo 4: Pista de Prueba.* Se describen aspectos de las pistas de prueba, tales como ubicación y la construcción de una matriz de tres diferentes pistas de pruebas, ensaye de los materiales, seguimiento, obtención de parámetros de interés y análisis de resultados. Además, se presenta la información obtenida de las pruebas de campo. Se procede al análisis de los nuevos datos junto a un estudio de costos para el desarrollo de una propuesta de especificación técnica para la implementación de la geocelda en un pavimento de bajo costo.
- *Capítulo 5: Conclusiones.* Se presentan y desarrollan las conclusiones y comentarios de esta memoria.
- *Capítulo 6: Bibliografía*
- *Capítulo 7: Anexos.*

2 ASPECTOS GENERALES DE LA GEOCELDA

2.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los factores fundamentales para el desarrollo de vías es el suelo de fundación sobre la cual se construya. Sin embargo, no siempre el suelo por donde se deben construir los caminos es apto para su desarrollo, en consecuencia, se ha debido trabajar con suelos considerados inadecuados para su uso. Las alternativas que se utilizan en esta situación, generalmente, es reemplazar aquel suelo débil con otro suelo más resistente o mejorar las propiedades del suelo débil mediante diferentes técnicas de mejoramiento. Dentro de las técnicas de mejoramiento se incluyen la estabilización o refuerzo del suelo, las cuales son utilizadas para incrementar la capacidad de soporte. El reforzamiento del suelo tiene como ventajas la facilidad en la construcción, economía global y disminución en los tiempos de construcción. En las últimas décadas, los geosintéticos han sido adoptados por los ingenieros del mundo como una técnica de refuerzo del suelo debido a su fácil construcción y la eficiencia de costes. Los geosintéticos son materiales hechos de varios tipos de polímeros y son utilizados en la construcción generalmente como elementos de separación, refuerzo, filtración, drenaje o barrera de líquidos. Dentro de los geosintético se destaca la geocelda, un elemento de carácter tridimensional que posee celdas en forma de panal de abejas creado por la soldadura de láminas termoplásticas de alta intensidad, lo que permite el confinamiento lateral de los materiales de relleno, además de aumentar la resistencia. Una geocelda confina las partículas de un suelo entre los bolsillos los cuales previenen el esparcimiento lateral del suelo lo que permite que la capa de suelo se comporte como un colchón rígido y por lo tanto las cargas son distribuidas sobre un área más extensa. En complemento las geoceldas son fáciles de trabajar, ya que pueden ser plegadas para propósitos de transporte y ser instaladas en obra.

Dentro de las principales aplicaciones de las geoceldas son reforzar estratos de suelo blando, estabilización de pendientes y embancamientos, destacando su aplicación en el mejoramiento de fundación de terraplenes para vías en desarrollo. En el presente capítulo se describe las propiedades de las geoceldas, antecedentes de de su uso y el marco teórico de su funcionamiento como refuerzo vial.

El presente capítulo se divide en:

- Introducción
- Propiedades de la Geocelda.
- Antecedentes de Uso de la Geocelda.
- Marco Teórico de Geoceldas en Refuerzo Vial.

2.2 PROPIEDADES DE LA GEOCELDA

2.2.1 Material

La geocelda es un sistema de confinamiento formado por láminas de polietileno de alta densidad (HDPE), de densidad de $0.95 \text{ [gr/cm]} \pm 1,5\%$ de capas múltiples, con aditivos exclusivos que otorgan un nivel de resistencia y durabilidad únicas, cuyas paredes tienen un acabado texturizado y/o perforado. El material es inerte y no contamina el medio ambiente. Estas láminas están soldadas por extrusión en algunos puntos para formar celdas individuales se adapta a las variaciones de la superficie debido a su flexibilidad a la vez que posee una alta resistencia a la tensión y pelado, aportando alta resistencia estructural y una gran capacidad portante de cargas dinámicas, mucho más que el simple suelo compactado.

2.2.2 Forma

Las geoceldas son un material con estructura tridimensional en forma de panal la cual se adapta a la forma del lugar en el que se va a instalar. Las láminas del sistema de confinamiento de la geocelda pueden ser unidas por procesos de ultrasonido o termofusión, obteniéndose una estructura de cavidades o tipo colmena muy resistente que confina y retiene cualquier material con que se rellene (tierra, grava, arena, hormigón, entre otros). El tipo de geocelda de relleno así como el anclaje o unión dependerá de las necesidades técnicas de la obra en forma de paneles.

Las celdas son perforadas y la superficie es indentada, lo que incrementa el ángulo de fricción entre el relleno con agregado y la pared de la celda, logrando una mayor trabazón entre los agregados y una mejor distribución general de la carga. Las perforaciones facilitan el drenaje lateral a través de las celdas del exceso del agua superficial y sub-superficial, reduciendo así los efectos negativos del tránsito sobre suelos saturados.

Las geoceldas existen de distintas formas y tamaños. En la Figura 2-1 se muestra los diferentes tipos de configuraciones de la geocelda

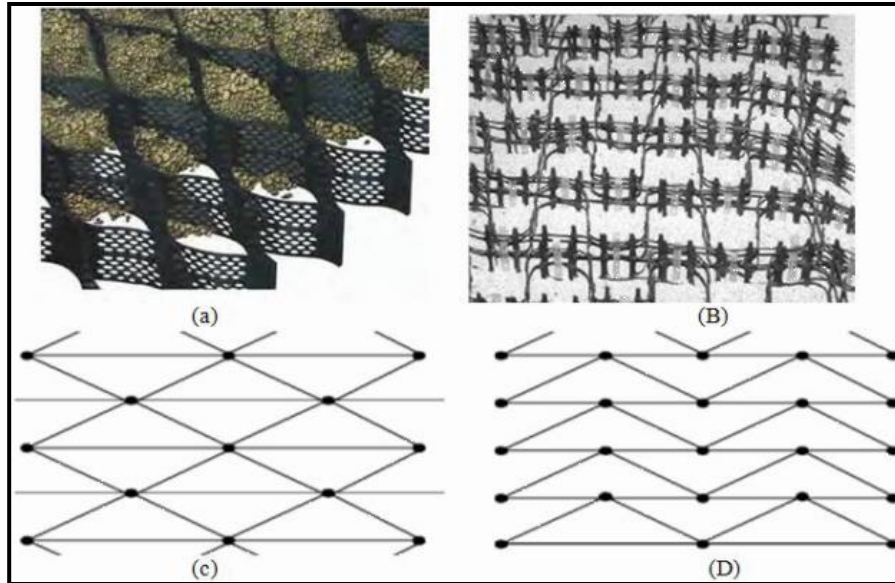


Figura 2-1 Configuraciones de elementos reforzados con geoceldas. [2]

- a) Geocelda perforada (Bathurst and Jarret, 1998)
- b) Geocelda hecha a mano (Dash et al., 2003)
- c) Geocelda con patrón diamante (Dash et al., 2003)
- d) Geocelda con patrón cheurón (Dash et al., 2003)

Las geoceldas varían en la altura y áreas de las celdas, así como el tamaño de las planchas. La altura varía comúnmente desde 75 a 300 [mm], mientras que las áreas de las celdas y el tamaño de las planchas depende esencialmente del proveedor. Entre las áreas de las celdas más comunes se encuentran la Standard 9.6"x8", Mid 13.7"x12" y Large 19.2"x16".

2.3 ANTECEDENTES DE USO DE GEOCELDA

Las geoceldas han sido ampliamente utilizadas en distintos ámbitos de la ingeniería, teniendo como objetivo fundamental la mejora del suelo donde se va a construir, es por ello que se han aplicado en diferentes obras tales como autopistas, vías férreas, carreteras y caminos, áreas verdes, zonas de parqueo, caminos de acceso, conducción de tuberías en suelos muy blandos, control de erosión, estabilidad de taludes, entre otros.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de lo mencionado anteriormente:

2.3.1 Protección de Canales y de Riberas de ríos

El sistema de confinamiento celular de la geocelda permite disminuir los efectos de las fuerzas erosivas en el fondo y taludes laterales de los canales, provocadas por los flujos intermitentes y continuos producidos dentro de ellos, ya que mejora significativamente el desempeño hidráulico de los materiales de protección convencionales tales como agregados, enrocados y revegetación, confinándolos dentro de una estructura celular. La geocelda tiene como ventaja el uso de diversos materiales de relleno, incluyendo el suelo con material vegetal, agregados, concreto o una combinación de estos, para aplicaciones únicas y estéticas. En la Figura 2-2 se observa un ejemplo de la geocelda utilizada en la protección de Canales y de Riberas de ríos.



Figura 2-2 Geocelda utilizada para protección de Canales y de Riberas de ríos. [9]

Otra ventaja de la utilización de geoceldas es que permite realizar diseños compatibles con requerimientos tanto de tipo técnicos, como ambientales, ecológicos y estéticos locales. El diseño de los recubrimientos con geoceldas requiere una definición exacta de las condiciones máximas de flujo previstas y los esfuerzos asociados a los que está sometido el sistema de protección. La rugosidad superficial y la eficiencia hidráulica del sistema de revestimiento pueden variarse para controlar el flujo y otras propiedades. Además, la perforación de las celdas permite un eficiente comportamiento hidráulico, evitando que se sature el material de relleno.

Dentro de las principales aplicaciones se destacan el recubrimiento de canales de drenaje, protección de bordes costeros y riveras, y en estanques, lagos artificiales, balsas para mejorar el aspecto e integrarlos en el medio natural, entre otros.

2.3.2 Protección de capa vegetal en pendientes o taludes

La geocelda mejora el desempeño de pendientes revegetados reforzando su sistema de raíces y dirige los flujos de aguas superficialmente sobre las celdas, con las celdas actuando como un juego de damas, previniendo la erosión y la formación de arietes y barrancos. Las geoceldas, proporcionan una protección efectiva de los taludes y un confinamiento estructural para materiales granulares tales como arena, grava y piedras o rocas de mayor tamaño en pendientes, controlando la migración de material de relleno que de otra manera se causarían por fuerzas desestabilizadoras como las hidráulicas y gravitacionales. Esto se cumple por la disipación de la energía hidráulica interna y bajo las celdas, y por la capacidad de confinamiento del material de relleno dentro de estas. Cuando las geoceldas son rellenas con concreto, el sistema se transforma en una losa de protección flexible con juntas de expansión incorporadas. Responde a una amplia gama de requerimientos estructurales e hidráulicos como sistemas formados por una capa o multi-capas. Aporta una estabilidad adicional con el uso de tendones sobre taludes cuando una geomembrana o una superficie dura de suelo o roca impiden el anclaje con estacas.

El terreno confinado dentro de la geocelda mantiene las condiciones de humedad y facilita un rápido crecimiento vegetal.

2.3.3 Muros verdes o ecológicos

El empleo de multi-capas con geoceldas permite configurar muros de gravedad (sólo geoceldas) o retención, (incluyendo geoetxiles o geomallas de refuerzo). La técnica de construcción es muy simple y rápida, y su flexibilidad permite la ejecución de muros con el perfil deseado, adaptándose fácilmente al terreno. Se suministran paneles con las medidas necesarias y con la cara vista de color marrón o verde, para que se integren mejor en el medio natural. La cobertura vegetal del muro es rápida, completa y más efectiva que con otros sistemas mejor conocidos.

2.3.4 Vías férreas para confinamiento del balastro

Las geoceldas aumentan la resistencia de balastos y sub-balastos ferroviarios, por medio de una estabilización mecánica con geomallas, con el objetivo de reducir deformaciones, aumentar resistencia y aumentar vida útil. Reduce también los espesores de la capa de sub-balasto y balasto, reduciendo material y tiempo de ejecución.

2.3.5 Estacionamientos

El sistema de confinamiento de la geocelda reduce la superficie impermeable de su sitio, y reduce la escorrentía de aguas pluviales con un sistema de pavimento poroso agregado estabilizado que soporta la carga de tráfico. La geocelda actúa como un sistema de retención de aguas pluviales en el sitio natural. La geocelda mantiene un material de gradación abierta en su lugar a través de un patrón de un marco estructural diseñado específicamente para mantener estable relleno agregada bajo carga.

2.3.6 Estabilización de suelos

La utilización de geocelda en estabilización de suelos permite el incremento del comportamiento estructural y la durabilidad de materiales como hormigón, grava, arena, tierra vegetal, entre otros, al ser confinados dentro de las celdas. Dado que es un sistema relleno con suelo o agregados compactados, las geoceldas no sobrecargan los suelos de la base, permitiendo dar solución a las dificultades de la obra cuando los suelos de subrasante son compresibles o cuando la construcción se encuentra en un lugar de difícil acceso. Lo anterior se debe a que la geocelda actúa como refuerzo en la estructura de pavimentos distribuyendo la carga de modo controlado sobre un área mayor en suelos blandos o de baja capacidad portante, y reduce la deflexión vertical, así como la presión de contacto en la subrasante. Además, este geosintético posee la capacidad de controlar el efecto cortante y el movimiento lateral del material de relleno grueso y permeable. En consecuencia, se obtiene como ventaja adicional la reducción de espesores necesarios en las capas de un terraplén con el consiguiente ahorro en material y tiempo.

Complementariamente, la implementación de la geocelda se aplica para solucionar los problemas de drenaje de subrasante, ya que rellena con una granulometría abierta se reduce el escurrimiento de las aguas pluviales y forma un depósito de retención de agua. En la Figura 2-3 se expone la utilización de la geocelda en estabilización de caminos.



Figura 2-3 Geocelda utilizada en camino de arena. [9]

Esta memoria enmarca su desarrollo exclusivamente en el último punto referente a la estabilización de suelos.

2.4 MARCO TEÓRICO DE GEOCELDAS EN REFUERZO VIAL

2.4.1 Contribución de la geocelda a la estructura

El mejoramiento de la estructura del pavimento está referido a la implementación de soluciones ingenieriles diferentes a las convencionales. El objetivo es incrementar la funcionalidad de la superficie existente, al igual que las actividades usadas para adecuar previamente la capacidad estructural del pavimento. (Sosa et al, 2010) [13].

Según Sosa et al (2010), existen diferentes tipos de mejoramiento:

- Mejoramiento de tipo Funcional. No contribuye al mejoramiento de la capacidad estructural de la vía, y
- Mejoramiento de tipo Estructural. Tiene como objeto aumentar la capacidad de soportar cargas de tránsito, para aumentar la capacidad de la vía.

El mejoramiento de tipo estructural se clasifica en [13]:

- **Tecnologías Universales:** Son aquellas que han sido aprobadas y normalizadas a nivel mundial, dentro de las cuales se destacan la estabilización con cal, con cemento, con emulsión asfáltica, adición de capa estructural, adición de capa estructural de material

granular, concretos asfálticos, concretos de cemento portland y adoquines de concreto o de arcilla cocida, entre otras.

- **Tecnologías Experimentales:** Son tecnologías que no han sido aplicadas de forma extensa y la documentación sobre su desempeño y aplicación es limitada. Dentro de estas tecnologías se destacan: estabilización química con aditivos, asfaltos naturales, empleo de residuos sólidos o de residuos industriales, refuerzo de hormigón no tradicional, entre otras.
- **Tecnologías Innovadoras:** Son tecnologías fundamentadas en estudios técnicos y experiencias exitosas. El desempeño de estas tecnologías a largo plazo aún está en proceso de evaluación. En algunos países existen normativas plenamente establecidas de estas tecnologías; sin embargo, la implementación de tecnologías de dicha normativa no es generalizada. Algunas tecnologías son: estabilización con asfalto espumado, con sales/cloruros, con cenizas, utilización de escorias de procesos industriales, material de reciclaje de pavimentos y refuerzo con geomallas o geotextiles, geoceldas.

Las geoceldas que se clasifican como tecnologías innovadoras, son utilizadas para reforzar capas estructurales.

Según Meyer & Emersleben, (2005) [13], el principal efecto que tiene un sistema de geoceldas, consiste en que éstas retienen horizontalmente el suelo encerrado en su interior, por lo tanto, limitan la deformación lateral bajo presión, para que el comportamiento del suelo mejore ante las fuerzas de deformación. Cuando el suelo estabilizado con un sistema de geoceldas es sometido a fuerzas o presiones, la dilatación lateral del material de relleno es restringida por las fuerzas del anillo de tracción de la geocelda y por la resistencia pasiva de las celdas adyacentes. Todo este sistema de funcionamiento de un sistema de geoceldas se muestra en la Figura 2-4.

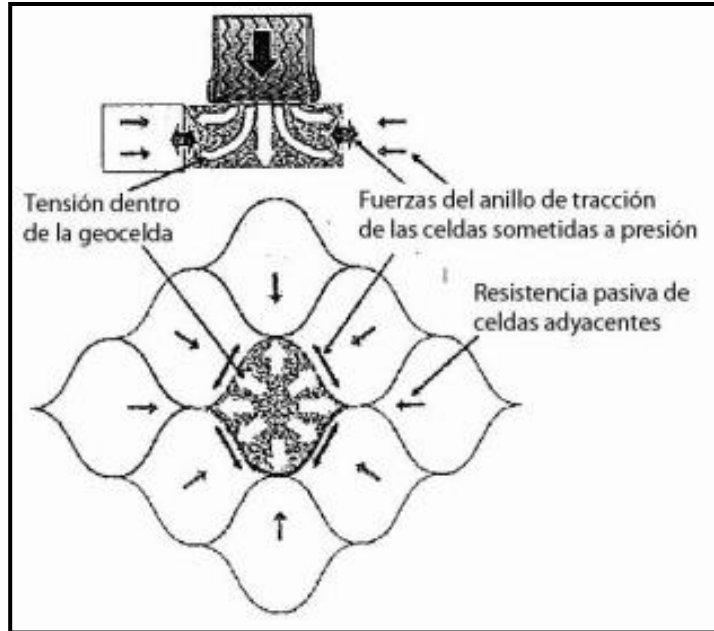


Figura 2-4 Esquema de funcionamiento de geoceldas. Meyer & Emersleben (2005).

[13]

La aplicación de la carga activa y las fuerzas del anillo de tracción en las paredes de la geocelda, generan una estabilidad adicional al relleno. Según Rajagopal et al (1999) y Bathurst et al, (1993) [13], esto puede ser considerado como cohesión aparente. Ver Figura 2-5.

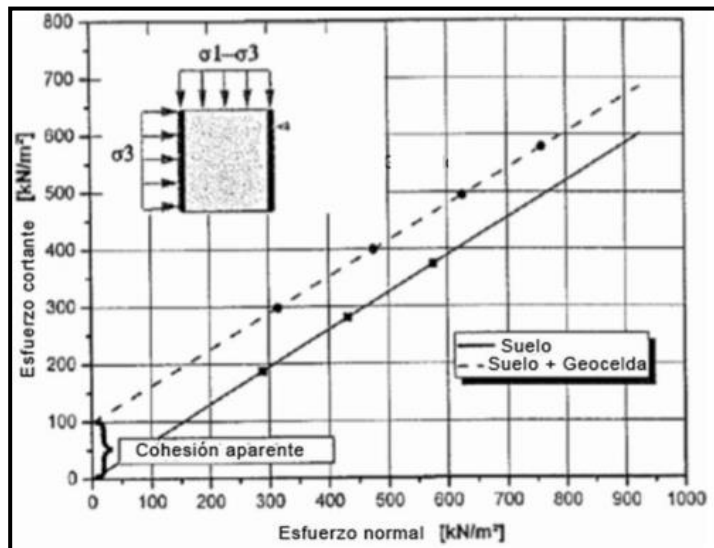


Figura 2-5 Cohesión aparente. Meyer & Emersleben (2005). [13]

El sistema de conexión de las geoceldas y el relleno presentan mayor rigidez, comparado con un sistema de suelo sin refuerzo, esto se da gracias a la cohesión aparente. Esta cohesión aparente depende del módulo de tracción del geosintético utilizado para formar la geocelda.

En caminos de bajo volumen de tránsito, la resistencia estructural de la base de soporte y el esfuerzo transmitido a la subrasante son los factores vitales para su diseño, y son los que busca mejorar la geocelda. Como ya se estableció, el mecanismo de funcionamiento de la geocelda consiste principalmente en el confinamiento del material granular entre bolsillos, los cuales previenen el esparcimiento lateral del suelo, lo que genera un efecto de viga semi-rígida, que redistribuye la carga en un área más extensa (ver Figura 2-7), traduciéndose en un incremento de la capacidad portante, una reducción del esfuerzo en la subrasante y una disminución en la tasa de asentamientos totales y diferenciales (ver Figura 2-6 y Figura 2-8).

La capacidad portante es la capacidad que posee un terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él. Técnicamente, es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzca una falla por esfuerzo de corte del suelo o un asentamiento diferencial excesivo. La fuerza de un suelo es una función de las características tales como su ángulo de fricción interna, su cohesión, y su grado de compactación.

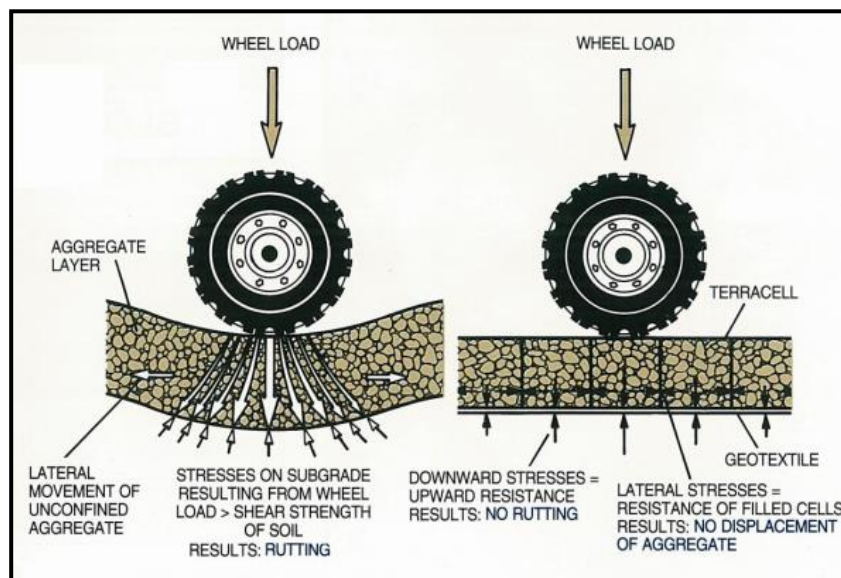


Figura 2-6 Efecto de la geocelda en el pavimento sin y con geocelda. [6]

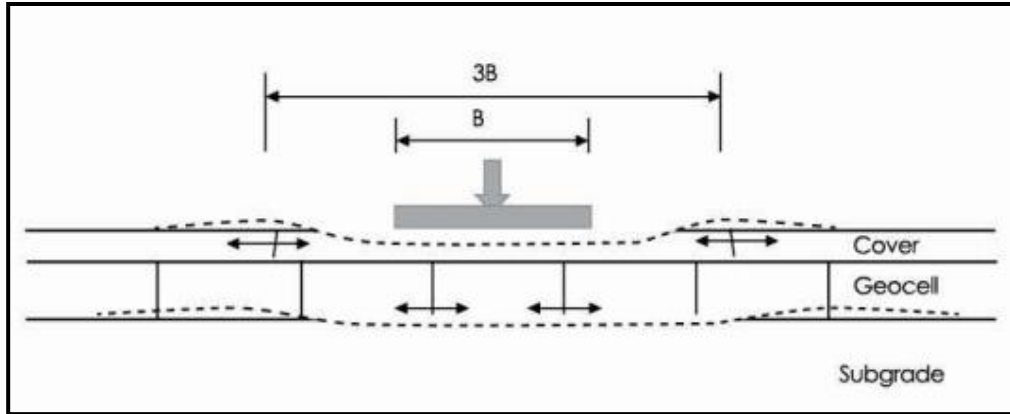


Figura 2-7 Geocelda utilizada como refuerzo para base en un camino. [5]

En la Figura 2-8, se puede observar el comportamiento de una estructura con y sin refuerzo con geocelda. La estructura que no presenta refuerzo, se ve sometida a una concentración de esfuerzos justo bajo la carga de la rueda, transmitiendo un esfuerzo puntual que puede generar una superficie de falla local y produzca una ruptura de material con mayor facilidad. Por el contrario, en el caso de la estructura con refuerzo de geocelda la distribución de esfuerzos se produce en un área que varía entre un 1.5-2.0 veces el área del caso anterior, facultando a la aplicación de una carga mayor antes de que se genere una falla en la fundación. En el caso de los asentamientos, el esperado puede llegar a ser 0.2 ó 0.3 veces el asentamiento inmediato esperado en el caso de una estructura granular no reforzada.

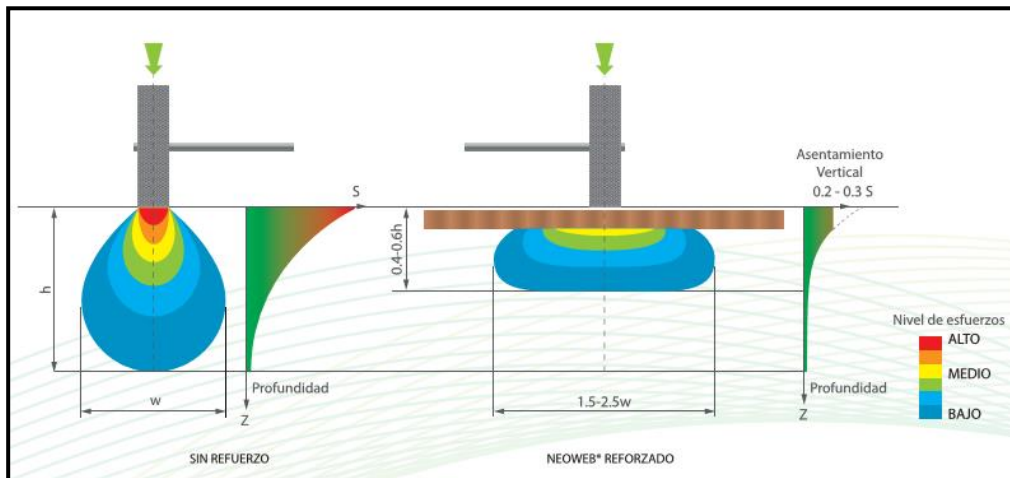


Figura 2-8 Esquema de esfuerzos y deformaciones para estructura con y sin refuerzo.

[5]

Al instalar los paneles de geoceldas y rellenarlos con material granular de manera compactada (incluso de baja especificación, ver Figura 2-9), se crea una capa estructural en base de geocelda es una serie de celdas interconectadas que permite una mejor distribución de esfuerzos y el tráfico inmediato de vehículos más pesados. De esta manera la utilización del refuerzo con geocelda incrementa las propiedades de resistencia y la rigidez del suelo blando.

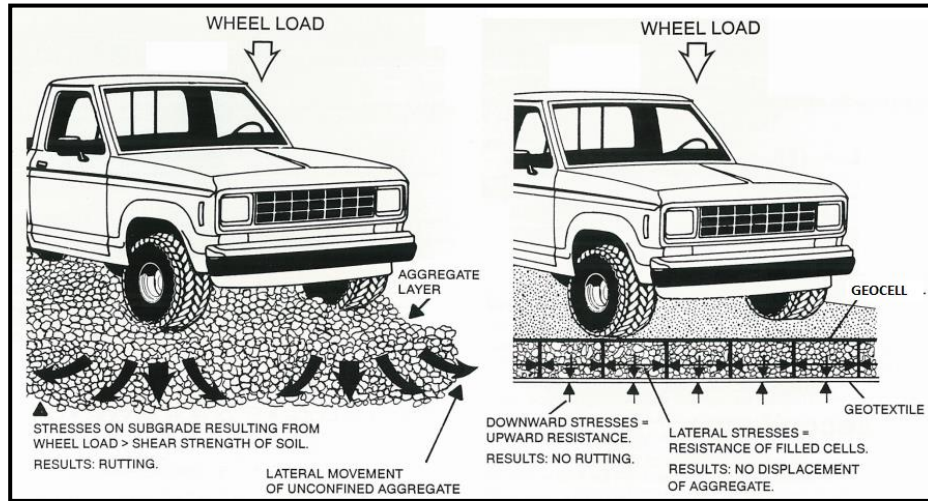


Figura 2-9 Ilustración del comportamiento de materiales granulares bajo carga con y sin geocelda. [6]

El incremento en la rigidez y el módulo del material, el aumento de la capacidad portante, la disminución de los asentamientos, la redistribución de esfuerzos, su sistema de control de erosión superficial, con paredes celulares que son permeables al agua, aire y nutrientes, y la estabilidad dimensional, lo que hacen es incrementar la vida útil de la estructura. El sistema de confinamiento celular hace de la estructura rígida, flexible y durable.

2.4.2 Comportamiento de acuerdo a material de llenado

Una variedad de materiales de relleno, incluyendo suelos nativos y los agregados reciclados, se pueden utilizar para reducir el material de desecho y los costos generales de construcción. Ver Figura 2-10.



Figura 2-10 Geocelda con distintos materiales de relleno.

La perforación de las geoceldas permite un eficiente comportamiento hidráulico evitando que se sature el material de relleno y proporcionando control de sedimentos superior para la escorrentía de aguas pluviales., ideal para vegetar taludes donde el terreno es muy duro o rocoso ya que se logra conseguir el confinamiento y espesor adecuado de tierra vegetal para que pueda generarse vegetación. Conserva la vegetación al paso del caudal, reduciendo las velocidades para evitar la socavación en las paredes de los taludes, conservando la sección original del canal. Las celdas ofrecen una excelente resistencia estructural y durabilidad, mientras que el material permeable permite que el agua se filtre a través de la gran mayoría de partículas de material de relleno y del suelo.

Estudios anteriores (Han, Pokharel, 2010 [3]), donde se analizó el funcionamiento de la geocelda con distintos materiales de relleno, arrojaron que el desempeño es mejor cuando el material posee menor cantidad de finos, ya que éstos son más susceptibles a la humedad. Los materiales de estudio fueron 3:

- Agregado AB3 bien graduado con un $d_{50}= 4.4$ [mm], $C_c=1.55$ y $C_u=21$, CBR=56% y un máximo de densidad seca de 2.13 [g/cm³].
- Residuos de Cantera (QW) con un $d_{50}= 1.3$ [mm], $C_c=2.3$ y $C_u=24$, CBR=48% y un máximo de densidad seca de 2.06 [g/cm³].
- Pavimento asfáltico reciclado (RAP) con tamaño máximo de 5 [cm] con una gradación gruesa, CBR=10% y una densidad máxima seca de 1.81 [g/cm³].

La subrasante tenía un CBR=21% y una densidad máxima seca de 1.61 [g/cm³]. Las curvas con la información se encuentran en el ANEXO I.

El estudio logró demostrar que la geocelda aumenta la vida útil de un camino no pavimentado. Una cuarta pista consistía en una pista de control, con sólo agregado AB3 sin refuerzo de geocelda y con un espesor del doble, del de las pistas reforzadas. La pista de material AB3 reforzada tuvo un asentamiento de 1.5 veces menor que el de la sección de control, mientras que el RAP reforzado disminuyó en 3,5 veces. La comparación no se pudo lograr con el material QW reforzado, producto de una falla inicial en la soldadura de conexión de las celdas, que se produjo debido al deterioro del material de llenado producto de cantidad de finos. No obstante, su ángulo de distribución de esfuerzos aumentó al igual que lo hizo con los otros dos materiales. Esto significa, que el esfuerzo vertical se redujo. El mayor aumento del ángulo de distribución se esfuerzo se produjo en AB3, mientras que el menor aumento fue para QW.

2.4.3 Material de Relleno

En el marco de esta memoria, se considera como material de relleno una gravilla 3/8" que se genera como un excedente en la planta de áridos NAJAR (propiedad de la empresa Sociedad Construcciones y Servicios NAJAR Ltda.), la cual resulta como un subproducto en la producción de áridos para hormigón entre las 10 [mm] y 3/4".

De acuerdo a la normativa vigente, esta gravilla de 3/8" puede ser vendida y utilizada para la producción de hormigones, mas de acuerdo a los clientes de Sociedad Construcciones y Servicios NAJAR Ltda. señalan que un árido de ese tamaño provoca la pérdida de resistencia del hormigón, por lo que prefieren material por debajo de los 5[mm] para la producción.

Si bien dicha gravilla podría utilizarse para mezclas asfálticas, este último sólo requiere material chancado, lo que eleva significativamente los costos de producción. Otras empresas transforman la gravilla de 3/8" en arena para venderla como árido para hormigón, no obstante, debido a la zona en la que se encuentra la empresa, la arena es más barata que el proceso de convertir la gravilla en arena, por lo que resulta poco conveniente.

Actualmente, entre un 5 y 10% de la producción total de áridos para hormigón de la planta de áridos NAJAR corresponde a gravilla 3/8", acumulándose mensualmente entre 300 a 500 [m³] sin tener un uso específico. Por lo tanto, una ventaja de utilizar este material para el relleno de la geocelda es su bajo costo y aprovechamiento de un recurso accesible que actualmente se descarta.

3 METODOLOGÍA DE DISEÑO

3.1 INTRODUCCIÓN

Un pavimento es una estructura de una o más capas comprendidas entre la subrasante y la superficie de rodamiento. Esta estructura debe ser resistente a la acción del tránsito, a los efectos del clima y ser capaz de transmitir los esfuerzos inferiores a la capacidad de soporte del suelo en la subrasante. En base a la forma en que son transmitidos los esfuerzos los pavimentos se clasifican en:

- **Pavimento Rígido:** es aquel formado por una losa hormigón sobre una base, o directamente sobre la sub-rasante. Transmite directamente los esfuerzos al suelo en una forma minimizada, es auto-resistente, y la cantidad de concreto debe ser controlada.
- **Pavimento flexible:** es un sistema multicapas, cuya(s) capa(s) superior(es) es (son) de una mezcla asfáltica y las capas inferiores son de materiales granulares sobre una subrasante. Se denomina flexible dado que al ser sometido a cargas se comporta elásticamente, presentando una deformación y recuperación deseada.
- **Pavimento Articulado:** es aquel en el cual la capa superior o acabado del pavimento está constituida por elementos prefabricados de hormigón.

Para efectos del presente trabajo el diseño de este prototipo de pavimento se considerará como un pavimento flexible de acuerdo con antecedentes bibliográficos recopilados y definiciones del equipo técnico de la UTFSM.

Además de la modelación de los parámetros de diseño correspondientes a los materiales y geometría de un pavimento, este capítulo presenta las normas que deben cumplir las geoceldas al ser utilizada dentro de la estructura de un pavimento.

El presente capítulo se divide en:

- Introducción
- Metodología de Diseño con Aplicación de Geocelda
- Características de Geocelda.

3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO CON APLICACIÓN DE GEOCELDA

Actualmente, existen dos enfoques principales para el diseño de pavimentos flexibles: los métodos empíricos y los métodos mecanicistas. Es importante destacar que existe un método que complementa los dos métodos anteriores. No obstante, para el presente estudio se definirán sólo los dos primeros, ya que el tercero es una combinación de ambos.

Los métodos empíricos correlacionan el comportamiento de los pavimentos in situ, en base a observaciones y mediciones de campo, con factores que influyen en el deterioro de éstos. Los factores más importantes son: las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales (principalmente temperatura y precipitación) que actúan sobre la estructura, el tipo de suelo o terreno de fundación (subrasante), la calidad de los materiales empleados y las deficiencias durante el proceso constructivo. El control y la medición de los factores que influyen en el diseño se realizan durante las fases de estudio para después, asociar los valores a métodos de deterioro y crear la solución óptima.

Por otro lado, el método mecanicista se basa esencialmente en el análisis de tensiones, deformaciones unitarias y deflexiones de las diferentes capas de la estructura del pavimento, buscando definir con base en el comportamiento resiliente de los materiales, el máximo valor admisible para aplicación de la carga correspondiente a un eje de carga, y sus modelos de desempeño están basados en propiedades mecánicas de los materiales. El comportamiento resiliente de los materiales granulares se define como las deformaciones recuperables durante los ciclos de carga y descarga inducidos por los vehículos que circulan sobre la estructura. Por otro lado, las deformaciones permanentes, son llamadas plásticas.

Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque científico, con un marco teórico que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular.

En la actualidad el estado del arte en el diseño del pavimento con aplicación de geocelda considera la metodología mecanicista como base de su diseño. Lo anterior se sustenta en una serie de investigaciones llevadas a cabo por importantes instituciones a nivel mundial, entre las cuales se destacan Universidad de Kansas, TRI (Texas Research Institute), University of Delaware, TU Clausthal (Alemania), Columbia

University, Tsukuba Science City, Koac-NPC (Holanda), Iowa Department of Transportation, Russian Railway Research Institute [5].

El diseño parte de la premisa que contempla un material de diseño en la capa de rodadura de tipo granular, como arena, subbase granular, base granular, RAP o gravilla como será este caso.

3.2.1 Elementos de Diseño

Las componentes de entrada al proceso de diseño en la metodología mecanicista hace referencia a la geometría de la estructura; básicamente son los espesores de cada capa; las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas que serán módulos dinámicos o resilientes; el tipo de clima del medio físico que atravesará la carretera, definido por precipitación y temperatura; y el nivel de tránsito vehicular definido ya sea en ejes equivalentes o, preferentemente, a través de su correspondiente espectro de distribución de cargas, que veremos más adelante. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada.

Para conocer el estado de esfuerzos y deformaciones del pavimento se aplica la teoría multicapa elástica desarrollada inicialmente por Burmister, quien en 1945 propuso una teoría que se podía aplicar a estructuras de pavimentos, basada en la teoría de Boussinesq. Con este modelo se puede calcular la respuesta de múltiples cargas colocados en posiciones aleatorias en una losa. Entonces la solución al problema consiste en determinar a una profundidad z que cantidad de esfuerzo se ha disipado.

La ecuación general para determinar la distribución de esfuerzos de es la siguiente [15]:

$$\sigma_z = q * \left(1 - \frac{(z/a)^3}{[1 + (z^2/a^2)]^{3/2}} \right) \quad (\text{ec. 3.2.1})$$

Donde,

σ_z : Esfuerzo vertical a la profundidad z .

q : Presión de la carga.

a : Radio de carga de la huella circular.

Para la aplicación del modelo se supone un comportamiento lineal entre los esfuerzos y deformaciones, lo que indica que se acepta que los materiales trabajan dentro de su rango elástico; sin embargo, la reología de los materiales asfálticos demuestra que su comportamiento es viscoelástico, función del estado de esfuerzos, del tiempo de aplicación de las cargas y de la temperatura; de la misma manera los materiales granulares responden a las cargas, de acuerdo al nivel de esfuerzos aplicados, a su densidad y humedad, en general su comportamiento no es lineal y depende en gran medida de las características del material de la capa subyacente; en este sentido existen modelos teóricos elásticos no lineales (Boyce 1980).

Sin embargo, para efectos de este estudio los materiales de las capas de la estructura del pavimento se consideran homogéneos, isotrópicos y horizontalmente infinitos, que se incluyen dentro de un sistema lineal elástico, caracterizado por las siguientes variables:

- Módulo resiliente (M_r), el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable del material.
- Relación de Poisson (ν): constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.
- Espesores de capa (h).

Para el caso particular del presente estudio, el aporte de la geocelda en la estructura del pavimento se basa en la inclusión de módulos modificados en un análisis convencional por el método mecanicista de pavimentos. El efecto del módulo sobre el comportamiento del material, se produce tanto en el rango elástico como en el rango plástico del material, generando un incremento en la relación esfuerzo-deformación, traducida en la vida útil del pavimento. A continuación, en la Figura 3-1 se expone gráfica esfuerzo deformación para una estructura tipo con y sin refuerzo de geocelda, [5]:

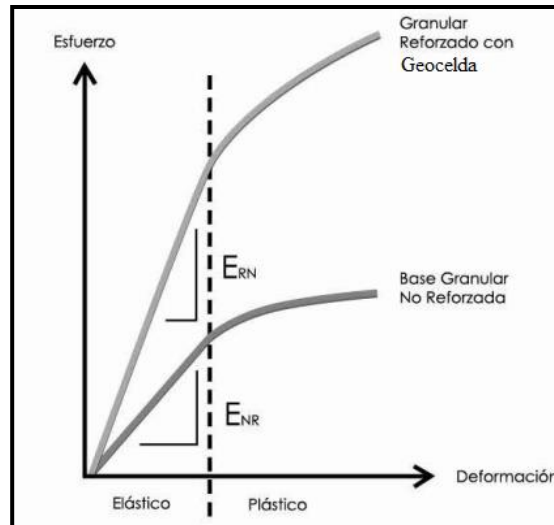


Figura 3-1 Esfuerzos y deformaciones para la estructura con y sin refuerzos. [5]

De lo anterior se puede observar que el efecto de la geocelda en la capa granular produce un aumento en el valor del módulo resiliente de esta. Consecuente con lo anterior se ha definido una relación entre el módulo reforzado y el no-reforzado el cual se conoce como Factor de Mejoramiento de Módulos o MIF (Modulus Improvement Factor). [5]

3.2.1.1 **Factor de Mejoramiento de Módulo**

El MIF es un valor adimensional y está asociado a las características del material granular de llenado y el material de soporte de la capa confinada, y como fue definido anteriormente corresponde a la relación lineal entre el módulo resiliente del material con refuerzo de geocelda y el módulo resiliente del material sin refuerzo de geocelda, ver ec 3.2.1.1 [5].

$$MIF = \frac{E_{Reforzado}}{E_{Sin-Refuerzo}} \quad (\text{ec. 3.2.1.1})$$

En general, el proceso de determinación del MIF se basa en el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación de una estructura de pavimento.

En la última década se han realizado una serie de estudios con respecto al comportamiento del MIF. De estos resultados se ha observado que el valor del MIF

depende directamente de los módulos resilientes del material de llenado y del material de soporte, donde su valor varía entre 0 y 5. Lo anterior dado que, a mayor valor del módulo resiliente del material de soporte, mayor es el valor del MIF y a mayor valor del módulo resiliente del material de llenado, menor es el valor del MIF.

A continuación, se expone en la Tabla 3-1 los valores típicos del MIF, obtenido de múltiples ensayos de laboratorio y campo [5].

Tabla 3-1 Valores típicos del MIF. [5]

Capa de soporte Es [Mpa]	MIF				
	Módulo del material de lleno = EII [Mpa]				
	80	110	150	200	300
50	4	3,6	3	2,5	1,8
100	4,2	3,8	3,2	2,8	2
150	4,5	4	3,4	2,9	2,1
200	4,8	4,2	3,6	3,1	2,2
300	5	4,4	3,8	3,3	2,3

Otro resultado obtenido hace referencia que existe una distribución en el confinamiento del material granular, el cual aplica dependiendo de la altura de la celda y tiene límites establecidos, reflejados en el porcentaje del valor del MIF que aplica dentro de la distribución de los módulos, logrando identificar tres zonas de distribución del confinamiento, ver Figura 3-2.

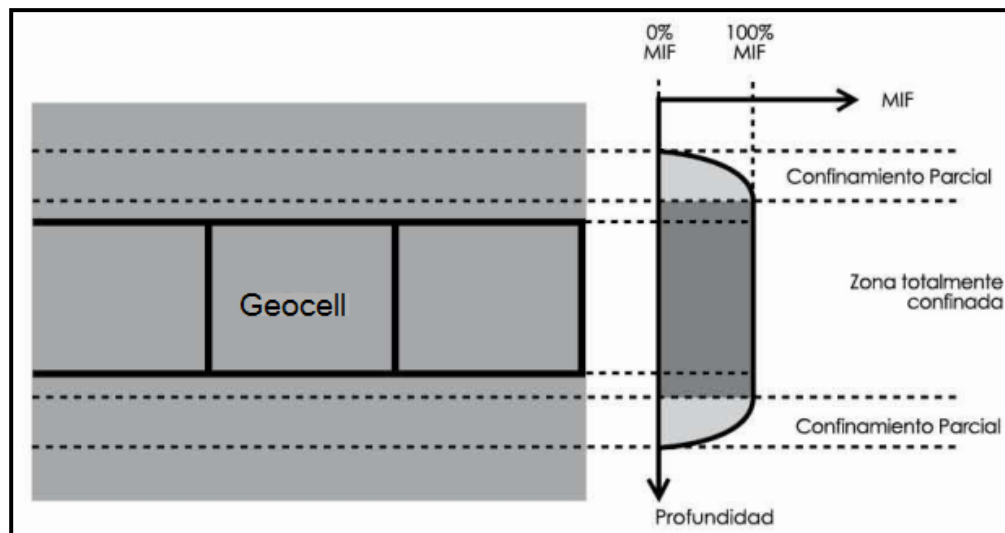


Figura 3-2 Distribución del confinamiento en la zona reforzada. [5]

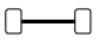


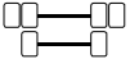
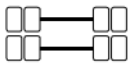

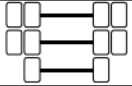

La zona central tiene un efecto de total confinamiento o 100% de aplicación del MIF, mientras que en la parte superior como la inferior de la geocelda se

genera una zona de transición donde el confinamiento es parcial y disminuye paulatinamente hasta que el MIF tiene un valor cero, que indica que no hay efecto de confinamiento. La zona de transición del MIF actúa como un elemento amortiguador, que permite que el material de alto módulo (material reforzado con geocelda) interactúe fácilmente con materiales blandos o de módulos bajos sin efectos negativos por interacción de capas de gran rigidez. Para efectos de diseño, la zona parcialmente confinada no se considera, y el MIF únicamente se hace efectivo para la zona denominada como Zona Totalmente Confinada, la cual corresponde a la altura de la celda más 2 [cm] arriba y 2 [cm] debajo de la geocelda [5].

3.2.1.2 **Modelación de Cargas**
















Los pavimentos tienen como función principal la de soportar las cargas de los vehículos, transmitidas a estos por sus respectivos neumáticos. La normal en el diseño de pavimentos es considerar el peso de los ejes que pueden tener dos o cuatro llantas, como muestra la Tabla 3-2 a continuación.

Tabla 3-2 Límites de Carga por Tipo de Eje [21]

EJES CONVENCIONALES			
EJES		LIMITE (Ton)	TOLERANCIA
	RS	7	0,5
	RD	11	0,5
	2RS	14	0,6
	RD+RS	16	0,6
	2RD	18	0,7
	3RS	19	0,7
	2RD+RS	23	1,0
	3RD	25	1,0
Peso Bruto Total		45	1,0

Estos ejes pueden ser combinados de diversas formas dando lugar a diferentes configuraciones de vehículos como muestra la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Pesos máximos permitidos en función de la configuración de ejes [20]

TIPO DE VEHICULO	CONFI GURAC ION DE EJES	DIMENSIONES MAX.			PESO BRUTO MAXIMO (PERMITIDO)
		LARGO	ANCHO	ALTO	
	S-1 D-1	13.20	2.60	4.10	16.50
	S-1 D-2	13.20	2.60	4.10	24.00
	S-1 D-3	13.20	2.60	4.10	30.00
	S-2 D-2	13.20	2.60	4.10	28.00
	S-1 D-1 D-1	18.60	2.60	4.10	27.00
	S-1 D-1 D-2	18.60	2.60	4.10	34.50
	S-1 D-2 D-2	18.60	2.60	4.10	42.00
	S-1 D-1 D-3	18.60	2.60	4.10	42.00
	S-1 D-2 D-1 D-1	TOT.= 18.60 DIST. E/EJES >2.40	2.60	4.10	45.00
	S-1 D-1 D-1 D-1 D-1	18.60	2.60	4.10	45.00
	S-1 D-1 D-1 D-1	TOT.= 20.00	2.60	4.10	37.50
	S-1 D-1 D-1 D-2	TOT.= 20.00	2.60	4.10	45.00
	S-1 D-2 D-1 D-1	TOT.= 20.00	2.60	4.10	45.00
	S-1 D-2 D-1 D-2	TOT.= 20.00	2.60	4.10	45.00
	S-1 D-1 D-1 D-1 D-1	TOT.= 20.50	2.60	4.10	45.00

Para el diseño de pavimentos se suele modelar el comportamiento de aquellos ejes que posean más de una rueda al de una rueda simple. Para transformar aquellos ejes a un equivalente de la rueda simple (ESWL), existen varios criterios basadas en distintas suposiciones, los cuales se mencionan a continuación:

- **Criterio de igual esfuerzo vertical:** Para llevar la carga máxima al límite especificado y para llevar una mayor carga, la rueda doble o tándem, a menudo se utiliza ESWL como la carga de una sola rueda que produce el mismo valor de esfuerzo máximo, deflexión o presión de contacto a la profundidad deseada que una rueda doble (Ver Figura 3-3). Este método semi-racional es conocido como el método de Boyd y Foster (1950) basado en las siguientes suposiciones:
 - El concepto de igualdad se basa en igual esfuerzo.
 - El área de contacto es circular.
 - El ángulo de influencia es 45°
 - El medio del suelo es elástico, homogéneo e isotrópico en mitad del espacio.

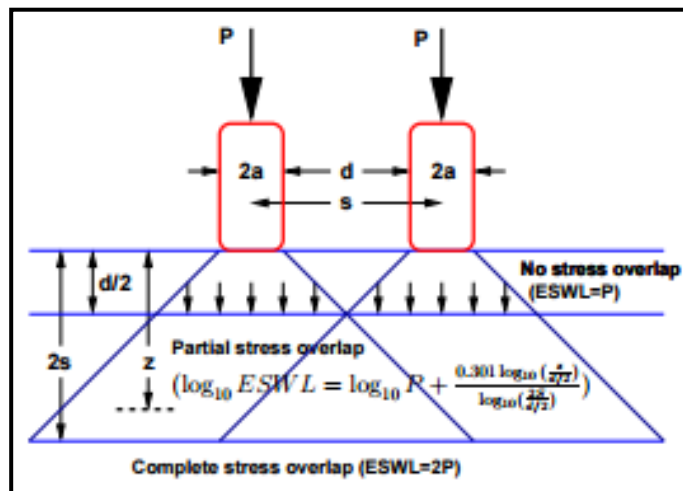


Figura 3-3 Modelo de Criterio de igual esfuerzo vertical [25]

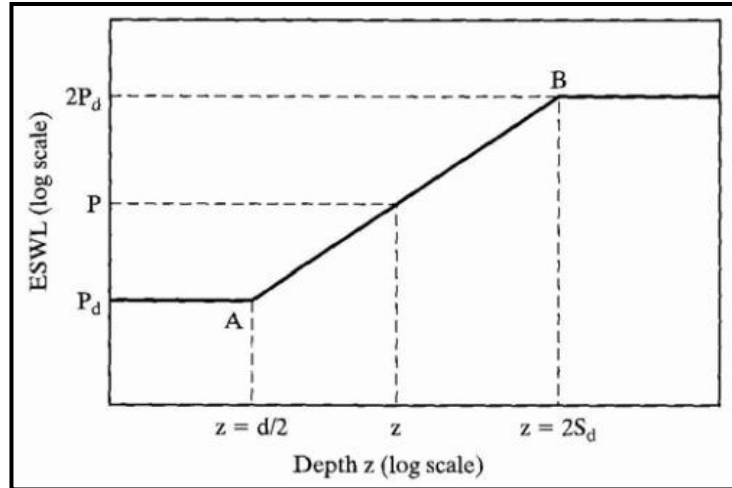


Figura 3-4 Comportamiento d ESWL en función de la profundidad [26]

Para la recta entre el punto A y B de la Figura 3-4 se utiliza la siguiente relación [26]:

$$\log(ESWL) = \log P_d + \frac{0,301 \log\left(\frac{2z}{d}\right)}{\log\left(\frac{4S_d}{d}\right)} \quad (\text{ec. 3.2.1.2(a)})$$

Donde P_d es la carga de la rueda doble, z la profundidad, d distancia entre la pared de las ruedas y S_d la distancia de centro a centro entre las ruedas dobles.

- **Criterio de igual deflexión vertical:** Método desarrollado por Foster y Ahlvin (1958), es considerado homogéneo en la mitad del espacio y las deflexiones verticales a la profundidad igual al espesor del pavimento puede ser obtenido de las soluciones Boussinesq. La carga de una rueda simple que tiene el mismo radio de contacto como una rueda doble y los resultados de la deflexión máxima igual a la causada por una rueda doble es el ESWL.

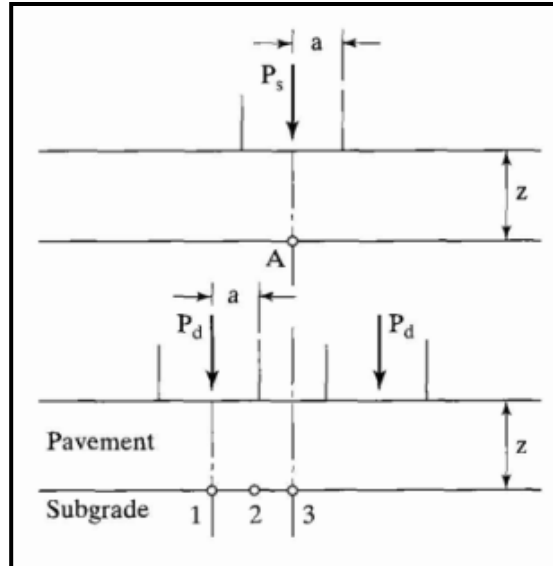


Figura 3-5 Localización del esfuerzo vertical o deflexión máxima en la subrasante [26]

La deflexión provocada por P_s en el punto A y las deflexiones causadas en los puntos 1, 2 y 3 provocada por la carga P_d mostrada en la Figura 3-5, puede ser expresado como:

$$w_s = \frac{q_s a}{E} F_s \quad (\text{ec. 3.2.1.2(b)})$$

$$w_d = \frac{q_d a}{E} F_d \quad (\text{ec. 3.2.1.2(c)})$$

Donde q_d y q_s corresponden a la presión de contacto bajo a una rueda simple y una doble respectivamente, a al radio de contacto, E al módulo de elasticidad del material y F_s y F_d al factor de deflexión vertical de la rueda simple y doble respectivamente.

Igualando las deflexiones, y para un mismo radio de contacto, se obtiene la siguiente relación:

$$ESWL = P_s = \frac{F_d}{F_s} P_d \quad (\text{ec. 3.2.1.2(d)})$$

Este método se mejoró más tarde cuando Huang (1968) sugirió el uso de una teoría de capas y lo presentó como un gráfico simple

para determinar ESWL basado en la deflexión en la interfaz de dos sistemas de capas, mostrada en la Figura 3-6.

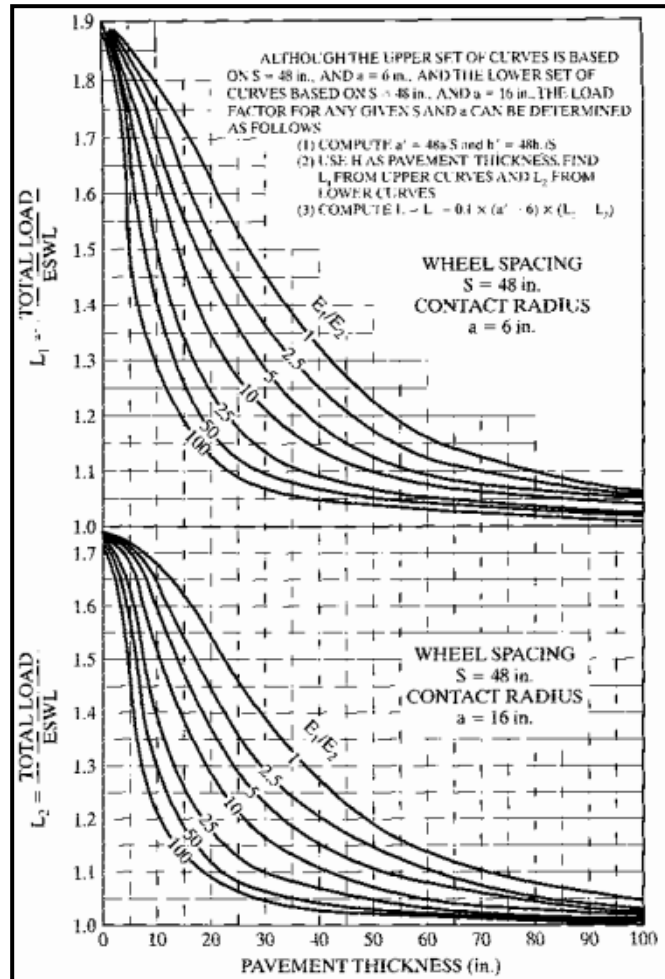


Figura 3-6 Gráfico para determinar la carga de una rueda simple [26]

Donde el factor de carga L se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$L = \frac{\text{Total Load}}{\text{ESWL}} = \frac{2P_d}{P_s} \quad (\text{ec. 3.2.1.2(e)})$$

En resumen, el proceso para la obtención de ESWL es el siguiente:

- Dados S_d , h_1 y a , se determina el radio modificado a' y el espesor modificado h_1' , de acuerdo a:

$$a' = \frac{48}{S_d} \quad (\text{ec. 3.2.1.2(f)})$$

$$h_1' = \frac{48}{S_d} h_1 \quad (\text{ec. 3.2.1.2(g)})$$

- Uso de h_1' como espesor del pavimento y encontrar los factores de carga L_1 y L_2 del gráfico.
- Determinar el factor de carga L , a partir de:

$$L = L_1 - (L_1 - L_2) \frac{a' - 6}{10} \quad (\text{ec. 3.2.1.2(h)})$$

- Finalmente, se obtiene ESWL con:

$$ESWL = \frac{2P_s}{L} \quad (\text{ec. 3.2.1.2(i)})$$

- **Criterio de igual esfuerzo de tracción:** Basado en este criterio, y teniendo un mismo radio de contacto, se obtiene la siguiente relación:

$$ESWL = P_s = CP_d \quad (\text{ec. 3.2.1.2(j)})$$

Donde, C es el factor de conversión.

- **Criterio basado en igual presión de contacto**

$$ESWL = P_s = \left(\frac{F_d}{F_s}\right)^2 P_d \quad (\text{ec. 3.2.1.2(k)})$$

- **Criterio basado en un radio de contacto equivalente**

$$a_{eq} = a \left[1 + 0,241683 \left(\frac{S}{a}\right) \right] \quad (\text{ec. 3.2.1.2(l)})$$

3.3 CARACTERÍSTICAS DE GEOCELDA

Una de las etapas del diseño consiste en verificar que el material del cual se conforman las celdas de confinamiento cumpla con algunas propiedades físicas y mecánicas que permitan un comportamiento a largo plazo. Es decir que, si la celda se deforma durante alguna etapa del proceso, bien sea por efectos de cambios de temperatura o por su sometimiento a ciclos de carga y descarga, el efecto del confinamiento se perderá y por lo tanto, la vida útil de la vía únicamente estará limitada a la vida útil de la celda.

Las condiciones que deberá cumplir la geocelda es que el material deberá ser polietileno de alta densidad (HDPE), de superficie lisa o corrugada, paredes sólidas o paredes perforadas. Si el material es perforado, las perforaciones no pueden exceder un 10% (con una tolerancia de + ó - 2%) del área total de la pared [16].

Las propiedades dimensionales de la geocelda serán determinadas por las normas ASTM D1505 para la densidad del polímero; ASTM D 1693 para la resistencia medioambiental del agrietamiento, ASTM D1603 para el contenido del carbón negro y ASTM D5199 para el espesor de la lámina. Los requerimientos físicos deberán cumplir los siguientes criterios [16] [17]:

- Densidad del polímero: 0.94 [g/cm³] mínimo.
- Resistencia de agresiones medioambientales: 3,000 [h] mínimo.
- Contenido de carbón negro: 1.5% por peso mínimo.

Para el control de deformaciones que proporciona la geocelda, se realiza un ensayo, que mediante un ciclo de deformación a largo plazo a través de la inclusión de calor en el material, se recrea el comportamiento en el tiempo (ASTM D6652)[5].

Para la determinación de la constante de expansión térmica se utiliza un ensayo de análisis termo mecánico (ASTM E831) y se considera como valor límite para el uso en sistemas de confinamiento celular, de 70 a 100 [ppm/°C][5].

Otro factor importante a determinar es cuando se supera un determinado límite de temperatura, donde se observa que el material pierde propiedades de resistencia y rigidez, lo que afecta el confinamiento y por lo tanto el módulo de trabajo en la metodología de diseño. El ensayo que determina dicho comportamiento se conoce como Análisis Dinámico Mecánico (DMA), y lo que hace es revisar el comportamiento

viscoelástico de los polímeros (ASTM E2254), determinando el módulo remanente para diferentes temperaturas. El valor mínimo establecido como estándar para garantizar la vida útil de un polímero está en función de los módulos remanentes para diferentes temperaturas [5]. Ver Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Valores mínimos ensayo DMA. [5]

Temperatura (°C)	Módulo Resiliente (Mpa)
30	750
45	650
60	550
75	300

La resistencia a la oxidación representa un parámetro importante para el comportamiento de la geocelda, puesto que evalúa la capacidad del sistema para resistir ante la presencia de agentes químicos y agentes erosivos que pueden afectar la durabilidad en el largo plazo de la integridad de la celda. La resistencia a la oxidación se determina mediante un ensayo denominado Calorimetría Diferencial (DSC) (ASTMD 389S), y en el cual se determina el tiempo de inducción a la oxidación, conocido como OIT. El valor mínimo de OIT para el polímero que conforma las celdas deberá ser de 95 [min] [5].

La resistencia a la degradación UV se mide con el fin de evitar la cristalización del polímero y por lo tanto, la pérdida de las propiedades del material. El ensayo que evalúa este comportamiento es el establecido en ASTM 5885, que determina un tiempo en minutos hasta que se alcanza un umbral de degradación. El valor mínimo de un sistema de confinamiento celular será de 250 [min][5].

4 PISTAS DE PRUEBA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan detalles y definiciones consideradas para el desarrollo de los ensayos de campo para la construcción de las unidades de prueba, todo lo anterior bajo las definiciones de un proyecto que promueve la vinculación empresa-entidad proveedora de conocimiento de innovación CORFO, lo que en este caso corresponde a la Universidad Técnica Federico Santa María y la empresa NAJAR.

Para el presente desarrollo se consideró la construcción de tres pistas de prueba para tráfico pesado, las cuales se ubican dentro de las instalaciones de la empresa de la Planta de Áridos Najar localizada en la comuna de Dalcahue rural, Provincia de Chiloé, Región de los Lagos. Resultado de lo anterior se definieron y construyeron pistas localizada en las vías internas de la planta bajo una condición de carga común y configuraciones estructurales diferentes. Específicamente, la primera pista considera una capa de rodadura compuesta por una geocelda de espesor de 100 [mm] y rellena con gravilla 3/8", mientras que la segunda está compuesta por una geocelda de 75 [mm] rellena con gravilla 3/8", y por lo último, la tercera es una pista con un espesor de 100 [mm] de sólo gravilla de 3/8" como capa de rodadura.

Se destaca que la definición de los tipos de geoceldas se consideró en base de los modelos existentes en el mercado nacional y que cumplieran con especificación ASTM. En el caso de los materiales de relleno se consideró la aplicación de gravilla de 3/8" producida en la planta de áridos de la empresa, la cual corresponde a un material de descarte que en la actualidad no tiene un uso comercializado.

En complemento, se realizó un estudio de costo de este pavimento y se comparó con respecto a pavimentos tradicionales como el asfáltico y el de hormigón.

El presente capítulo se divide en:

- Introducción
- Ubicación
- Parámetros de Diseño
- Proceso Constructivo
- Estudio de Costos

4.2 UBICACIÓN

Las pruebas de campo para tránsito pesado se realizan en una vía interna dentro de la planta de tratamiento de áridos de la Sociedad Construcciones y Servicios Najar Ltda ubicada en el sector Butalcura latitud $42^{\circ}16'31.93''\text{S}$ y longitud $73^{\circ}41'35.56''\text{O}$, Comuna de Dalcahue, Provincia de Chiloé, Región de Los Lagos, Chile. Ver Figura 4-1.



Figura 4-1 Ubicación de pistas de prueba.

4.3 PARÁMETROS DE DISEÑO

4.3.1 Caracterización de Agregados y Suelos

Para el diseño del pavimento se ha considerado una capa reforzada con geocelda para la superficie, dispuesta sobre una capa de subbase. De lo anterior, se obtiene que el pavimento conforma una estructura de tres capas incluyendo la subrasante.

De acuerdo a la metodología expuesta en el capítulo anterior, suponiendo que los componentes de las capas del pavimento tienen un comportamiento elástico, la caracterización de los materiales viene dada por la relación de Poisson (ν) y el módulo de elasticidad de la capa (E) (equivalente al módulo resiliente para suelos granulares).

Las relaciones de Poisson fueron definidos por la Universidad Técnica Federico Santa María. A continuación, en la Tabla 4-1 expone los valores de la relación de Poisson para la gravilla de la capa de rodadura, la subbase y la subrasante.

Tabla 4-1 Relación de Poisson de los materiales del pavimento

Relación de Poisson (ν_{subr}):	0,4
Relación de Poisson (ν_{subbase}):	0,35
Relación de Poisson (ν_{gravilla}):	0,15

Por otro lado, el módulo resiliente se obtiene a partir de las ecuaciones 4.3.1(a) y 4.3.1(b), correspondiente al Manual de Carretera 3.604.105(1).1 y 3.604.105(1).2 [24].

$$M_R(\text{MPa}) = 17,6(\text{CBR})^{0,64} \quad \text{Para } \text{CBR} < 12\% \quad (\text{ec. 4.3.1(a)})$$

$$M_R(\text{MPa}) = 22,1(\text{CBR})^{0,55} \quad 12 \leq \text{para } \text{CBR} < 80\% \quad (\text{ec. 4.3.1(b)})$$

Las ecuaciones anteriores muestran que se hace necesario conocer el CBR de los materiales para obtener los módulos resilientes. De lo anterior, la Universidad Técnica Federico Santa María realizó ensayos de laboratorio a los tres materiales obteniendo algunas propiedades de estos, entre ellos el CBR, los cuales quedan detallados en el ANEXO III del presente documento.

Tabla 4-2 CBR de los materiales de la estructura del pavimento

CBR _{subr} (%)	68
CBR _{subbase} (%)	65

Con los datos de la tabla anterior, en conjunto con las ecuaciones 4.3.2(a) y 4.3.2(b) es posible estimar los módulos resilientes de la subrasante y subbase, los cuales quedan expresados en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Módulos de los materiales del pavimento

Módulo de elasticidad* (E_{subr}) [MPa]	225,05
Módulo de elasticidad* (E_{subbase}) [MPa]	219,53
Módulo de elasticidad* (E_{gravilla}) [MPa] [6]	98,07

*Se utiliza el módulo resiliente correspondiente para suelos granulares.

Es importante destacar que los valores anteriores de la capa de rodadura se obtuvieron sin considerar la acción de la geocelda, la que actúa en dos de las tres pistas de pruebas que quedan especificadas más adelante en el punto 4.3.4. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de este documento. Para obtener el módulo de elasticidad reforzado (E_r) se realiza una tabla los módulos reforzados con los valores típicos del MIF de la Tabla 3-1 mediante la ecuación 3.2.1.1. que define el MIF como la razón entre el módulo de elasticidad reforzado y el módulo de elasticidad sin reforzar.

Tabla 4-4 Valores de los módulos reforzados con MIF típicos [29].

Módulo Reforzado [Mpa]					
Capa de soporte	Módulo del material de lleno = E_{ll} [Mpa]				
E_s [Mpa]	80	110	150	200	300
50	320	396	450	500	540
100	336	418	480	560	600
150	360	440	510	580	630
200	384	462	540	620	660
300	400	484	570	660	690

De la Tabla 4-4, se desarrollan los ábacos correspondientes mostrados en la Figura 4-2, donde se grafican los valores del módulo resiliente del material de llenado no reforzado versus el módulo resiliente del material de llenado reforzado para distintos valores de módulo resiliente del material de soporte.

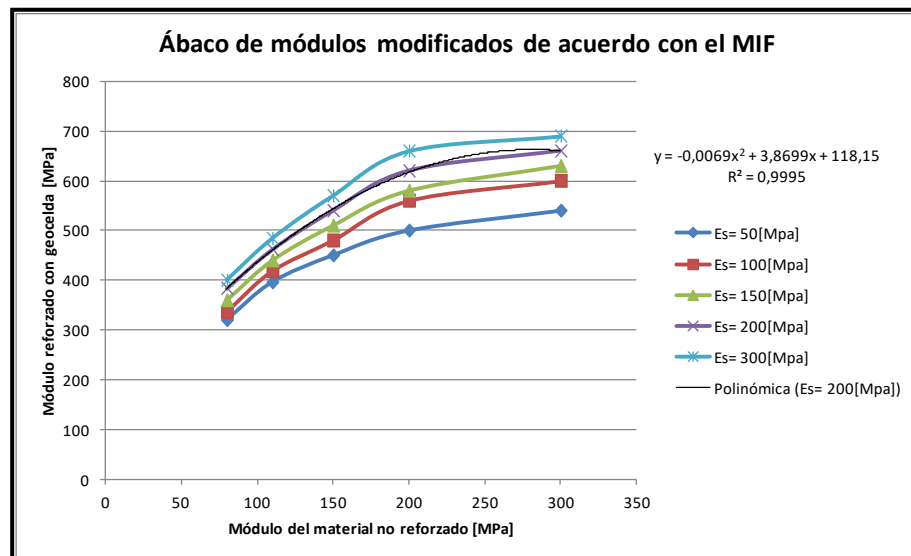


Figura 4-2 Ábacos de módulos modificados de acuerdo con el MIF [29]

En este caso, el material de soporte corresponde a la subbase, la cual posee un módulo resiliente de 219,53 [MPa]. Por consiguiente, el efecto del MIF se asemejaría de mejor manera al de la curva correspondiente al de un material de soporte con un módulo resiliente de 200 [MPa], por lo cual mediante su regresión geométrica mostrada en la

Figura 4-2 Ábacos de módulos modificados de acuerdo con el MIF [29]

se puede obtener el módulo resiliente modificado del material de llenado, que en este caso corresponde a la gravilla, y su respectivo MIF.

Finalmente, el valor del módulo resiliente modificado de llenado conseguido es de 431,31 [MPa] con un MIF = 4,4.

4.3.2 Definición del modelo de cargas

Se identifica el tipo de vehículos que circulará en la zona en cuestión, los cuales son corresponden a los camiones que transitan dentro de la planta de áridos. El camión tipo 1 se referirá como aquel que presenta una configuración S-1 y D-1, el tipo a 2 S-1 y D-2, y el tipo 3 como S-1, D-1 y D-2 (ver Tabla 3-3). La sigla S significa que se trata de un eje simple de dos ruedas, mientras que la D indica un eje doble donde un eje tiene 4 ruedas, tal como muestra la Figura 4-3.



Figura 4-3 Tipos de ejes [20]

El número luego de la sigla indica la cantidad de dicho eje. Los tipos de ejes y su tolerancia en la carga se muestran en la Tabla 3-2.

La sobrecarga se estimó conociendo el volumen de transporte de cada camión (ver Tabla 4-5) y la densidad de los materiales de transporte, los cuales varían entre el de la gravilla, correspondiente a 1,5-1,55 [T/m³], y la de la arena húmeda de 1,4-2,1 [T/m³].

Tabla 4-5 Carga de Camiones

Tipo Camión	Volumen [m3]	Peso [T]
1	10	16,4
2	16	26,2
3	21	34,4

Se entiende que estos camiones transitan con sobre carga, ya que lo hacen dentro de un camino privado de la empresa.

La configuración de las distancias (en [m]) de las ruedas en el camión se señala en la Figura 4-4.

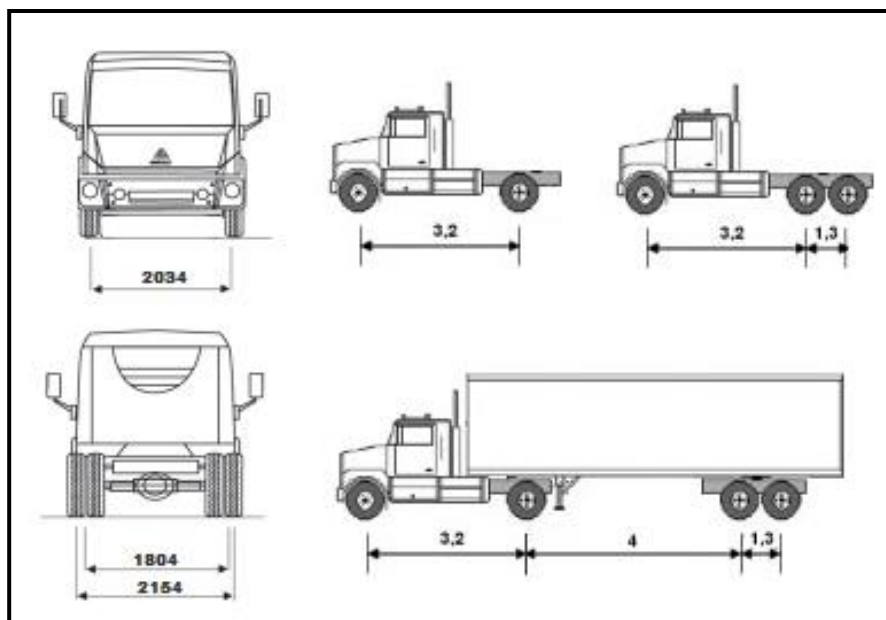


Figura 4-4 Dimensiones de camiones

La modelización de la fuerza aplicada por los neumáticos de los vehículos se realiza considerando superficies circulares uniformemente cargadas (Figura 4-5), de forma que la presión de contacto se puede estimar a partir de la huella de los neumáticos [22]:

$$\sigma_p = \frac{F}{\pi \cdot r^2} \quad (\text{ec. 4.3.1})$$

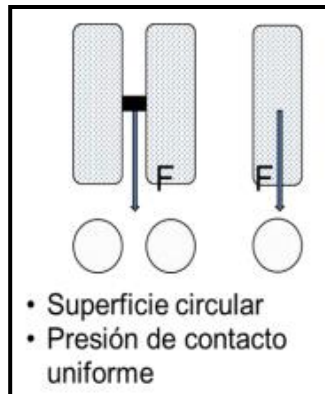


Figura 4-5 Modelización de la carga [22]

Se considerará un ancho de neumático de 300 [mm], por lo tanto, el radio de carga será de 150 [mm].

De los criterios mencionados el punto 3.2.1.2, de entre los más utilizados, que corresponden a los dos primeros, el criterio de igual esfuerzo vertical y el criterio de igual deflexión vertical, se utiliza el primero de acuerdo a los datos que se tienen.

En la Tabla 4-6 se tienen los datos para el cálculo de ESWL.

Tabla 4-6 Datos para cálculo de ESWL

DATOS	
a [mm]	150
Sd [mm]	350
d [mm]	50

Se obtienen las cargas por eje de cada camión para luego determinar P_d , realizado a partir de las Tabla 4-5 y Tabla 3-2. Ver Tabla 4-7y Tabla 4-8.

Tabla 4-7 Cargas por eje de cada camión [29]

Tipo Camión	S-1 [T]	S-1 [kN]	D-1 [T]	D-1 [kN]	D-2 [T]	D-2 [kN]
1	6,4	62,407	10,0	98,068		
2	7,3	71,893			18,9	184,867
3	6,7	65,527	10,5	102,971	17,2	168,499

Tabla 4-8 P_d para eje y cada camión [29]

Tipo Camión	S-1 [kN]	D-1 [kN]	D-2 [kN]
1	31,203	24,517	
2	35,946		23,108
3	32,764	25,743	21,062

Luego, de acuerdo al método de igual esfuerzo vertical, el ESWL depende de la profundidad, por lo que se tienen distintas cargas a partir de la profundidad de análisis. Ver Tabla 4-9.

Tabla 4-9 ESWL para cada camión [29]

ESWL [kN]				
Profundidad [mm]	Camión 1	Camión 2	Camión 3	
	D-1	D-2	D-1	D-2
0	24,517	23,108	25,743	21,062
75	30,811	29,041	32,352	26,469
225	38,721	36,496	40,657	33,265
100	32,711	30,832	34,346	28,102
250	39,579	37,305	41,558	34,002

4.3.3 Características de Geocelda

Para las características de la geocelda a utilizar, se destaca que la definición de estas se consideró en base de los modelos existentes en el mercado nacional y que cumplían con especificación ASTM.

Finalmente, las características del producto a utilizar quedan especificadas en las siguientes tablas:

Tabla 4-10 Propiedades de los materiales de geocelda seleccionada.[7]

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	NORMAS	UNIDAD	VALOR DE LA PRUEBA
Densidad Mínima de Polímeros	ASTM D 1505	g/cm3 (lb/ft3)	0,935 - 0,965 (58,4-60,2)
Resistencia de Agrietamiento con cargas constantes de tensión	ASTM D 5397	horas	> 400
Resistencia Medioambiental de Agrietamiento	ASTM D 1693	horas	6000
Contenido de Carbón Negro	ASTM D 1603	% por peso	1,5% mínimo
Espesor Nominal de la lámina antes de texturizar	ASTM D 5199	mm (mil)	1,27 (50) - 5%, +10%
Espesor Nominal de la lámina después de texturizar	ASTM D 5199	mm (mil)	1,52 (60) -5%, 10%
Las tiras de polietileno deberán texturizarse con dentaciones romboides.			
Las dentaciones romboides deberán tener una densidad superficial de 22-31 por cm ² (140-200 por in ²)			

Tabla 4-11 Propiedades Físicas de geoceldas [7]

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDAD	VALOR TÍPICO			
		EGA20	EGA30	EGA40	
Celda Nominal Expandida Medida (anchoxlargo)	mm (in)	259(10,2) x 224 (8,8)	321(12,6) x 287 (11,3)	508(20) x 475 (18,7)	
Celda Nominal Expandida Área	cm2 (in2)	289 (44,8)	480 (71,3)	1206 (187)	
Sección Nominal Expandida (anchoxlargo)	m (ft)	2,56(8,4) x 6,52(21,4)	2,56(8,4) x 8,35 (27,4)	2,56(8,4) x 13,72(45)	
Sección Nominal Expandida Área	m2 (ft2)	16,7 (180)	21,4 (230)	35,14 (3783)	
Profundidad de la Celda	mm (in)	75 (3)	100 (4)	150 (6)	200 (8)
Resistencia de las Soldaduras Ultrasónicas	N (lbf)	1065 (240)	1420 (320)	2130 (480)	2840 (640)
Resistencia de las Soldaduras	Una junta soldada de 102mm resistiendo un peso de 72,5 kg (160lbf) por 30 días mínimo o una junta soldada de 102mm resistiendo un peso de 72,5 kg (160lbf) por 7 días mínimo mientras está sujeta a cambios de temperatura desde 23°C (74°F) hasta 54°C (130°F) es un ciclo de una hora.				

Tabla 4-12 Características geométricas de geoceldas [7]

<p>Las secciones son 29 celdas de largo por:</p> <ul style="list-style-type: none"> •EGA 20 Ancho 10 celdas •EGA 30 Ancho 8 celdas •EGA 40 Ancho 5 celdas 	<p>El espacio entre soldaduras es:</p> <ul style="list-style-type: none"> •EGA 20 de 14 pulgada +/- 0.12" (355 +/-3mm) •EGA 30 de 17 pulgada +/- 0.12" (446 +/-3mm) •EGA 40 de 28 pulgada +/- 0.12" (711 +/- 3mm) 	<p>La densidad de la celda es:</p> <ul style="list-style-type: none"> •EGA 20 de 35 celdas por metro al cuadrado •EGA 30 de 22 celdas por metro al cuadrado •EGA 40 de 9 celdas por metro al cuadrado
--	--	--

El tipo de celda selecciona corresponde a la EGA20, ya que tiene el menor tamaño de abertura de celda, lo que genera que tenga un mayor número de celdas por metro cuadrado, permitiendo una mejor resistencia en las áreas específicas de fallas cuando se usan en situaciones determinadas de soporte de cargas. Este tipo de geocelda es usado frecuentemente para todo tipo de estabilización de suelo.

Con respecto a la altura de celda, se escogen la de 75 [mm] y la de 100 [mm], correspondientes a la geocelda EGA203 y EGA204 respectivamente. Estas son las alturas más pequeñas y están por debajo de la solución tradicional típica de hormigón que varía entre 100-250 [mm].

Para mayor información en las Figura 4-6 y Figura 4-7 queda esquematizado el tamaño de las celdas y el tamaño del panel del EGA20 de la especificadas en la Tabla 4-11.

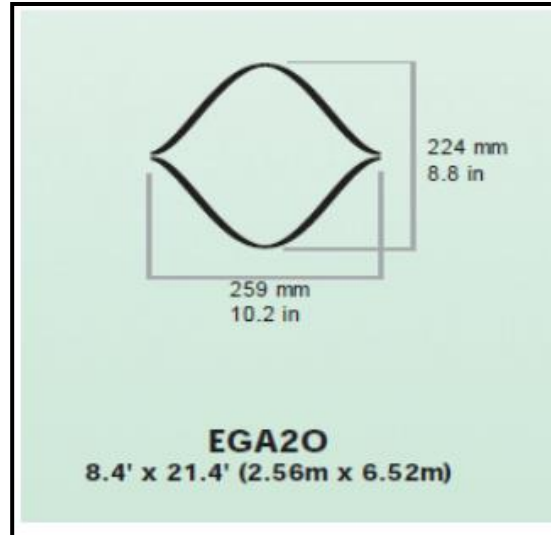


Figura 4-6 Tamaño de celda de geocelda seleccionada [7]

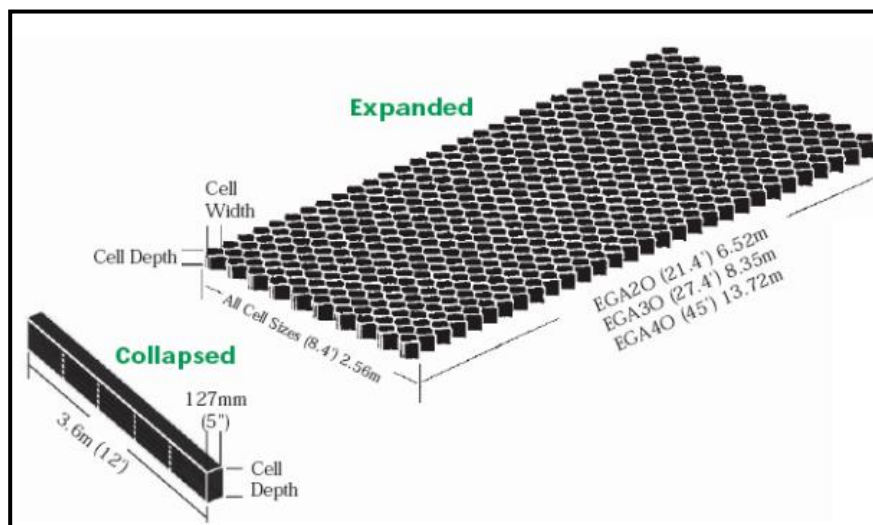


Figura 4-7 Tamaño de panel de geocelda seleccionada [7]

4.3.4 Parámetros Geométricos

La pista de prueba cuenta con una matriz de 3 pistas continuas, es decir, que se encuentran una después de otra, las cuales son estructuralmente distintas entre sí, de largo de 15,6 [m] de largo y de 3,0 [m] de ancho cada una y un bombeo de 2%. Las pistas son unidireccionales, por lo que sólo se consideran camiones cargados de salida. Todas las pistas se realizan sobre la misma subrasante con CBR 68% y sobre una capa de 150 [cm] de subbase con CBR 65%, cuyas características y propiedades de ambos materiales quedan detalladas en el ANEXO III. La primera pista considera una

capa de rodadura compuesta por una geocelda de espesor de 100 [mm] y rellena con gravilla 3/8", mientras que la segunda está compuesta por una geocelda de 75 [mm] rellena con gravilla 3/8", y por lo último, la tercera es una pista con un espesor de 100 [mm] de sólo gravilla de 3/8" como capa de rodadura. Lo anterior queda resumido en la Tabla 4-13 y esquematizado en la Figura 4-8.

Tabla 4-13 Especificación de Capa de Rodadura de Pistas de Prueba [29]

Pista de Prueba	Espesor de Carpeta [mm]	Espesor de Base [mm]	Geocelda
1	100	150	EGA203
2	75	150	EGA204
3	100	150	No Aplica

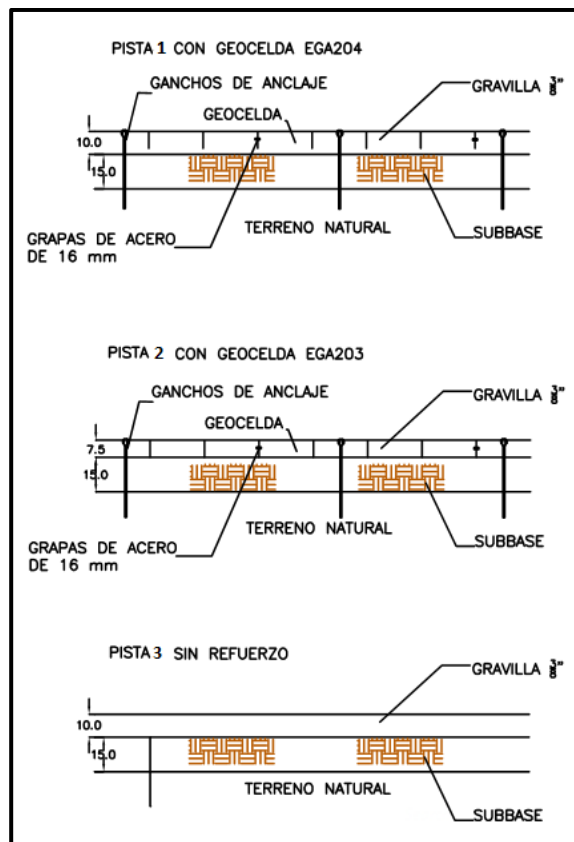


Figura 4-8 Estructura de las pistas [29]

De la tabla Tabla 4-13, se tiene entonces, que el módulo resiliente modificado del material de la capa de rodadura aplicaría sólo para las pistas de prueba 1 y 2.

4.4 PROCESO CONSTRUCTIVO

El sistema de geoceldas es de fácil construcción y no requiere mano de obra especializada para su colocación. A continuación, se exponen los pasos constructivos para la ejecución de las pistas:

4.4.1 Preparación Del Terreno

Remoción de todo el material inapropiado como pueden ser piedras grandes, raíces, escombros, etc. (ver Figura 4-9), y colocación de 150 [mm] de subbase para obtener una superficie de tendido suave, resistente y compacta (ver Figura 4-10).



Figura 4-9 Remoción de escombros [29]



Figura 4-10 Colocación de Subbase [29]

4.4.2 Colocación Y Anclaje

Las geoceldas usualmente vienen plegadas y son capaces de extenderse en planchas de diversos tamaños y ser llenadas con hormigón o rocas, es por ello que se debe extender la geocelda hasta alcanzar su dimensión de abertura total, sujetándola con estacas de hierro, clips T o U, tensores de poliéster de alta densidad y/o geomallas, varillas de acero, y/o otros accesorios relacionados (ver Figura 4-11). Para la fijación del sistema a la superficie existen diferentes métodos de anclaje. El más común consiste en elementos fabricados con varillas corrugadas con diámetro y longitud variable que incorporan en la parte superior un clip de fijación, para hincar sobre la superficie a tratar. El número de anclajes por unidad dependerá de las dimensiones de las varillas, la pendiente, y el tipo de celda que se instale. En este caso, se utilizaron estacas de hierro de entre 20 a 40 [cm], las cuales fueron puestas en cada una de las celdas en la dirección de extensión, y de dos en dos celdas en la dirección perpendicular. La geocelda extendida se muestra en la Figura 4-12.



Figura 4-11 Proceso de extensión de la Geocelda de Pistas de Prueba [29]



Figura 4-12 Geocelda Extendida Pistas de Prueba [29]

4.4.3 Traslape y Unión

La unión de las geoceldas se puede hacer mediante grapas galvanizadas y engrapadoras, y/o tornillos y tuercas galvanizadas (ver Figura 4-13). Un sistema de grapado es utilizado disponiendo de los paneles de forma adyacente, debiendo quedar a tope unas con otras y las secciones son unidas entre celdas contiguas. Las grapas son normalmente puestas usando una grapadora neumática, dotada con grapas tipo industrial. La conexión entre geoceldas adyacentes, en este caso, se hace con grapas galvanizadas de 16 [mm] mediante una engrapadora neumática.



Figura 4-13 Unión de Geoceldas [29]

Para la utilización de la engrapadora neumática se necesita de un compresor de aire (ver Figura 4-14), el cual, a su vez, requiere de un generador (ver Figura 4-15).



Figura 4-14 Compresor de Aire [29]



Figura 4-15 Generador Portátil [29]

4.4.4 Relleno

Las celdas se rellenan con la gravilla 3/8" o TM 10. El material de relleno es colocado con pala mecánica, con una altura de caída inferior a 1 [m] para evitar dañar las celdas, y de forma manual como se observa en la Figura 4-16. Luego, la gravilla es compactada mediante placa compactadora.



Figura 4-16 Llenado de Geocelda con gravilla mediante pala mecánica en Pistas de Prueba [29]



Figura 4-17 Geocelda en proceso de llenado [29]

Luego de que las celdas se encuentran llenas del material, las estacas de anclaje son retiradas para evitar dañar los neumáticos de los vehículos que transiten.

Las especificaciones técnicas de Obras Civiles para este pavimento se encuentran dispuestas en el ANEXO V del presente documento.

4.5 ESTUDIO DE COSTOS

Para el estudio de costos se realizó un presupuesto considerando valores reales de los materiales de construcción, arriendo de maquinarias y costo de la mano de obra para la solución con las geoceldas propuestas, en sus variables de espesor de 75 [mm] y 100 [mm]. El valor del metro cuadrado de instalación de geocelda se calculó a partir del costo total de una pista de prueba, correspondiente a una superficie de 47 [m²]. El presupuesto entregado es válido para un mínimo de instalación de una plancha de geocelda, es decir, a un área total de 16, 7 [m²].

Adicionalmente a los presupuestos de las pistas con geoceldas de diferentes alturas de celdas y el caso con sólo gravilla, se presenta, a modo de comparación, el presupuesto para una solución de un pavimento de hormigón y el caso particular de veredas de hormigón.

Tabla 4-14 Precio unitario considerando geocelda de espesor 75 [mm] [29]

PRESUPUESTO GENERAL					
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PROTOTIPO DE PAVIMENTOS Y SUPERFICIES DRENANTES					
Item	Descripción	Un	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	TRABAJOS PREVIOS				\$ 262.930
1.1	Arriendo de Maquinaria				
1.1.1	Arriendo de Retroexcavadora	DIA	0,5	\$ 23.000	\$ 11.500
1.1.2	Arriendo de camión	DIA	1,0	\$ 80.000	\$ 80.000
1.1.3	Arriendo Placa Compactadora	DIA	2,0	\$ 7.800	\$ 15.600
1.1.4	Arriendo de Compresor	DIA	1,0	\$ 13.000	\$ 13.000
1.1.5	Arriendo de Generador	DIA	1,0	\$ 19.600	\$ 19.600
1.1.6	Arriendo de Egrapadora Neumática	DIA	1,0	\$ 7.000	\$ 7.000
1.2	Ensayos de Laboratorio de CBR y Proctor	GL	1	\$ 60.870	\$ 60.870
1.3	Mano de Obra	HH	32	\$ 1.730	\$ 55.360
2	SUBBASE				\$ 36.504
2.1	Subbase	m3	9,1	\$ 4.000	\$ 36.504
3	CAPA DE RODADURA				\$ 250.560
3.1	Geocelda	m2	46,8	\$ 4.300	\$ 201.240
3.2	Gravilla 3/8"	m3	4,6	\$ 10.000	\$ 45.630
3.3	Grapas	Un	1,0	\$ 3.690	\$ 3.690
	SUBTOTAL				\$ 549.994
	GASTOS GENERALES	12%			\$ 65.999
	UTILIDADES	18%			\$ 98.999
	TOTAL NETO				\$ 714.992
	IVA	19%			\$ 135.848
	TOTAL				\$ 850.840
	PRECIO X m2				\$ 15.278
	PRECIO x m2 (IVA incluido)				\$ 18.180

Tabla 4-15 Precio unitario considerando geocelda de espesor 100 [mm] [29]

PRESUPUESTO GENERAL					
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PROTOTIPO DE PAVIMENTOS Y SUPERFICIES DRENANTES					
Item	Descripción	Un	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	TRABAJOS PREVIOS				\$ 262.930
1.1	Arriendo de Maquinaria				
1.1.1	Arriendo de Retroexcavadora	DIA	0,5	\$ 23.000	\$ 11.500
1.1.2	Arriendo de camión	DIA	1,0	\$ 80.000	\$ 80.000
1.1.3	Arriendo Placa Compactadora	DIA	2,0	\$ 7.800	\$ 15.600
1.1.4	Arriendo de Compresor	DIA	1,0	\$ 13.000	\$ 13.000
1.1.5	Arriendo de Generador	DIA	1,0	\$ 19.600	\$ 19.600
1.1.6	Arriendo de Egrapadora Neumática	DIA	1,0	\$ 7.000	\$ 7.000
1.2	Ensayos de Laboratorio de CBR y Proctor	GL	1	\$ 60.870	\$ 60.870
1.3	Mano de Obra	HH	32	\$ 1.730	\$ 55.360
2	SUBBASE				\$ 36.504
2.1	Subbase	m3	9,1	\$ 4.000	\$ 36.504
3	CAPA DE RODADURA				\$ 296.190
3.1	Geocelda	m2	46,8	\$ 4.950	\$ 231.660
3.2	Gravilla 3/8"	m3	6,1	\$ 10.000	\$ 60.840
3.3	Grapas	Un	1,0	\$ 3.690	\$ 3.690
	SUBTOTAL				\$ 595.624
	GASTOS GENERALES	12%			\$ 71.475
	UTILIDADES	18%			\$ 107.212
	TOTAL NETO				\$ 774.311
	IVA	19%			\$ 147.119
	TOTAL				\$ 921.430
	PRECIO X m2				\$ 16.545
	PRECIO x m2 (IVA incluido)				\$ 19.689

Tabla 4-16 Precio unitario sin geocelda [29]

PRESUPUESTO GENERAL					
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PROTOTIPO DE PAVIMENTOS Y SUPERFICIES DRENANTES					
Item	Descripción	Un	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	TRABAJOS PREVIOS				\$ 223.330
1.1	Arriendo de Maquinaria				
1.1.1	Arriendo de Retroexcavadora	DIA	0,5	\$ 23.000	\$ 11.500
1.1.2	Arriendo de camión	DIA	1,0	\$ 80.000	\$ 80.000
1.1.3	Arriendo Placa Compactadora	DIA	2,0	\$ 7.800	\$ 15.600
1.2	Ensayos de Laboratorio de CBR y Proctor	GL	1	\$ 60.870	\$ 60.870
1.3	Mano de Obra	HH	32	\$ 1.730	\$ 55.360
2	SUBBASE				\$ 36.504
2.1	Subbase	m3	9,1	\$ 4.000	\$ 36.504
3	CAPA DE RODADURA				\$ 60.840
3.1	Gravilla 3/8"	m3	6,1	\$ 10.000	\$ 60.840
	SUBTOTAL				\$ 320.674
	GASTOS GENERALES	12%			\$ 38.481
	UTILIDADES	18%			\$ 57.721
	TOTAL NETO				\$ 416.876
	IVA	19%			\$ 79.206
	TOTAL				\$ 496.082
	PRECIO X m2				\$ 8.908
	PRECIO x m2 (IVA incluido)				\$ 10.600

Tabla 4-17 Precio unitario pavimento de hormigón [29]

PRESUPUESTO GENERAL					
PAVIMENTO DE HORMIGON e= 20[cm]					
Item	Descripción	Un	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total (UF)
1	TRABAJOS PREVIOS				\$ 372.988
1.1	Arriendo de Maquinaria				
1.1.1	Arriendo de Retroexcavadora	DIA	0,5	\$ 23.000	\$ 11.500
1.1.2	Arriendo de camión	DIA	1,0	\$ 80.000	\$ 80.000
1.1.3	Arriendo Placa Compactadora	DIA	2,0	\$ 7.800	\$ 15.600
1.2	Mano de Obra				
1.2.1	Concretero Vibrador	HH	16,0	\$ 3.060	\$ 48.960
1.2.2	Concretero Vibrador Ayudante	HH	16,0	\$ 1.950	\$ 31.200
1.2.3	Jornalero	HH	32,0	\$ 1.730	\$ 55.360
1.3	Ensayos de Laboratorio de CBR y Proctor	GL	1,0	\$ 60.870	\$ 60.870
1.4	Preparación terreno, escarif. y compact.	m2	46,8	\$ 1.485	\$ 69.498
2	BASES GRANULARES				\$ 91.260
2.1	Subbase Granular, CBR ≥ 80%	m3	9,13	\$ 10.000	\$ 91.260
3	PAVIMENTOS DE HORMIGÓN				\$ 752.800
3.1	Hormigón	m3	9,36	\$ 80.000	\$ 748.800
3.2	Pérdidas	%	5%	\$ 80.000	\$ 4.000
	SUBTOTAL				\$ 1.217.048
	GASTOS GENERALES	12%			\$ 146.046
	UTILIDADES	18%			\$ 219.069
	TOTAL NETO				\$ 1.582.162
	IVA	19%			\$ 300.611
	TOTAL				\$ 1.882.773
	PRECIO X m2				\$ 33.807
	PRECIO x m2 (IVA incluido)				\$ 40.230

Las tablas anteriores muestran que el valor de las pistas con geoceldas resultan ser considerablemente menos costosas que la construcción de pavimentos tradicionales. Si se compara los precios unitarios por metro cuadrado de la pista con EGA203, que es de \$15.278, con el costo por metro cuadrado de un pavimento de hormigón de 20 [cm] de espesor que es \$33.807, se observa que este último es cercano al 55% más caro que la pista con geocelda y gravilla. Y si se compara con la pista con EGA204 que tiene un precio por metro cuadrado de \$16.545, el pavimento de hormigón es más del 50% más caro que ésta.

5 TRABAJO DE CAMPO

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen la metodología de trabajo para la recopilación de información y las mediciones obtenidas a partir de las pruebas de campo realizadas.

Para la recopilación de datos se realizó un levantamiento topográfico mediante estación total, un instrumento electro-óptico que permite la obtención de coordenadas de puntos respecto a un sistema local o arbitrario. Estos datos son procesados por el software AutoCAD Civil 3d para obtener las superficies, tanto iniciales al momento de la implementación de las pistas, como al tiempo donde ya han transitado las cargas para cada una de las pistas de prueba.

Conjunto a lo anterior, se hace una inspección visual a las dos pistas reforzadas con geocelda y la pista sin refuerzo de geocelda.

En complemento a lo anterior se realiza un análisis a los modelos de las pistas en el software BISAR 3.0 de la Shell con el fin de conocer el comportamiento de las pistas ante el modelo de cargas descritos en el capítulo anterior. Este programa entrega parámetros de salida como esfuerzos, deflexiones y deformaciones.

El presente capítulo se divide en:

- Introducción.
- Sistema de Medición.
- Levantamiento Topográfico Inicial.
- Levantamiento Topográfico Después de 6 Semanas.
- Modelación de Pistas con Bisar 3.0.

5.2 SISTEMA DE MEDICIÓN

La metodología para la evaluación de la performance de las pistas de prueba se hace mediante la medición un parámetro de deterioro funcional y/o estructural, correspondiente a la deflexión de la superficie. La medida de deflexiones en la superficie de un pavimento, es de primordial importancia al evaluar la capacidad de transferencia de carga que un pavimento posee. El estudio de la deflexión de un pavimento es importante puesto que la forma y magnitud en que un pavimento deforma, es una función de del tráfico (tipo y volumen), sección (paquete) estructural del pavimento, temperatura y humedad. La deflexión de la superficie es medida como el desplazamiento vertical de esta superficie, ocasionado por una carga (estática o dinámica) aplicada.

En este proyecto las mediciones de deflexiones en los pavimentos se efectuaron mediante ensayos no destructivos, es por ello que se realiza la medida del perfil a través de estación total. Ver Figura 5-1.

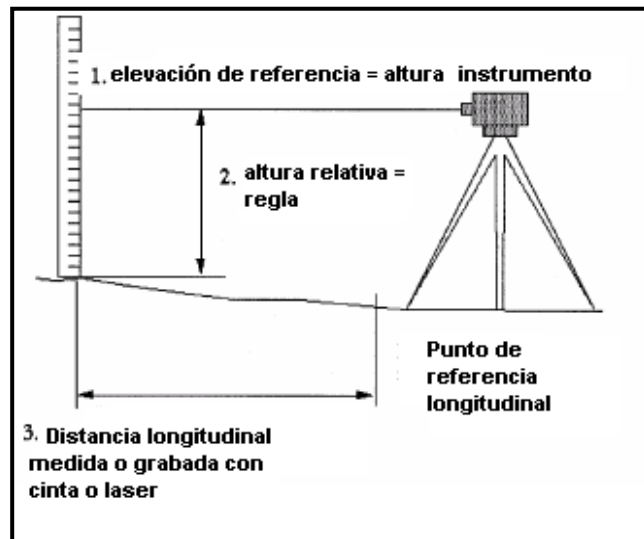


Figura 5-1 Medida de Perfil

La medición se lleva a cabo con una Nikon Nivo 5C (ver Figura 5-2) y prisma (ver Figura 5-3), teniendo un alcance de 5000 [m] y una precisión de 2+3 [ppm]. Las especificaciones del instrumento quedan detalladas en el ANEXO IV.



Figura 5-2 Modelo de Estación Total Nikon Nivo 5c [29]



Figura 5-3 Prisma de Estación Total [29]

Conociendo la mayor distancia entre el punto más alejado de la estación total y éste, la cual corresponde a 39,15 [m], la precisión de la mediación es cercana a 0,2 [mm].

Se medirán las deflexiones en los vértices de una malla ficticia sobre las geoceldas, espaciadas a aproximadamente 1,5 [m] en dirección al tránsito vehicular y entre 65 a 75 [cm] en dirección perpendicular, lo que resulta en 15 perfiles transversales para cada pista y 5 perfiles longitudinales en común.

5.3 LEVANTAMIENTO TOPOGÁFICO INICIAL

Una vez construidas las pistas de prueba (ver Figura 5-4, Figura 5-5 y Figura 5-6), se realizó un levantamiento topográfico de las tres pistas de prueba construidas con el objetivo de tener información referente una vez comience a circular tránsito por ellas.



Figura 5-4 Pista de Prueba Construida con Geocelda de Espesor 100 [mm] [29]



Figura 5-5 Pista de Prueba Construida con Geocelda de Espesor 75 [mm] [29]



Figura 5-6 Pista de Prueba Construida sin Geocelda [29]

De lo anterior, para las mediciones de datos se utilizaron los puntos en 15 perfiles transversales a lo largo de 5 ejes longitudinales por pista; la pista reforzada con geoceldas de 100 [mm] de espesor, la pista reforzada con geoceldas de 75 [mm] de espesor y la pista sin reforzar. Con estos datos, se construyó una superficie para cada pista mediante el software AutoCAD Civil 3D 2015, de las cuales se obtuvieron los perfiles transversales para cada una de ellas (ver Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9)

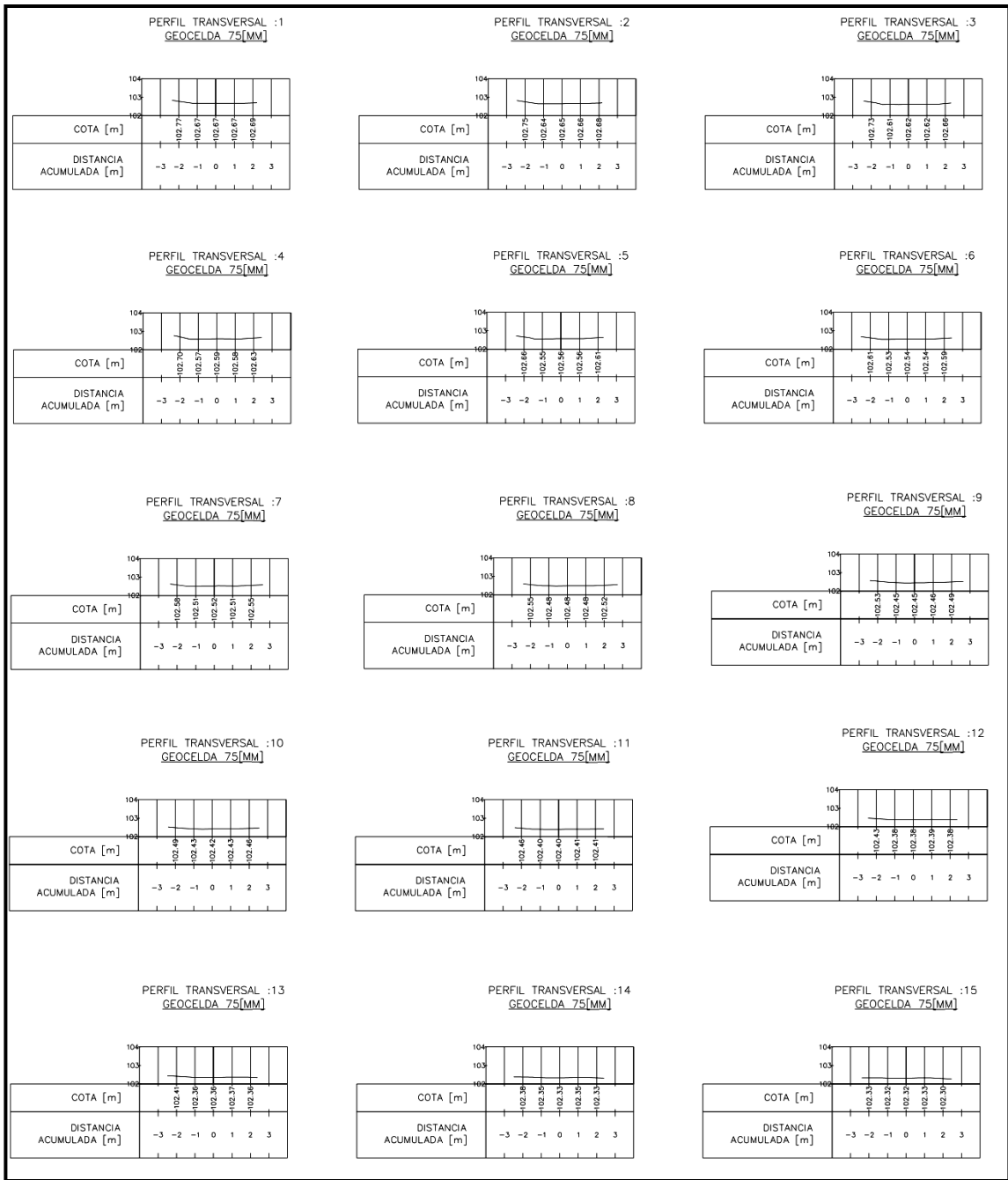


Figura 5-7 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 75 [mm] inicial [29]

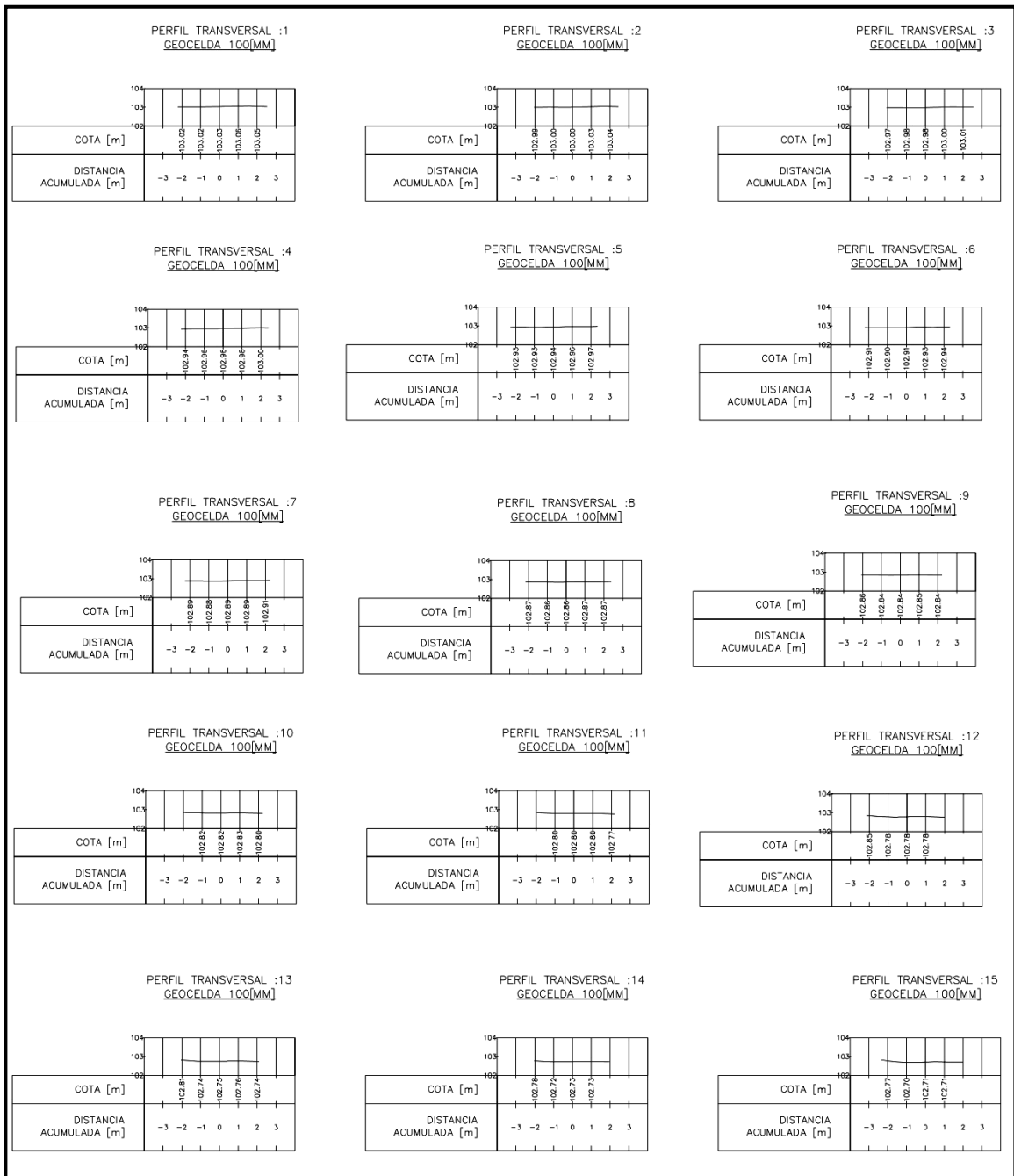


Figura 5-8 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 100 [mm] inicial

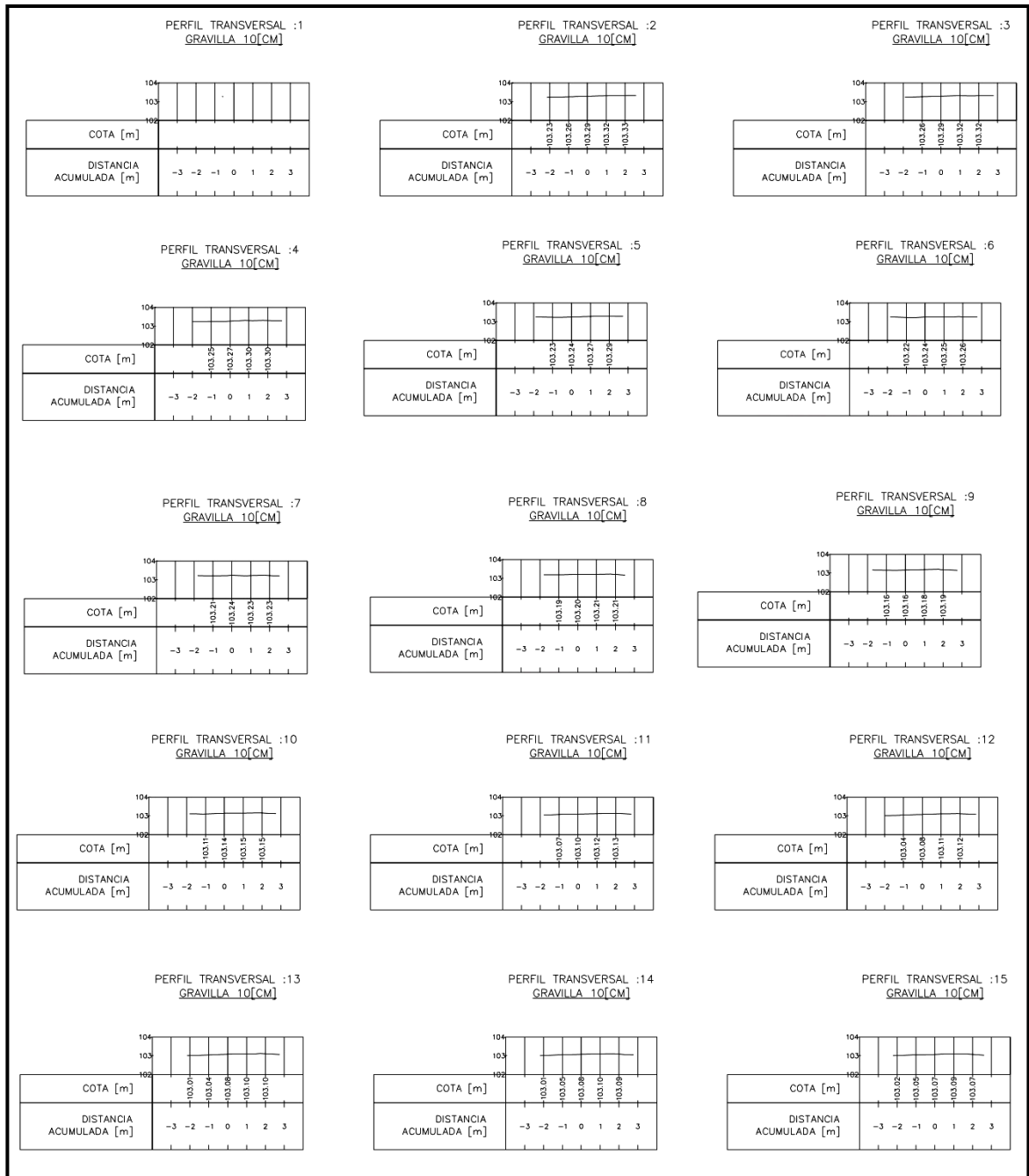


Figura 5-9 Perfiles transversales de pista sin geocelda inicial [29]

Después de una semana de tránsito de camiones cargados provenientes de la planta de áridos NAJAR por sobre las pistas de pruebas, se hace una inspección visual donde se observa claramente como las geoceldas están ligeramente aplastadas, lo que se debe esencialmente al desprendimiento del material pétreo superficial dentro de las geoceldas. En las Figura 5-10 y Figura 5-11 se puede observar la deformación de las celdas.



Figura 5-10 Pista con geocelda de espesor 75[mm] después de una semana de tránsito [29]



Figura 5-11 Pista con geocelda de espesor 100[mm] después de una semana de tránsito [29]

El desprendimiento de material producido resulta a que el material de relleno, la gravilla de 3/8", no es un material cohesivo, ya que, si bien la geocelda es capaz de proporcionar un confinamiento lateral, no puede suministrar confinamiento de forma vertical total.

Sin embargo, la pista de prueba sin refuerzo de geocelda, presenta claramente huecos, baches y corrimiento del material, como muestra la Figura 5-12.



Figura 5-12 Pista de prueba sin refuerzo de geocelda [29]

5.4 LEVANTAMIENTO TOPOGÁFICO DESPUÉS DE 6 SEMANAS

Las siguientes mediciones se realizaron a la semana 6 desde la implementación de estas pistas de prueba, por donde pasaron un total de 180 camiones con una carga de 20 [T] y 10 camiones con cargas de varían por debajo de las 10 [T]. Visualmente, se aprecia el aumento en el aplastamiento de las celdas y más desprendimiento del material como se observa en las siguientes Figura 5-13, Figura 5-14 y Figura 5-15.



Figura 5-13 Pista con geocelda de 100[mm] después de 6 semanas de tránsito [29]



Figura 5-14 Pista con geocelda de 75 [mm] después de 6 semanas de tránsito [29]



Figura 5-15 Geocelda deformada [29]

A pesar de la leve deformación que se presenta en ambas pistas reforzadas, éstas no dan indicios de baches, huecos ni grandes irregularidades, mostrando una superficie firme, pareja y de una buena calidad de tránsito.

Para la pista sin geocelda, durante este período de tiempo de 6 semanas, la empresa se vio obligada a recargar la pista, debido a las grandes deformaciones y huecos que se habrían producido.

Se realizó un levantamiento topográfico luego de 6 semanas de tránsito, y los perfiles transversales obtenidos para este tiempo y para cada pista se observan las Figura 5-16, Figura 5-17 y Figura 5-18.

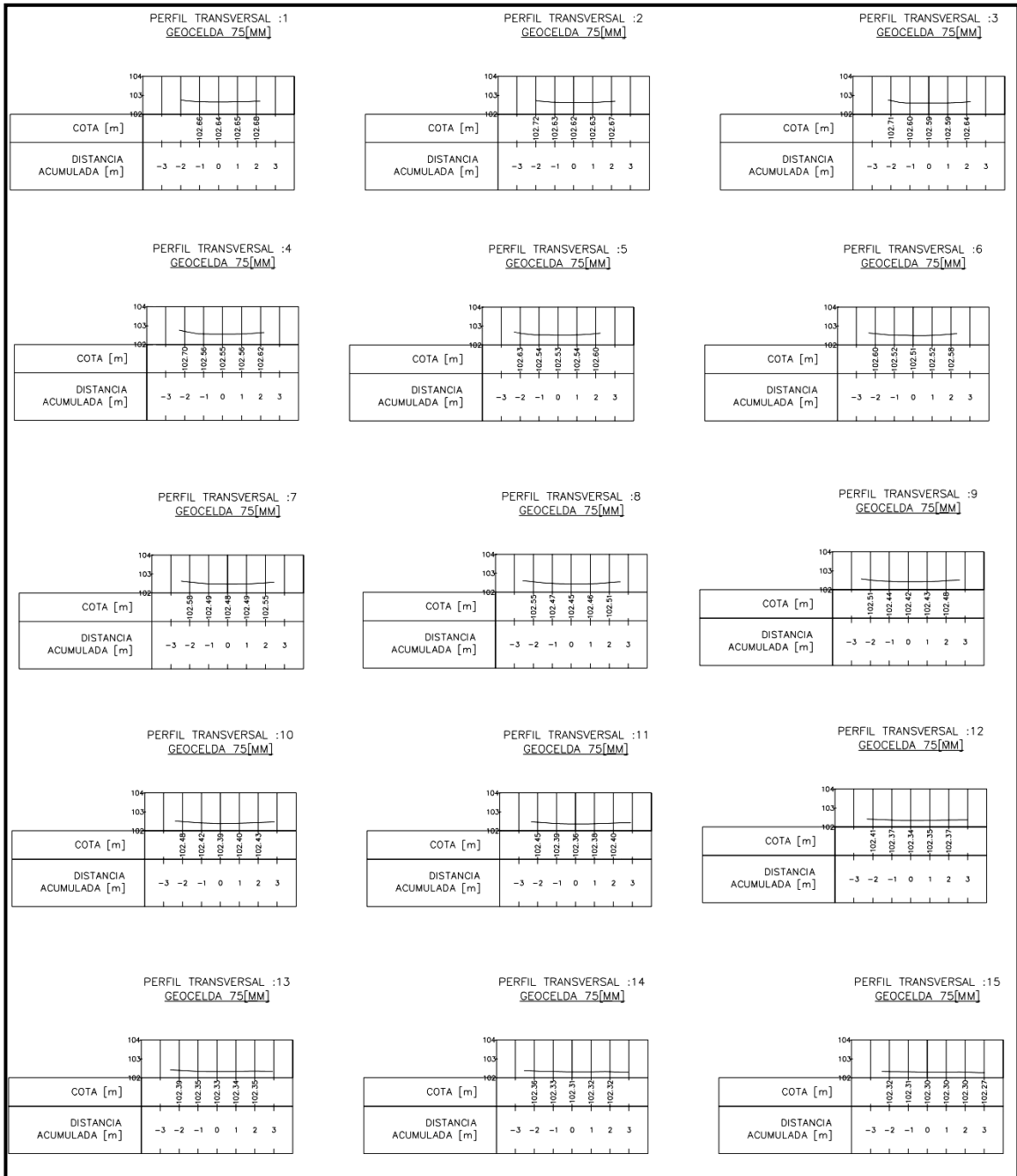


Figura 5-16 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 75 [mm] semana 6 [29]

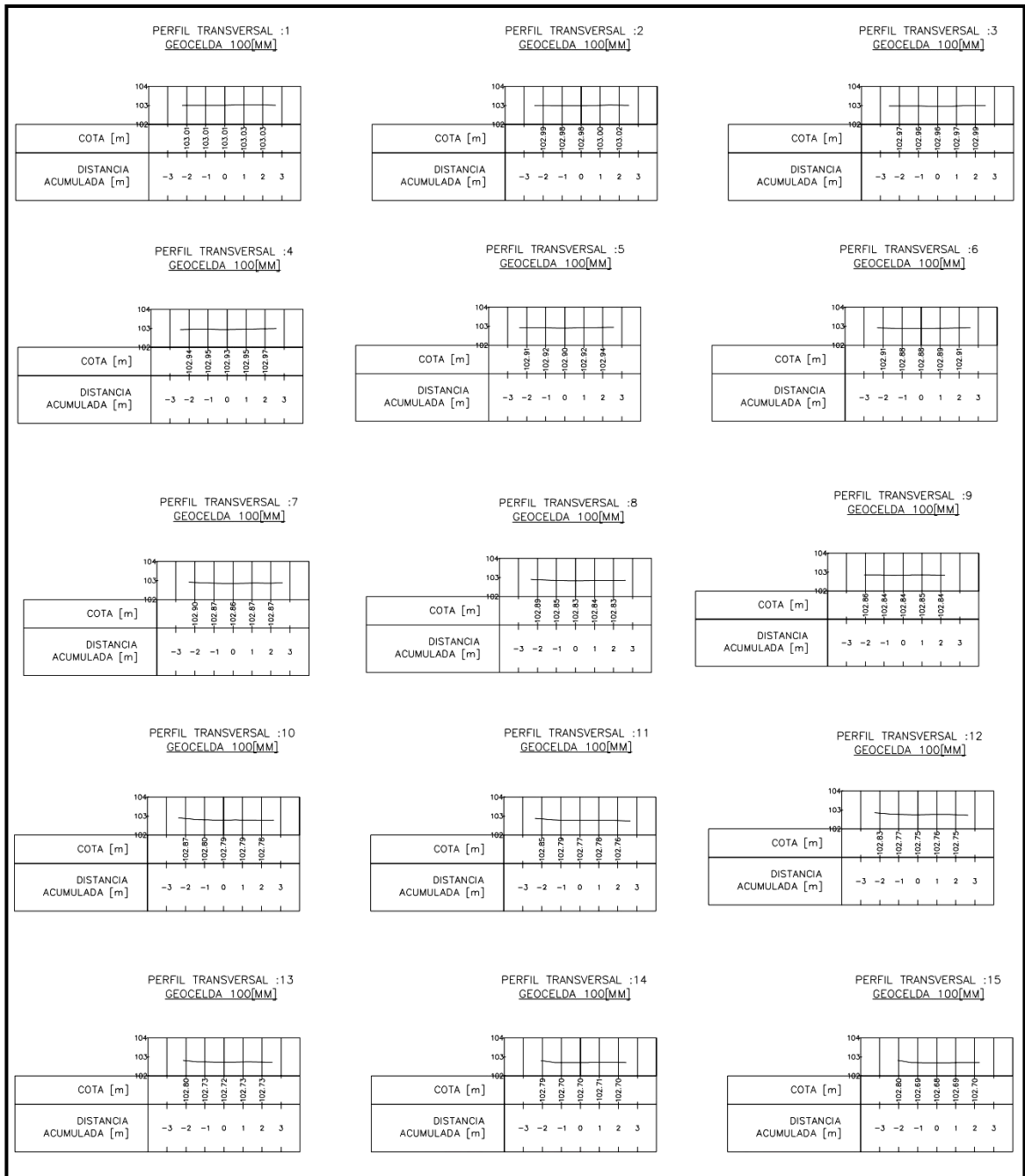


Figura 5-17 Perfiles transversales de pista con geocelda de espesor 100 [mm] semana

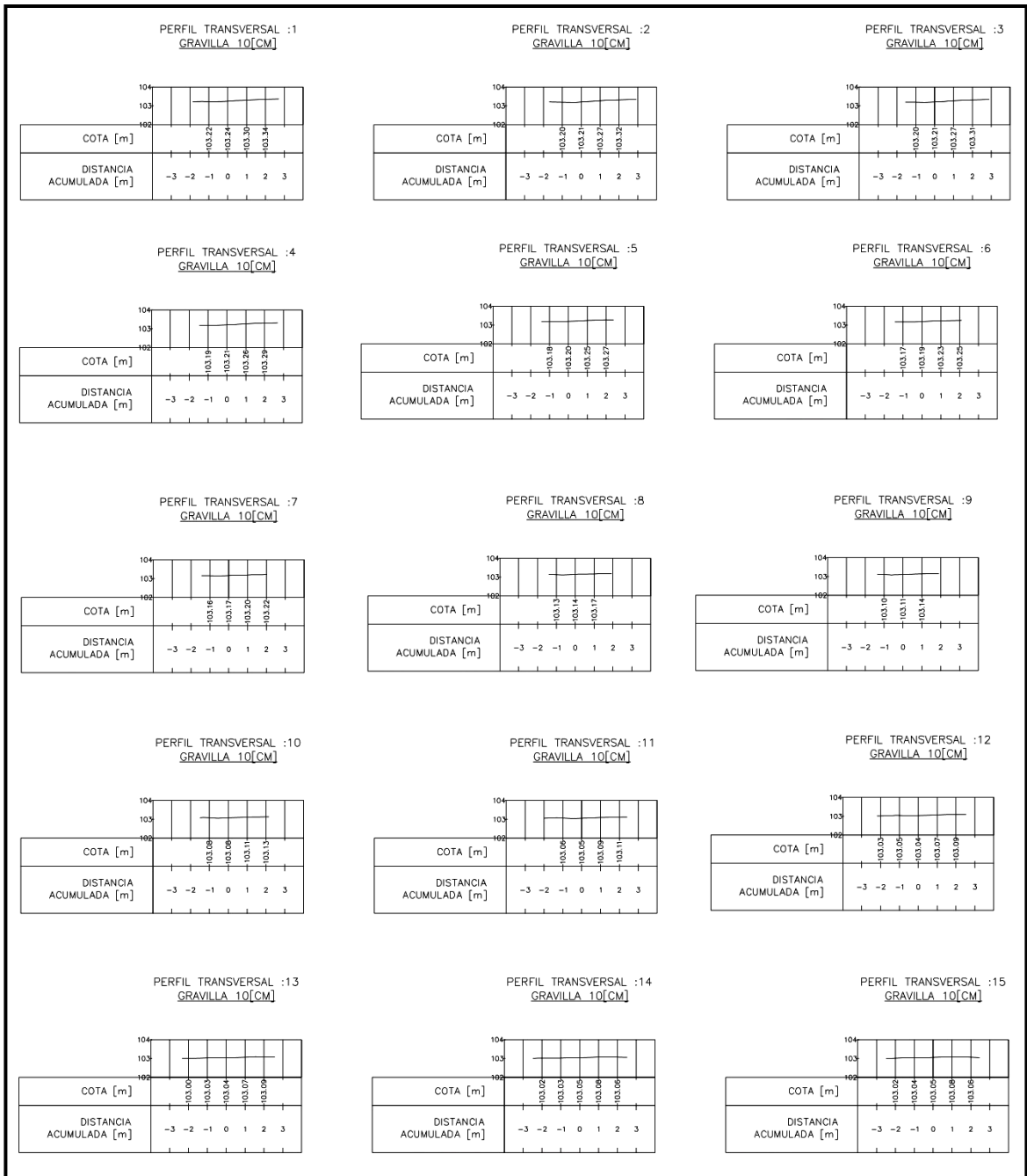


Figura 5-18 Perfiles transversales de pista sin geocelda semana 6 [29]

En las tablas Tabla 5-1, Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se expone los perfiles mostrados anteriormente, con las mediciones topográficas de las deflexiones de cada pista de prueba, inicial y al cabo de 6 semanas de tránsito.

Tabla 5-1 Deflexiones de pista con geocelda de espesor 75 [mm] [29]

Perfiles Transversales [m]	Perfiles Longitudinales [m]									
	0		1		2		3		4	
	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6
1			102,67	102,66	102,67	102,64	102,67	102,65	102,69	102,68
2	102,75	102,72	102,64	102,63	102,65	102,62	102,66	102,63	102,68	102,67
3	102,73	102,71	102,61	102,6	102,62	102,59	102,62	102,59	102,66	102,64
4	102,7	102,7	102,57	102,56	102,59	102,55	102,58	102,56	102,62	102,62
5	102,66	102,63	102,55	102,54	102,56	102,53	102,56	102,54	102,61	102,6
6	102,61	102,6	102,53	102,52	102,54	102,51	102,54	102,52	102,59	102,58
7	102,58	102,58	102,51	102,49	102,52	102,48	102,51	102,49	102,55	102,55
8	102,55	102,55	102,48	102,47	102,48	102,45	102,48	102,46	102,52	102,51
9	102,53	102,51	102,45	102,44	102,45	102,42	102,46	102,43	102,49	102,48
10	102,49	102,48	102,43	102,42	102,42	102,39	102,43	102,4	102,46	102,43
11	102,46	102,45	102,4	102,39	102,4	102,36	102,41	102,38	102,41	102,4
12	102,43	102,41	102,38	102,37	102,38	102,34	102,39	102,35	102,38	102,37
13	102,41	102,39	102,36	102,35	102,36	102,33	102,37	102,34	102,36	102,35
14	102,38	102,36	102,35	102,33	102,33	102,31	102,35	102,32	102,33	102,32
15	102,33	102,32	102,32	102,31	102,32	102,3	102,33	102,3	102,3	102,27

Tabla 5-2 Deflexiones de pista con geocelda de espesor 100 [mm] [29]

Perfiles Transversales [m]	Perfiles Longitudinales [m]									
	0		1		2		3		4	
	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6
1	103,02	103,01	103,02	103,01	103,03	103,01	103,06	103,03	103,05	103,03
2	102,99	102,99	103	102,98	103	102,98	103,03	103	103,04	103,02
3	102,97	102,97	102,98	102,96	102,98	102,96	103	102,97	103,01	102,99
4	102,94	102,94	102,96	102,95	102,96	102,93	102,98	102,95	103	102,97
5	102,93	102,91	102,93	102,92	102,94	102,9	102,96	102,92	102,97	102,94
6	102,91	102,91	102,9	102,88	102,91	102,88	102,93	102,89	102,94	102,91
7	102,89	102,9	102,88	102,87	102,89	102,86	102,89	102,87	102,91	102,87
8	102,87	102,89	102,86	102,85	102,86	102,83	102,87	102,84	102,87	102,83
9	102,86	102,88	102,84	102,82	102,84	102,81	102,85	102,82	102,84	102,81
10			102,82	102,8	102,82	102,79	102,83	102,79	102,8	102,78
11			102,8	102,79	102,8	102,77	102,8	102,78	102,77	102,76
12	102,85	102,83	102,78	102,77	102,78	102,75	102,78	102,76		
13	102,81	102,8	102,74	102,73	102,75	102,72	102,76	102,73	102,74	102,73
14	102,78	102,79	102,72	102,7	102,73	102,7	102,73	102,71		
15	102,77	102,8	102,7	102,69	102,71	102,68	102,71	102,69		

Tabla 5-3 Deflexiones de pista sin geocelda [29]

Perfiles Transversales [m]	Perfiles Longitudinales [m]									
	0		1		2		3		4	
	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6	Semana 0	Semana 6
1										
2			103,26	103,2	103,29	103,21	103,32	103,27	103,33	103,32
3			103,26	103,2	103,29	103,21	103,32	103,27	103,32	103,31
4			103,25	103,19	103,27	103,21	103,3	103,26	103,3	103,29
5			103,23	103,18	103,24	103,2	103,27	103,25	103,29	103,27
6			103,22	103,17	103,24	103,19	103,25	103,23	103,26	103,25
7			103,21	103,16	103,24	103,17	103,23	103,2	103,23	103,22
8			103,19	103,13	103,2	103,14	103,21	103,17		
9			103,16	103,1	103,16	103,11	103,18	103,13		
10			103,11	103,08	103,14	103,08	103,15	103,11	103,15	103,13
11			103,07	103,06	103,1	103,05	103,12	103,09	103,13	103,11
12			103,04	103,05	103,08	103,04	103,11	103,07	103,12	103,09
13	103,01	103	103,04	103,03	103,08	103,04	103,1	103,07	103,1	103,09
14	103,01	103,02	103,05	103,03	103,08	103,05	103,1	103,08	103,09	103,06
15	103,02	103,02	103,05	103,04	103,07	103,05	103,09	103,08	103,07	103,06

En la pista reforzada con geoceldas de 100 [mm] de espesor, se observa que se obtienen valores de deflexión negativos, lo que significa que hubo un aumento en la altura de la rasante, lo cual, en este caso, se produjo en el borde exterior de la pista (ver Tabla 6-3 y Tabla 5-2, eje 0), donde la rasante se encuentra en un nivel más bajo que el del terreno natural, por lo que este aumento se explica como una caída del terreno natural en el borde. Es por ello que el cálculo de la deflexión promedio y su correspondiente desviación estándar, junto a la gráfica de la Figura 5-20 se realizan sin considerar este caso aislado.

Con el objetivo de complementar lo anterior, se realizan gráficos que representen la distribución de las deflexiones en centímetros de cada pista. Ver Figura 5-19, Figura 5-20 y Figura 5-21.

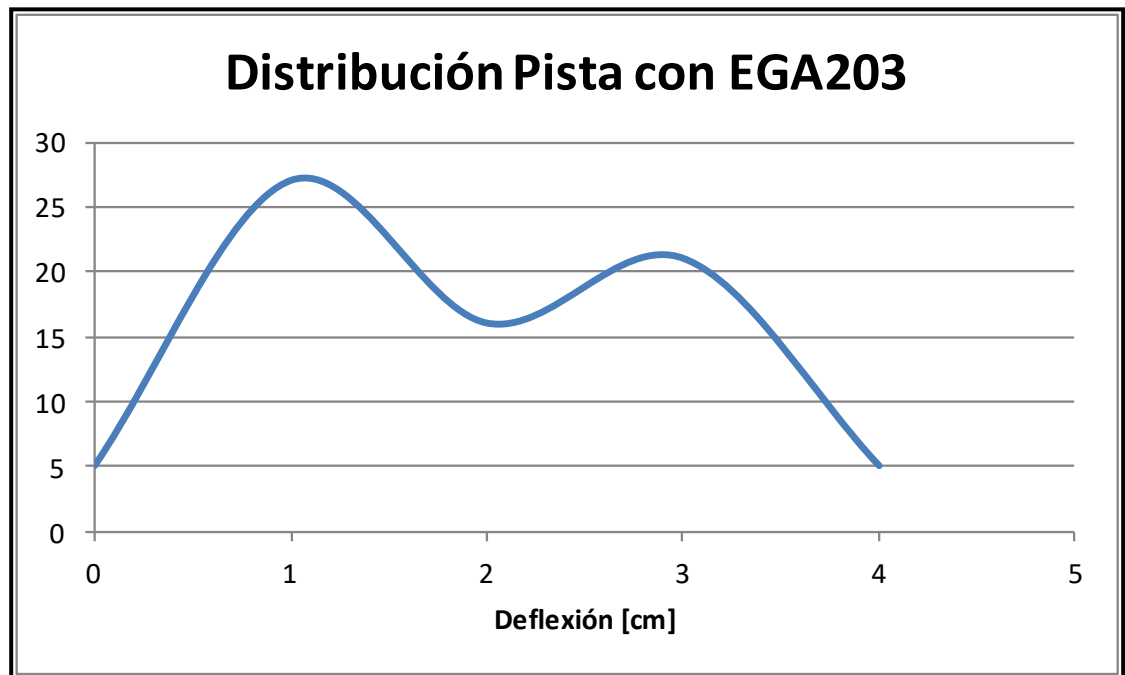


Figura 5-19 Distribución de deflexiones en pista con geocelda de espesor 75 [mm] [29]

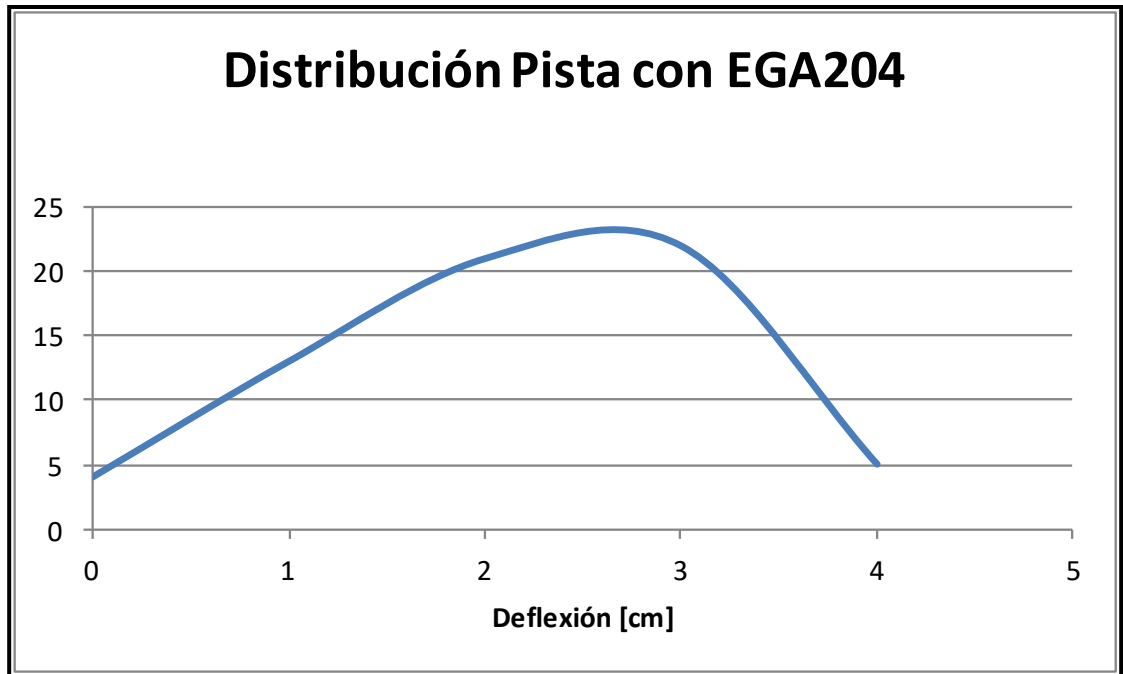


Figura 5-20 Distribución de deflexiones en pista con geocelda de espesor 100 [mm]
[29]

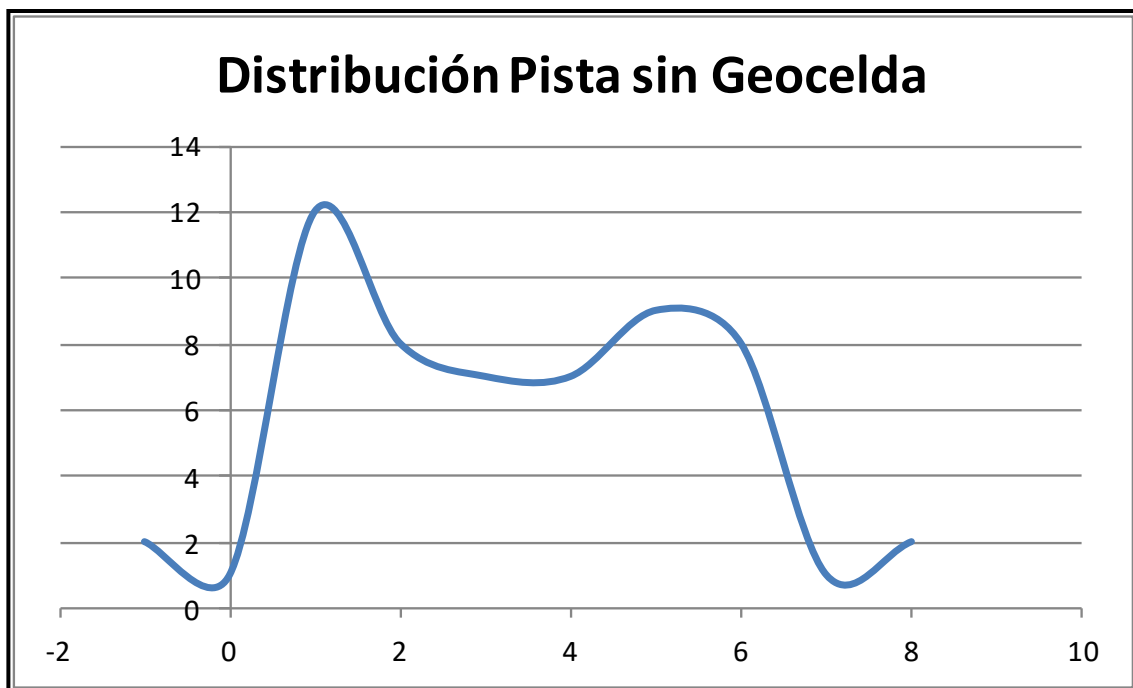


Figura 5-21 Distribución de deflexiones en pista sin geocelda [29]

5.5 MODELACIÓN DE PISTAS CON BISAR 3.0

Se realiza un análisis con las distintas alturas de celda con las que se disponen, 75 [mm] y 100 [mm], en un modelo de carga utilizando el programa computacional de análisis BISAR 3.0. Este programa contiene herramientas para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, además del análisis de las fuerzas horizontales presentes en la superficie y desplazamiento entre capas de pavimento. Para ello, se deben ingresar las cargas y su configuración, los datos de la estructura del pavimento, y los puntos de interés en los cuales se quiera analizar el comportamiento.

La especificación de posiciones e información completa acerca de las deformaciones, esfuerzos y deflexiones se encuentran en el ANEXO II.

Los parámetros de servicio del modelo estructural de referencia se muestran en la Tabla 5-4, obtenidos por medio del programa BISAR3.0 de la Shell con la información de las cargas, características de las capas y las dimensiones de la estructura del pavimento.

Tabla 5-4 Parámetros de servicio obtenidos de BISAR 3.0

Parámetro	Camión Tipo 1		Camión Tipo 2		Camión Tipo 3	
	75 [mm]	100 [mm]	75 [mm]	100 [mm]	75 [mm]	100 [mm]
Deformación Radial de tracción en base de capa de rodadura (μ strain)	319,684	426,882	368,191	469,165	335,593	448,164
Deformación Vertical de compresión sobre la subrasante (μ strain)	-940,200	-825,600	-883,500	-775,200	-987,000	-866,700
Esfuerzo Vertical de compresión sobre subrasante (MPa)	-0,231	-0,201	-0,218	-0,190	-0,242	-0,211
Deflexión en la superficie (mm)	0,528	0,505	0,616	0,590	0,567	0,543
Deflexión en la subrasante (mm)	0,365	0,346	0,402	0,386	0,417	0,398

De la Tabla 6-1 se identifica que las mayores deformaciones radiales de tracción se producen en la pista donde se utiliza la geocelda de altura 100 [mm], y el tipo de camión que produce los mayores valores corresponden al de tipo 2, justo bajo las ruedas delanteras. Por otro lado, los demás parámetros se muestran más desfavorables para la geocelda de altura 75 [mm]. Las mayores deformaciones y esfuerzos verticales en la subrasante los produce el camión tipo 3, los cuales ocurren entre las ruedas dobles traseras para los camiones tipo 1 y 2, y en el eje D-1 central para el camión tipo 3. Las deflexiones máximas las produce el camión 2, justo bajo las ruedas delanteras para la superficie y bajo entre las ruedas dobles del primer eje para la subrasante.

De acuerdo a lo anterior, las deformaciones que se presentarían en las pistas variarían en un rango menor 1 [mm], no obstante, la modelación en el programa

BISAR 3.0 considera que el material es homogéneo, isotrópico y que se comporta de manera elástica, lo cual no es representante fiel de la situación real. El programa tampoco considera la reiteración de cargas sobre las pistas, si no que entrega parámetros obtenidos de tan sólo una pasada de las cargas.

De lo anterior, se colige que la información obtenida mediante este programa no coincidiría o no resultaría ser similar a las obtenidas en las pruebas de campo.

6 ANÁLISIS DE MEDICIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo realizar un análisis del comportamiento de las pistas de prueba a través de los datos recopilados en el capítulo anterior.

Para las deflexiones medidas de cada pista se obtendrán parámetros estadísticos representativos como lo son el promedio o media aritmética y la desviación estándar con el objetivo de tener elementos cuantitativos concretos de comparación para evaluar la performance de las diferentes pistas.

En el presente capítulo, además, se realizará el cálculo de un parámetro de serviciabilidad con la finalidad de evaluar si el prototipo es aceptable para el tránsito vehicular. De lo anterior, se utilizará el índice de regularidad internacional (IRI), un valor estadístico que se utiliza para determinar la regularidad y la comodidad en la conducción, interpretándose como el valor del movimiento vertical acumulado del asiento del conductor del vehículo a lo largo de una distancia dada.

El presente capítulo se divide en:

- Introducción.
- Promedio y Desviación Estándar de Deflexiones.
- Índice de Regularidad Internacional (IRI).

6.2 PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE DEFLEXIONES

Los datos de deflexión de las tres pistas de prueba se obtuvieron mediante la realización de una topografía de la superficie recién instalada y otra después de 6 semanas del paso del tránsito vehicular.

En la Tabla 6-1 Resumen de mediciones [29]Tabla 6-1 se muestra el resumen de los datos obtenidos de las mediciones.

Tabla 6-1 Resumen de mediciones [29]

Pista	Deflexión [cm]		
	Promedio	Desviación Estándar	Máxima
Con EGA203	1,9	1,1	4,0
Con EGA204	2,2	1,0	4,0
Sin Geocelda	3,4	2,2	8,0

De la Tabla 6-2Tabla 6-3, se observa que la pista sin geocelda presenta mayores deflexiones pese a la recarga de material que se realizó, y muestra deformaciones muy variables a lo largo y ancho de su rasante como queda reflejado en sus desviaciones estándar, llegando hasta 8 [cm] de deflexión en algunos lugares.

Tabla 6-2 Mediciones de ejes transversales [29]

Ejes	Con EGA203		Con EGA204		Sin Geocelda	
	Prom [cm]	Des. Est [cm]	Prom [cm]	Des. Est [cm]	Prom [cm]	Des. Est [cm]
1	1,7	1,0	1,8	0,8		
2	2,2	1,1	1,8	1,1	5,0	2,9
3	2,2	0,8	1,8	1,1	5,0	2,9
4	1,4	1,7	2,0	1,4	4,2	2,4
5	2,0	1,0	2,8	1,3	3,2	1,5
6	1,6	0,9	2,4	1,5	3,2	2,1
7	1,6	1,7	1,8	1,9	4,0	2,6
8	1,4	1,1	1,8	2,4	5,3	1,2
9	2,0	1,0	1,8	2,2	5,3	0,6
10	2,2	1,1	2,7	1,0	3,8	1,7
11	2,0	1,4	1,7	1,0	2,7	1,7
12	2,4	1,5	2,0	0,8	2,5	2,4
13	2,0	1,0	1,8	1,1	2,0	1,4
14	2,0	0,7	1,5	1,7	1,8	1,6
15	2,0	1,0	0,7	2,6	1,0	0,7

Por otro lado, las pistas reforzadas con geocelda tienen un mejor desempeño al poseer una deflexión máxima igual a la mitad de la originada en la pista sin reforzar, correspondiente a una deflexión promedio cercana a los 2 [cm] en ambos casos y una dispersión muy inferior a la de la pista sin geocelda.

Tabla 6-3 Mediciones de ejes longitudinales [29]

Ejes		0	1	2	3	4
Con EGA203	Prom [cm]	1,4	1,1	3,1	2,7	1,2
	Des. Est [cm]	1,0	0,4	0,6	0,6	0,9
Con EGA204	Prom [cm]	-0,2	1,4	2,9	2,9	2,5
	Des. Est [cm]	1,5	0,5	0,5	0,7	1,0
Sin Geocelda	Prom [cm]	0,0	3,7	5,2	3,4	1,6
	Des. Est [cm]	1,0	2,5	1,8	1,3	0,8

De la Tabla 6-3 se infiere que las vías suelen deformarse más significativamente en el centro de la pista (eje longitudinal central, 2), acentuándose en la pista sin refuerzo, ya que para las otras dos, la estructura de panal de abejas de las celdas es el principal agente que aporta la rigidez horizontal a la carpeta de rodadura, al no ser la gravilla un material cohesivo.

6.3 ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)

Se realiza un cálculo aproximado del IRI de las pistas. El índice de regularidad internacional (IRI) es un parámetro estadístico que se utiliza para determinar la regularidad y la comodidad en la conducción, interpretándose como el valor del movimiento vertical acumulado del asiento del conductor del vehículo a lo largo de una distancia dada. Matemáticamente se define como la relación entre la sumatoria de la diferencia de cotas (rugosidad) entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, IRI=0) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida en metros, por la distancia longitudinal de la muestra en kilómetros.

$$IRI = \frac{\sum |Cota\ perfil\ long\ teórico - Cota\ perfil\ long\ real|}{Distancia\ recorrida} \quad (\text{ec. 5.5.2(1)})$$

Los criterios de falla de los métodos de diseño mecanicistas utilizados no se relacionan con el concepto de serviciabilidad PSI o IRI tradicional, por lo cual se recomiendan los siguientes criterios de serviciabilidad: para los pavimentos de bajo

volumen de tránsito se recomienda un IRI inicial de máximo 3,0 [m/km] y un IRI terminal de máximo 8,0 [m/km], sin perjuicio de poder utilizar estándares más altos.

El nivel de serviciabilidad de los caminos de grava y tierra varía significativamente en cortos períodos de tiempo debido a diversos factores como por ejemplo una lluvia intensa, que puede hasta cortar un camino durante uno o más días.

Para el cálculo del IRI, se crea un perfil longitudinal teórico, por medio de una recta continua perfecta (IRI=0) utilizando la ec. 5.5.3(2)

$$Y - Y_1 = m * (X - X_1) \quad (\text{ec. 5.5.3(2)})$$

Donde (X_1, Y_1) es una posición conocida a lo largo de la pista y m es la pendiente. Ésta se determina a partir de la ecuación anterior en conjunto con dos pares de datos conocidos, en este caso los de las cotas iniciales y finales del largo de las pistas. Ver ec. 5.5.3(3) y Tabla 6-4.

$$m = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} \quad (\text{ec. 5.5.3(3)})$$

Tabla 6-4 Pendientes de recta teórica continua perfecta (IRI=0)

Ejes longitudinales		1			2			3		
T	Pista	Punto inicial	Punto final	Pendiente	Punto inicial	Punto final	Pendiente	Punto inicial	Punto final	Pendiente
Semana 0 inicial	EGA203	102,67	102,32	-0,022	102,67	102,32	-0,022	102,67	102,33	-0,022
	EGA204	103,02	102,7	-0,021	103,03	102,71	-0,021	103,06	102,71	-0,022
	Sin Geocelda	103,26	103,05	-0,014	103,29	103,07	-0,015	103,32	103,09	-0,016
Semana 6 final	EGA203	102,66	102,31	-0,022	102,64	102,30	-0,022	102,65	102,30	-0,022
	EGA204	103,01	102,69	-0,021	103,01	102,68	-0,021	103,03	102,69	-0,022
	Sin Geocelda	103,20	103,04	-0,011	103,21	103,05	-0,011	103,27	103,08	-0,013

Luego se procede a obtener la diferencia en valor absoluto entre el perfil teórico y real en un mismo punto (X), para finalmente aplicar la ec. 5.5.2(1) del IRI. Ver Tabla 6-5, Tabla 6-6 y Tabla 6-7.

Tabla 6-5 Diferencia cotas entre perfil teórico y perfil real en [m] e IRI para semana 0

P.T	1			2			3			X [m]
	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	
1	0,000	0,000		0,000	0,000		0,000	0,000		0,0
2	0,005	0,003	0,000	0,005	0,007	0,000	0,014	0,005	0,000	1,1
3	0,010	0,006	0,016	0,000	0,004	0,017	0,001	0,010	0,018	2,2
4	0,025	0,009	0,022	0,005	0,001	0,014	0,017	0,005	0,015	3,3
5	0,020	0,001	0,018	0,010	0,001	0,001	0,013	0,000	0,003	4,5
6	0,015	0,006	0,025	0,005	0,006	0,018	0,009	0,005	0,001	5,6
7	0,010	0,003	0,031	0,000	0,003	0,035	0,014	0,020	0,002	6,7
8	0,015	0,000	0,027	0,015	0,010	0,012	0,020	0,015	0,004	7,8
9	0,020	0,003	0,013	0,020	0,007	0,012	0,016	0,010	0,016	8,9
10	0,015	0,006	0,021	0,025	0,004	0,015	0,021	0,005	0,028	10,0
11	0,020	0,009	0,045	0,020	0,001	0,038	0,017	0,010	0,041	11,1
12	0,015	0,011	0,058	0,015	0,001	0,041	0,013	0,005	0,033	12,3
13	0,010	0,006	0,042	0,010	0,006	0,024	0,009	0,000	0,025	13,4
14	0,005	0,003	0,016	0,015	0,003	0,007	0,004	0,005	0,008	14,5
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,6
IRI	11,9	4,1	23,1	9,3	3,6	14,8	10,8	6,1	13,4	

Tabla 6-6 Diferencia cotas entre perfil teórico y perfil real en [m] e IRI para semana 6

P.T.	1			2			3			X [m]
	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	
1	0,000	0,000		0,000	0,000		0,000	0,000		0,0
2	0,005	0,007	0,000	0,004	0,006	0,000	0,005	0,006	0,000	1,1
3	0,010	0,004	0,012	0,001	0,003	0,012	0,010	0,011	0,015	2,2
4	0,025	0,009	0,015	0,017	0,009	0,025	0,015	0,007	0,019	3,3
5	0,020	0,001	0,017	0,013	0,016	0,027	0,010	0,013	0,024	4,5
6	0,015	0,016	0,019	0,009	0,012	0,029	0,005	0,019	0,018	5,6
7	0,020	0,003	0,022	0,014	0,009	0,022	0,010	0,014	0,003	6,7
8	0,015	0,000	0,004	0,020	0,015	0,004	0,015	0,020	0,012	7,8
9	0,020	0,007	0,014	0,026	0,011	0,014	0,020	0,016	0,038	8,9
10	0,015	0,004	0,022	0,031	0,008	0,032	0,025	0,021	0,043	10,0
11	0,020	0,009	0,029	0,037	0,004	0,049	0,020	0,007	0,048	11,1
12	0,015	0,011	0,027	0,033	0,001	0,047	0,025	0,003	0,054	12,3
13	0,010	0,006	0,035	0,019	0,007	0,035	0,010	0,009	0,039	13,4
14	0,005	0,013	0,022	0,014	0,004	0,012	0,005	0,004	0,015	14,5
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,6
IRI	12,5	5,8	16,4	15,3	6,7	19,7	11,2	9,6	22,7	

Tabla 6-7 IRI inicial y final para perfiles longitudinales 1, 2 y 3

En [m/Km]	1			2			3		
	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	EGA203	EGA204	Sin Geocelda	EGA203	EGA204	Sin Geocelda
IRI inicial	11,9	4,1	23,1	9,3	3,6	14,8	10,8	6,1	13,4
IRI final	12,5	5,8	16,4	15,3	6,7	19,7	11,2	9,6	22,7

Con respecto a los valores entregados en la Tabla 6-7, se observa que ninguna de las tres pistas cumplió con el IRI inicial de 3,0 [m/km], mas este aspecto no es condicionante, ya que la construcción de las pistas con geocelda sugiere dejar una fina capa de material de relleno por sobre la altura de la celda de entre 0,5-1,0 [cm] de

espesor, y de modo que la gravilla no posee capacidad de cohesión, esta capa se convierte en material suelto sin posibilidad de compactación.

Sin embargo, el IRI final sí representa importancia debido a que la superficie se encuentra a ras de celda, y la pista que mostró mejor comportamiento de acuerdo a este parámetro, fue la reforzada con geocelda de espesor de 100 [mm], donde dos de sus tres perfiles longitudinales cumplieron con el requisito de un IRI menor a 8 [m/km]

7 CONCLUSIONES

En referencia al desarrollo del presente trabajo, se pudo verificar que la utilización de geoceldas en la aplicación de pavimentos es una herramienta en desarrollo y que presenta beneficios tanto técnicos como económicos para zonas aisladas donde no es posible tanto por condiciones geográficas, disponibilidad de recursos y condiciones presupuestarias la aplicación de proyectos con tecnologías tradicionales como son los pavimentos de hormigón y pavimentos flexibles.

No obstante, lo anterior se pudo verificar que en la actualidad en nuestro país la utilización de geoceldas aún está limitada principalmente a proyectos mineros y obras menores de control de taludes, siendo su aplicación en refuerzos de obras viales en menor escala.

Otro punto importante hace referencia a que para su instalación y diseño no se requiere maquinaria ni mano de obras especializada, lo cual es un punto relevante al en caso de zonas donde no se dispone de maquinaria de alta tecnología ni personal especializado como es la provincia de Chiloé.

En complemento se puede indicar que el desarrollo del presente proyecto considero la utilización de materiales excedentes de la producción normal de agregados de las plantas de áridos de la Empresa Najar, de lo anterior uno de los objetivos era dar un valor comercial a estos productos para ser utilizado en un tipo de pavimento drenante aplicable a las condiciones propias de la provincia de Chiloé, de lo anterior se puede indicar que el objetivo se cumplió, todo lo anterior fue posibles gracias a la cooperación entre la empresa y la Universidad Técnica Federico Santa María a través de su departamento de Obras Civiles mediante el proyecto de Innovación CORFO.

En el caso específico de las geoceldas se pudo identificar que existen diferentes proveedores a nivel mundial como nacional donde los diferentes fabricantes producen diferentes segmentos para diferentes aplicaciones donde su fabricación y desarrollo se encuentran enmarcadas claramente bajo normas ASTM.

De lo anterior para desarrollo del presente y dada las limitantes de productos existentes a nivel nacional, se tuvo que elegir entre los modelos de geoceldas existentes en el mercado como son las geoceldas EGA20, EGA30, EGA40, utilizándose específicamente en el presente estudio el tipo EGA20, quien es la que posee menor área de celda dentro de las disponibles. Es importante destacar que existen productos

específicos para mejoramiento de firmes y rodaduras como son las geoceldas fabricadas por la empresa Americana Envirogrid, denominadas EnviroGrid Paver, las cuales a diferencia de los típicos EGA20, EGA30, EGA40, estas celdas poseen bolsillos más pequeños, proporcionando mayor rigidez a la capa. No obstante, este producto aún no estaba disponible en nuestro país, pero se considera que permitiría generar un mejor refuerzo a menor costo, lo anterior se justifica dado que la geocelda a través de estructura de panal confina las partículas de un suelo entre los bolsillos los cuales previenen el esparcimiento lateral del suelo lo que permite que la capa de suelo se comporte como un colchón rígido y por lo tanto las cargas son distribuidas sobre un área más extensa.

Para el diseño de pavimento, además de las características de la geocelda, se tuvo que conocer las propiedades que inciden en el diseño de este prototipo de pavimento. Estas, corresponden a las mismas que inciden en un diseño de pavimento flexible, las cuales son el módulo resiliente, la razón de poisson y el CBR de cada una de las capas. El efecto del refuerzo con geocelda se ve reflejado directamente en el aumento del módulo resiliente de la capa de rodadura, la cual corresponde a la capa reforzada. Lo anterior, se modela mediante un coeficiente denominado Factor de Mejoramiento de Módulos o MIF (Modulus Improvement Factor). Este factor es de carácter empírico y se define como la razón entre el módulo resiliente del material con refuerzo de geocelda y el módulo resiliente del material sin refuerzo de geocelda. Como se menciona en los capítulos 3.2.1.1 y 4.3.1 debido a estudios anteriores se han obtenido curvas empíricas del calor del MIF, por lo que de ellas se pueden obtener estimaciones de MIF de otros materiales. Resultado de lo anterior se hace presente el desafío para generar nuevas investigaciones en los cuales se puedan definir estos valores con estudios a nivel nacional.

Con el fin de conocer el comportamiento de la geocelda como refuerzo de la capa superficial del pavimento, en este proyecto se diseñaron tres pistas diferentes estructuralmente. Se varió el espesor de la capa de rodadura con gravilla con geocelda de las pistas, una con 100 [mm] y la otra con 75 [mm]. Además, se incluyó en el análisis, la performance de una pista sin refuerzo y así comparar el comportamiento de una pista similar sin geocelda.

Las deflexiones que se presentan corresponden principalmente a las generadas en la superficie de la capa de rodadura, lo que lo relaciona directamente al

desprendimiento de la gravilla 3/8" y al ligero aplastamiento de las celdas. Esto corresponde a una falla funcional del pavimento, las cuales dependen de la calidad de la capa de rodadura, y no a alguna falla del tipo estructural.

Lo anterior, fue la causa principal de la inexactitud de los resultados que arrojó el programa BISAR3.0 de la Shell en cual se modeló el sistema estructural del prototipo. Si bien, el modelo se definió de acuerdo a investigaciones y experimentos anteriores, como un tipo de pavimento flexible que incluye el efecto de la geocelda mediante un factor de mejoramiento de módulo (MIF), apto tanto para suelos granulares como cohesivos, mas no fue capaz de prever que dicho modelo cumplía para capas inferiores del pavimento, donde la geocelda está protegida por otra capa, impidiendo el movimiento del material de relleno de forma vertical, y evitando toda posibilidad de contacto entre las celdas y el tránsito vehicular. Esta inadvertencia, se tradujo en la diferencia significativa entre las deflexiones en la superficie del pavimento que entregó el programa, las cuales variaban de 0,5-0,6 [mm], y de las mediciones obtenidas, que resultaron de alrededor de 1-4 [cm]. Cabe destacar que los datos recolectados de forma empírica no corresponden a deflexiones estructurales, sino más bien a desgaste de la superficie. Ante lo antes expuesto una solución viable a este problema sería considerar la colocación de un recubrimiento que impida que el material dentro de las celdas se salga, pudiendo ser este recubrimiento algún tipo de tratamiento superficial o lechada asfáltica, ya que estos tienen como objetivo proveer una adecuada resistencia a la acción abrasiva del tránsito, sellar grietas y otorgar una cubierta impermeable a la superficie. Sin embargo, es en este último punto donde se genera una disyuntiva, debido a que dentro del valor agregado que proponía este prototipo, era la utilización de la gravilla 3/8" como un material con una buena capacidad drenante, muy adecuado para la zona de estudio, por lo que el uso de alguna lechada asfáltica o tratamiento superficial suprimiría esta condición.

Con respecto a los resultados obtenidos de las mediciones, en la Tabla 6-1 se observa que la deflexión promedio para ambas pistas reforzadas con geoceldas es cercana a los 2 [cm], en tanto que para la pista sin refuerzo la deflexión promedio es de 3,4 [cm], a pesar de haber sido recargada durante el tiempo de las 6 semanas producto al mal estado en el que se encontraba, impidiendo el tránsito seguro de los camiones. Inclusive, la dispersión de las deflexiones en las pistas con geoceldas representada por la desviación estándar, es cercana a la mitad de la determinada en la

pista sin geocelda, traduciéndose como una superficie más confortable por la cual circular. Las deformaciones presentadas en la pista compuesta sólo por gravilla, son tan significativas que en algunas partes alcanzan hasta los 8 [cm] de profundidad, siendo que el total del espesor de la capa de rodadura es sólo de 10 [cm], lo que significa una pérdida de material pétreo cercano al 80%. Por otro lado, la deflexión máxima en las otras dos pistas reforzadas fue de 4 [cm]. Con ello, se ha podido comprobar que es efectivo el que estas geoceldas aumentan el confinamiento, distribuyendo de mejor manera los esfuerzos. Sin embargo, también se produjeron ligeras diferencias entre las pistas reforzadas con diferentes espesores de celda. La pista de 75 [mm] presentó una diferencia de cota superficial promedio menor que la otra pista, correspondiente a 1,9 [cm] y 2,2 [cm] respectivamente, mas la pista de 100 [mm] desarrolló un mejor comportamiento relacionado con la rugosidad de la superficie, como lo indican su desviación estándar en la Tabla 6-1 y sus IRI en la Tabla 6-7, siendo valores menores a los de la pista de 75 [mm]. Esto se interpreta como que la pista de 100 [mm] tuvo que asentarse más hasta conseguir una rasante más homogénea. No obstante, estas diferencias entre ellas son despreciables, ya que están sujetas a una serie de suposiciones (eliminación de casos aislados) y aproximaciones (estimación de un IRI), por lo que no se puede concluir como una mejor que la otra, incitando a la elección de la geocelda con menor espesor si se tuviese que construir una vía con este prototipo, por ser la opción de menor costo.

Por otra parte, se puede indicar que el prototipo cumple con su condición de superficie drenante, ya que en el lugar donde se emplazaron las pistas y durante el tiempo de estudio, hubo lluvias abundantes, donde las pistas estuvieron sometidas a condiciones invernales, empero éstas nunca aparecieron inundadas o mostraron algún deterioro evidente, ni siquiera después de 5 meses de finalizado del estudio. Con relación a la propuesta de mejoramiento de las condiciones de un camino básico, a pesar del desprendimiento superficial pareciese ser un gran problema, 5 meses después de terminado el monitoreo, el camino se muestra en buenas condiciones. No sucedieron desprendimientos significativos posteriores, ni presentaron baches y la geocelda no sufrió daños producto del contacto directo con los neumáticos de los camiones. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que las pistas fueron sometidas a tráfico pesado y que una de las pistas se situó sobre una pequeña pendiente, por lo que mejoren su desempeño si el camino donde se vaya a implementar, esté destinado a vehículos livianos.

En referencia a la evaluación de costos en base a la planificación de las pistas de prueba se pudo verificar que las pistas con geoceldas resultaron ser menos costosas en comparación a un pavimento tradicional. Lo anterior si se compara los precios unitarios por metro cuadrado obtenidos de la pista con EGA203, que es de \$15.278, con el costo por metro cuadrado de un pavimento de hormigón de 20 [cm] de espesor que es \$33.807, se observa que este último es cercano al 55% más caro que la pista con geocelda y gravilla. Y si se compara con la pista con EGA204 que tiene un precio por metro cuadrado de \$16.545, el pavimento de hormigón es más del 50% más caro que ésta.

Resultado a lo antes expuesto se puede indicar que desde el punto de vista técnico económica la aplicación de geoceldas podría ser una alternativa para la conservación de caminos básicos en zonas extremas, entendiéndose por conservación de caminos como los umbrales o límites permisibles de intervención (grados de deterioro funcional y estructural según la categoría de cada camino) y que están directamente asociadas al conjuntos de acciones de conservación, aplicadas de manera programada (niveles de TMDA o periódicamente), o por condición de respuesta, por lo que si se empleara una capa de recubrimiento asfáltico, el prototipo sería considerado como un cambio de estándar para dicho camino, implicando una evaluación del MIDEPLAN, y por lo tanto, mayor tiempo para que el proyecto se lleve a cabo.

En complemento se recomienda efectuar un nuevo estudio que contemple la posibilidad de adicionar algún recubrimiento asfáltico como ya fue mencionado, en conjunto con una evaluación costo-beneficio para conocer si es ventajoso el aumento de costos y la posible pérdida de la condición drenante en favor de una superficie más estable.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] DIRECCIÓN DE VIALIDAD. Red Vial Nacional Dimensionamiento y Características. Dirección de vialidad, subdirección de desarrollo, departamento de gestión vial, Chile. Diciembre 2014, editado Agosto 2015.
- [2] GOURAV Dhane, DHIRAJ Kumar, AKASH priyadarshee. Geocell: An Emerging Technique Of Soil Reinforcement In Civil Engineering Field. NIT Jalandhar, Departamento de Ingeniería Civil, India. (AETM'15).
- [3] ACCELERATED Pavement Testing of Geocell-reinforced Bases over Weak Subgrade por POKHAREK, Han [et. all]. University of Kansas (KU) and Kansas State University (KSU), USA. 2010.
- [4] CHOWDHURY Swaraj, SUMAN Shaki. A Review of Studies on Geocell-reinforced Foundation. Rourkela, NIT Rourkela, Departamento de Ingeniería Civil, India. 2015.
- [5] PAVCO. Manual de Diseño con Geosintéticos. 9ª Edición. Departamento de Ingeniería-Geosistemas Pavco, Bogotá DC, Colombia. Capítulo 7.
- [6] TERRACELL. Cellular Confinement System.
- [7] ENVIROGRID. Especificaciones Técnicas [En línea] <<http://www.geoproducts.org/>> [consulta: 2016]
- [8] TERRACELL. Cellular Confinement System: Design Guidelines for Ground Stabilitation.
- [9] CIDELSA. Geoceldas Sistemas de Confinamiento Celular.
- [10] PANAWEB. Diseño de calle con GeoCeldas. PanaWeb, Panamá.
- [11] GEOPRODUCTS. Manual de Diseño Estabilización De Suelos.
- [12] CENET. Geoceldas.
- [13] DUARTE, María, SIERRA, Valeria. Estudio Del Comportamiento De Un Material De Subrasante Típico De Bogotá Estabilizado Con Un Sistema De Geoceldas Ante La Aplicación De Ciclos De Carga Y Descarga Mediante Pruebas De Laboratorio. Tesis (Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Javeriana Facultad De Ingeniería Departamento De Ingeniería Civil Bogotá D.C. 2011.

- [14] GARNICA Anguas, Paul, CORREA, Angel. Conceptos Mecanicistas en Pavimentos. Publicación Técnica No 258 Sanfandila, Qro. 2004.
- [15] HENRY A. VERGARA B. Diseño de Pavimentos Flexibles. ECI, Colombia. 2004.
- [16] MOP de Panamá. Resolución No. 024-08. 2008.
- [17] PRESTO Geosystems. Load Support System Product Specification Csi-Format. USA. 2012.
- [18] GEOPRODUCTS. Guía de Diseño e Instalación de GeoCeldas 3D EnviroGrid para control de Erosión.
- [19] GEOWEB. Sistema De Confinamiento Geocelular. Catálogo de Productos.
- [20] DISPOSICIÓN de cargas <<http://www.transporteycargas.com/>> [consulta: 2017]
- [21] MINISTERIO de obras públicas. Guía De Diseño Estructural De Pavimentos Para Caminos De Bajo Volumen De Tránsito. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Chile. Enero 2002.
- [22] CADAVID Jáuregui, Belén. Modelado En Modelica De La Respuesta Estructural De Firmes. Memoria (Máster Ing. de Sistemas y Control). Universidad Complutense de Madrid y Universidad Nacional de Educación a Distancia, España. Septiembre 2014.
- [23] GEODETIC SAC. Especificaciones Técnicas de Estación Total [En línea] <<http://www.geodeticsac.com>> [Febrero 2017]
- [24] MINISTERIO de obras públicas. Manual de Carretera. MOP, DGOP, Dirección de Vialidad, Chile 2016.
- [25] MATHEW, Tom V., RAO, KV Krishna. Introduction to Transportation Engineering., NPTEL Web Course, India. 2006. Capítulo 7.
- [26] HUANG, Yang H. Pavement Analysis and Design. 2° Edición. University of Kentucky, Estados Unidos. 2004. Capítulo 6.
- [27] MENGELT, 2000.
- [28] POKHAREL S. K., 2010.
- [29] Realización Propia

9 ANEXOS

9.1 ANEXO I

ESTUDIO DE HAN Y POKHARE

Estudio realizado por Han y Pokhare (2010) [3], donde se ensayaron 4 pistas de pruebas. La sección 1 o sección de control ensaya un material AB3 sin refuerzo, la sección 2 residuos de cantera (QW) reforzada con geocelda, la sección 3 pavimento asfáltico reciclado (RAP), y por último la sección 4 que corresponde al mismo material AB3 reforzada. La subrasante es la misma para todas y corresponde a una arcilla A-7-6, que presentó un CBR de 21% y una densidad máxima seca de 1.61 [g/cm³].

Tabla 9-1 Características de los bases ensayadas [3]

	d₅₀ [mm]	C_c	C_u	CBR	Densidad máxima seca [g/cm³]
AB3	4.4	1.55	21	56	2.13
QW	1.3	2.3	24	48	2.06
RAP	Tamaño máximo = 5 [cm]			10	1.81

La geocelda usada en este fue de 15 [cm] de altura y una resistencia a la tracción de 19.1 [MPa] y un módulo secante de 355 [MPa] a una deformación de 2%. La curva de esfuerzo-deformación de la geocelda es mostrada en la Figura 9-1. El grosor de la celda es de 1.1 [mm] y dos perforaciones de 3.5 [cm²] en cada palet de geocelda.

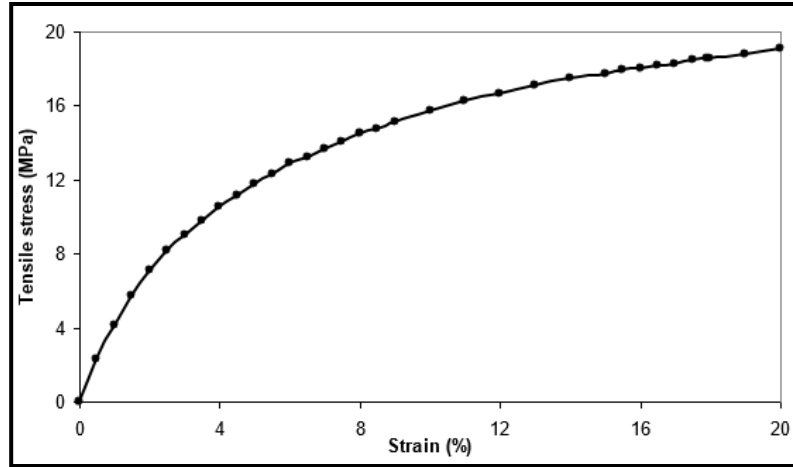


Figura 9-1 Curva esfuerzo-deformación de la geocelda utilizada. [3]

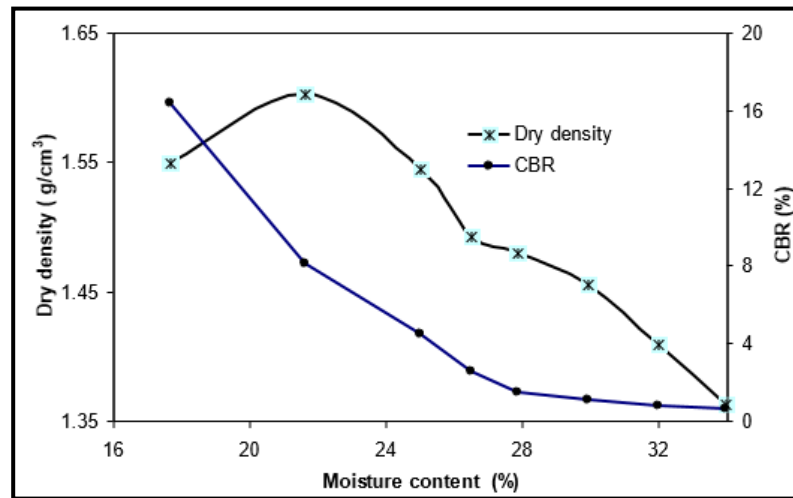


Figura 9-2 Curva de compactación y valores de CBR para la subrasante. [3]

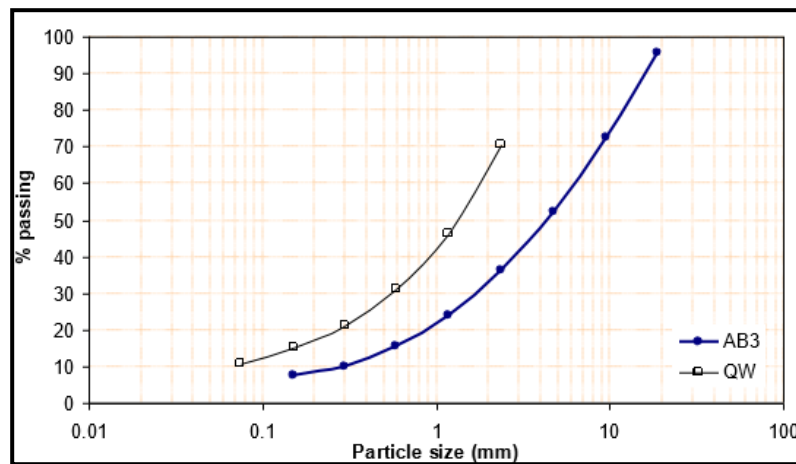


Figura 9-3 Distribución del tamaño de partículas de AB3 y QW. [3]

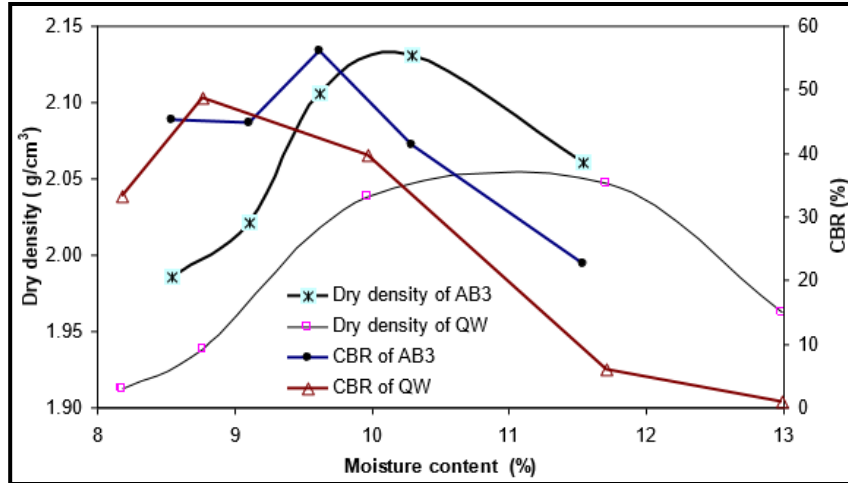


Figura 9-4 Curva de compactación y valores de CBR de AB3 y QW. [3]

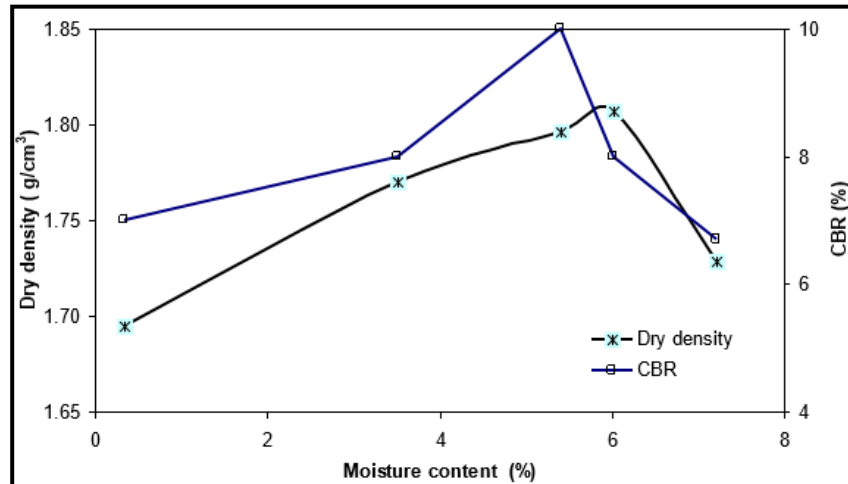


Figura 9-5 Curva de compactación y valores de CBR de RAP. [3]

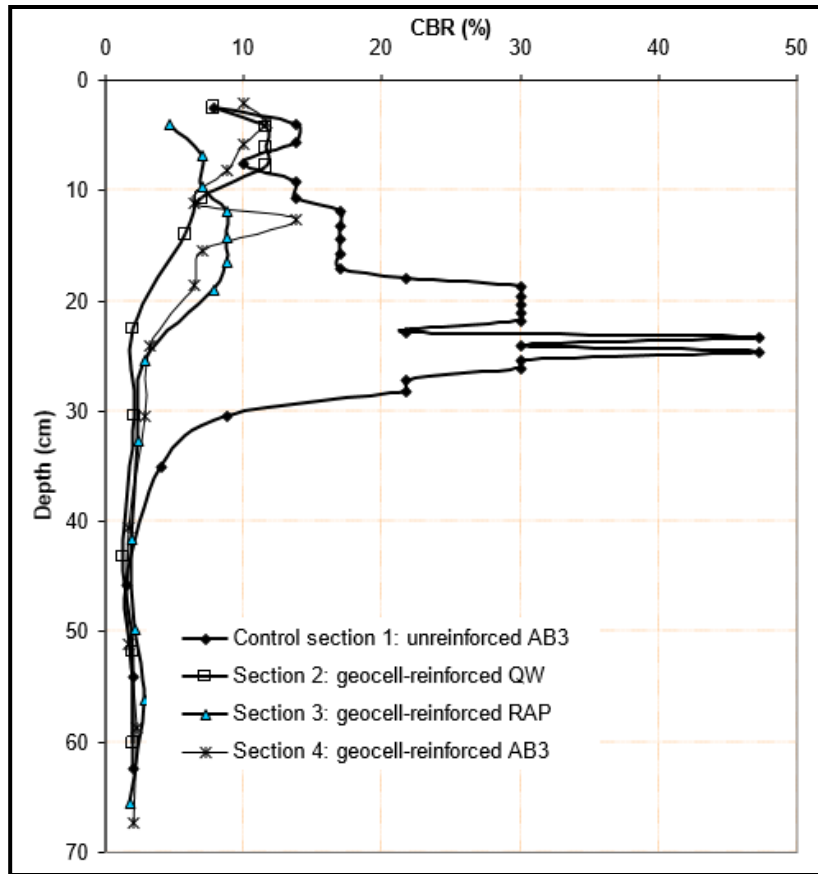


Figura 9-6 CBR para el test de DCP (Penetrómetro de cono dinámico). [3]

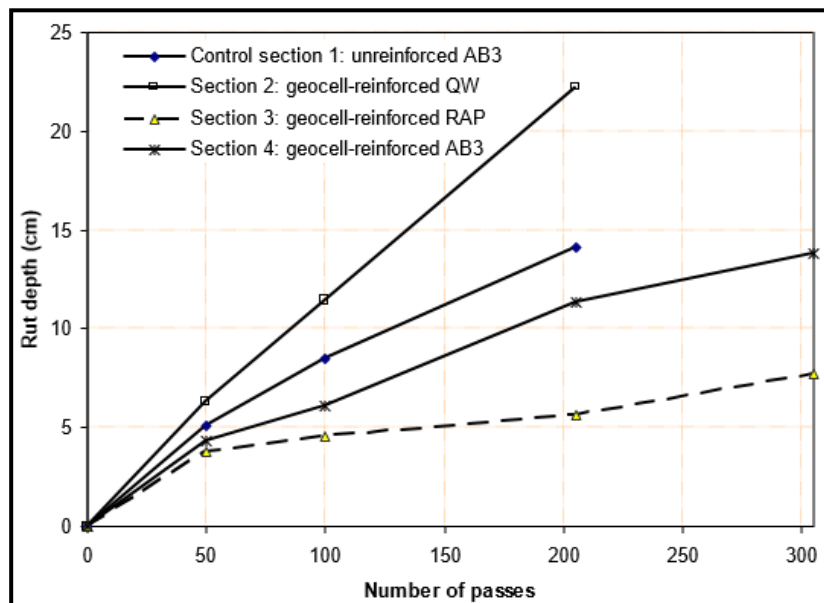


Figura 9-7 Profundidad por rodada versus número de pasadas. [3]

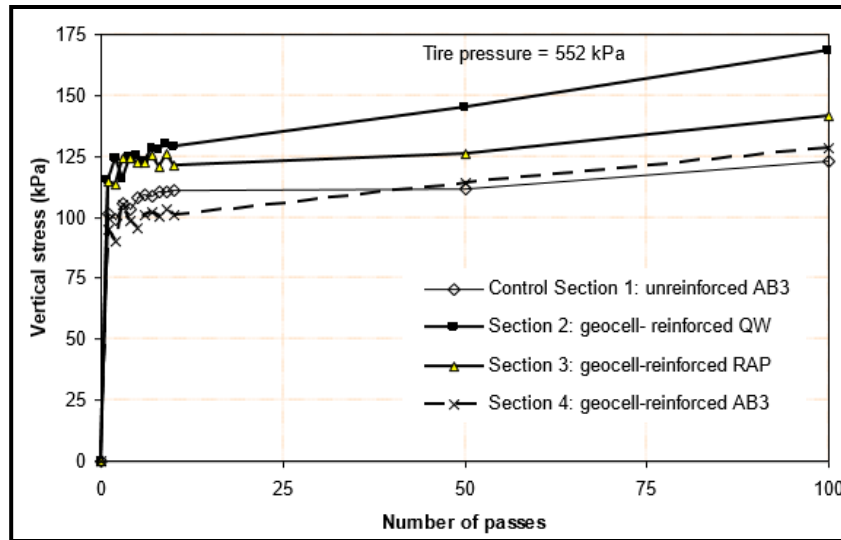


Figura 9-8 Deformación vertical versus el número de pasadas. [3]

9.2

ANEXO II

RESULTADOS BISAR 3.0

Tabla 9-2 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 1 Geocelda de 75[mm]

Layer	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (Mpa)	Stress YY (Mpa)	Stress ZZ (Mpa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displacement UX (µm)	Displacement YY (µm)	Displacement ZZ (µm)
Capa de Rodadura	0,000	0,000	0,000	0,007	-0,005	0,000	16,970	-14,070	-0,513	0,000	3,045	91,140
	1,017	0,000	0,000	-0,383	-0,384	-0,442	-601,800	-603,900	-757,400	-4,199	2,845	527,900
	0,000	3,200	0,000	0,007	-0,005	0,000	17,410	-14,220	-0,563	0,000	-3,800	87,460
	0,902	3,200	0,000	-0,301	-0,302	-0,347	-472,600	-474,400	-595,000	-3,912	-3,621	424,800
	1,077	3,200	0,000	0,106	-0,122	0,000	288,400	-320,300	5,633	-59,730	-3,549	240,200
	0,727	3,200	0,000	0,106	-0,122	0,000	289,200	-320,900	5,603	51,850	-3,659	243,800
	0,000	0,000	0,075	0,002	-0,003	0,000	5,654	-8,618	0,505	0,000	3,346	95,620
	1,017	0,000	0,075	0,046	0,045	-0,391	226,600	225,500	-937,900	-3,613	3,135	466,500
	0,000	3,200	0,075	0,002	-0,004	0,000	6,193	-10,570	0,781	0,000	-3,326	104,200
	0,902	3,200	0,075	0,045	0,045	-0,386	224,000	222,300	-926,100	-3,764	-3,175	463,500
Subbase	1,077	3,200	0,075	-0,090	0,025	-0,109	-180,300	127,700	-230,900	18,810	-3,116	288,800
	0,727	3,200	0,075	-0,090	0,025	-0,109	-179,800	127,100	-230,800	-26,360	-3,225	293,200
	0,000	0,000	0,075	0,001	-0,002	0,000	5,636	-8,645	1,661	0,000	3,281	95,630
	1,017	0,000	0,075	-0,134	-0,134	-0,391	226,600	225,500	-1350,000	-3,638	3,193	466,500
	0,000	3,200	0,075	0,001	-0,002	0,000	6,165	-10,650	2,422	0,000	-3,256	104,200
	0,902	3,200	0,075	-0,132	-0,132	-0,386	224,000	222,400	-1333,000	-3,786	-3,234	463,500
	1,077	3,200	0,075	-0,093	-0,043	-0,109	-180,300	127,600	-281,100	18,800	-3,165	288,800
	0,727	3,200	0,075	-0,093	-0,043	-0,109	-179,900	127,200	-281,100	-26,390	-3,248	293,200
	0,000	0,000	0,225	-0,004	-0,001	0,000	-13,890	1,204	8,051	0,000	3,038	101,900
	1,017	0,000	0,225	-0,019	-0,019	-0,186	278,800	279,300	-757,800	-2,198	2,817	301,300
Subrasante	0,000	3,200	0,225	-0,007	-0,002	0,000	-25,610	4,006	13,450	0,000	-2,414	126,400
	0,902	3,200	0,225	-0,024	-0,024	-0,231	346,000	346,400	-940,200	-2,211	-2,270	365,200
	1,077	3,200	0,225	-0,044	-0,014	-0,119	40,260	228,200	-425,800	37,670	-2,231	286,200
	0,727	3,200	0,225	-0,044	-0,014	-0,119	39,500	228,200	-425,300	-42,040	-2,304	291,700

Tabla 9-3 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 1 Geocelda de 100[mm]

Layer	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (Mpa)	Stress YY (Mpa)	Stress ZZ (Mpa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displacement UX (µm)	Displacement YY (µm)	Displacement ZZ (µm)
Capa de Rodadura	0,000	0,000	0,000	0,007	-0,005	0,000	18,120	-14,550	-0,629	0,000	3,050	91,270
	1,017	0,000	0,000	-0,382	-0,383	-0,442	-600,100	-602,300	-758,000	-4,271	2,879	505,300
	0,000	3,200	0,000	0,007	-0,005	0,000	18,890	-14,820	-0,719	0,000	-3,803	87,610
	0,902	3,200	0,000	-0,300	-0,301	-0,347	-471,300	-473,100	-595,500	-3,985	-3,665	407,000
	1,077	3,200	0,000	0,093	-0,125	0,000	259,900	-322,500	11,040	-60,170	-3,592	237,300
	0,727	3,200	0,000	0,094	-0,125	0,000	260,700	-323,100	11,010	52,130	-3,726	240,900
	0,000	0,000	0,100	0,001	-0,003	0,000	2,907	-7,315	0,761	0,000	3,388	97,130
	1,017	0,000	0,100	0,086	0,086	-0,341	288,400	287,600	-850,400	-3,460	3,180	426,000
	0,000	3,200	0,100	0,000	-0,004	0,000	2,489	-9,304	1,251	0,000	-3,170	109,500
	0,902	3,200	0,100	0,090	0,090	-0,357	302,600	301,100	-891,500	-3,692	-3,034	446,900
Subbase	1,077	3,200	0,100	-0,066	0,044	-0,121	-127,100	167,800	-272,000	25,900	-2,974	295,700
	0,727	3,200	0,100	-0,066	0,044	-0,121	-126,800	167,300	-272,000	-33,320	-3,104	300,400
	0,000	0,000	0,100	0,000	-0,002	0,000	2,879	-7,370	2,476	0,000	3,462	97,120
	1,017	0,000	0,100	-0,086	-0,086	-0,341	288,400	287,600	-1275,000	-3,449	3,189	426,000
	0,000	3,200	0,100	0,000	-0,002	0,000	2,474	-9,375	3,771	0,000	-3,245	109,500
	0,902	3,200	0,100	-0,090	-0,090	-0,357	302,600	301,100	-1337,000	-3,681	-3,042	446,900
	1,077	3,200	0,100	-0,082	-0,034	-0,121	-127,200	167,800	-363,300	25,910	-2,982	295,700
	0,727	3,200	0,100	-0,082	-0,034	-0,121	-126,800	167,300	-363,200	-33,290	-3,093	300,400
	0,000	0,000	0,250	-0,004	-0,001	0,000	-15,970	2,283	6,664	0,000	2,844	102,800
	1,017	0,000	0,250	-0,004	-0,003	-0,159	241,400	242,000	-709,100	-2,040	2,755	281,000
Subrasante	0,000	3,200	0,250	-0,007	-0,001	0,000	-29,660	6,062	11,010	0,000	-2,208	129,200
	0,902	3,200	0,250	-0,005	-0,004	-0,201	306,200	306,800	-899,400	-2,011	-2,172	346,300
	1,077	3,200	0,250	-0,028	-0,002	-0,112	57,660	211,400	-463,300	34,900	-2,139	280,100
	0,727	3,200	0,250	-0,028	-0,003	-0,112	56,710	211,400	-462,800	-38,820	-2,200	285,700
	0,000	0,000	0,250	-0,004	-0,001	0,000	-15,970	2,256	8,626	0,000	2,844	102,800

Tabla 9-4 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 2 Geocelda de 75[mm]

Layer	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (Mpa)	Stress YY (Mpa)	Stress ZZ (Mpa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displaceme nt UX (µm)	Displaceme nt YY (µm)	Displaceme nt ZZ (µm)
Capa de Rodadura	0,000	0,000	0,000	0,007	-0,006	0,000	19,290	-15,940	-0,592	0,000	4,964	113,300
	1,017	0,000	0,000	-0,441	-0,442	-0,509	-693,300	-695,300	-872,400	-5,098	4,700	616,200
	0,000	3,200	0,000	0,006	-0,004	0,000	14,910	-11,320	-0,634	0,000	1,135	121,900
	0,902	3,200	0,000	-0,285	-0,283	-0,327	-448,500	-443,500	-560,900	-5,726	1,370	438,500
	1,077	3,200	0,000	0,099	-0,114	0,000	269,000	-298,500	5,210	-58,850	1,207	263,500
	0,727	3,200	0,000	0,099	-0,114	0,000	269,700	-299,000	5,166	47,360	1,441	268,600
	0,000	4,500	0,000	0,006	-0,004	0,000	15,380	-11,810	-0,630	0,000	-8,735	115,000
	0,902	4,500	0,000	-0,285	-0,283	-0,327	-448,100	-443,900	-560,900	-5,331	-8,681	431,900
	0,727	4,500	0,000	0,099	-0,114	0,000	270,100	-299,500	5,184	47,670	-8,832	261,900
	1,077	4,500	0,000	0,099	-0,114	0,000	269,400	-299,000	5,214	-58,390	-8,391	257,100
	0,000	0,000	0,075	0,002	-0,004	0,000	6,225	-9,614	0,576	0,000	5,475	120,600
	1,017	0,000	0,075	0,053	0,052	-0,450	260,700	260,000	-1081,000	-4,447	5,216	547,700
	0,000	3,200	0,075	0,001	-0,004	0,000	4,041	-8,827	0,847	0,000	1,391	146,700
	0,902	3,200	0,075	0,042	0,043	-0,364	208,300	211,600	-872,800	-5,617	1,460	483,700
	1,077	3,200	0,075	-0,086	0,024	-0,103	-172,500	122,200	-217,400	15,190	1,313	317,700
	0,727	3,200	0,075	-0,086	0,024	-0,103	-172,200	121,800	-217,400	-26,440	1,524	324,000
0,000	4,500	0,075	0,001	-0,004	0,000	4,450	-9,222	0,849	0,000	-8,067	139,700	
0,902	4,500	0,075	0,042	0,043	-0,364	208,700	211,300	-872,800	-5,253	-7,917	477,100	
0,727	4,500	0,075	-0,086	0,024	-0,103	-171,800	121,500	-217,400	-26,140	-8,068	317,300	
1,077	4,500	0,075	-0,086	0,024	-0,103	-172,200	121,900	-217,400	15,620	-7,665	311,300	
0,000	0,000	0,075	0,001	-0,002	0,000	6,206	-9,639	1,859	0,000	5,392	120,600	
1,017	0,000	0,075	-0,154	-0,154	-0,450	260,800	260,100	-1555,000	-4,472	5,226	547,700	
0,000	3,200	0,075	0,000	-0,002	0,000	4,008	-8,926	2,675	0,000	1,480	146,700	
0,902	3,200	0,075	-0,125	-0,124	-0,364	208,300	211,600	-1256,000	-5,641	1,403	483,700	
1,077	3,200	0,075	-0,088	-0,040	-0,103	-172,500	122,200	-264,500	15,170	1,266	317,700	
0,727	3,200	0,075	-0,088	-0,040	-0,103	-172,200	121,900	-264,600	-26,470	1,508	324,000	
0,000	4,500	0,075	0,000	-0,002	0,000	4,407	-9,260	2,663	0,000	-8,051	139,700	
0,902	4,500	0,075	-0,125	-0,124	-0,364	208,700	211,300	-1256,000	-5,257	-7,872	477,100	
0,727	4,500	0,075	-0,088	-0,040	-0,103	-171,900	121,500	-264,600	-26,140	-8,019	317,300	
1,077	4,500	0,075	-0,088	-0,040	-0,103	-172,200	121,900	-264,600	15,610	-7,623	311,300	
0,000	0,000	0,225	-0,004	-0,001	0,000	-16,330	1,666	9,309	0,000	5,316	130,500	
1,017	0,000	0,225	-0,022	-0,022	-0,214	320,900	322,000	-872,900	-2,873	5,029	360,000	
0,000	3,200	0,225	-0,007	-0,003	0,000	-26,200	1,776	15,340	0,000	-0,458	179,000	
0,902	3,200	0,225	-0,023	-0,024	-0,218	325,000	323,200	-883,300	-3,530	-0,762	402,000	
1,077	3,200	0,225	-0,042	-0,014	-0,112	36,950	212,000	-398,600	33,890	-0,759	326,000	
0,727	3,200	0,225	-0,042	-0,014	-0,112	36,020	211,900	-398,000	-40,890	-0,703	333,800	
0,000	4,500	0,225	-0,007	-0,003	0,000	-25,940	1,769	15,180	0,000	-4,720	172,100	
0,902	4,500	0,225	-0,023	-0,024	-0,218	325,200	323,200	-883,500	-3,341	-4,191	395,500	
0,727	4,500	0,225	-0,042	-0,014	-0,112	36,240	211,900	-398,200	-40,740	-4,310	327,100	
1,077	4,500	0,225	-0,042	-0,014	-0,112	37,160	212,000	-398,800	34,110	-4,125	319,600	

Tabla 9-5 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 2 Geocelda de 100[mm]

Layer	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (Mpa)	Stress YY (Mpa)	Stress ZZ (Mpa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displacement UX (µm)	Displacement YZ (µm)	Displacement ZZ (µm)
Capa de Rodadura	0,000	0,000	0,000	0,008	-0,006	0,000	20,600	-16,490	-0,726	0,000	4,986	113,400
	1,017	0,000	0,000	-0,440	-0,441	-0,509	-691,400	-693,400	-873,000	-5,159	4,694	590,100
	0,000	3,200	0,000	0,006	-0,004	0,000	16,310	-11,770	-0,800	0,000	1,264	122,100
	0,902	3,200	0,000	-0,284	-0,282	-0,327	-447,300	-442,100	-561,400	-5,829	1,465	421,800
	1,077	3,200	0,000	0,087	-0,116	0,000	242,100	-300,300	10,280	-59,310	1,294	260,800
	0,727	3,200	0,000	0,087	-0,117	0,000	242,800	-300,800	10,240	47,600	1,510	265,900
	0,000	4,500	0,000	0,007	-0,004	0,000	16,770	-12,280	-0,791	0,000	-8,892	115,100
	0,902	4,500	0,000	-0,284	-0,282	-0,327	-446,900	-442,600	-561,400	-5,392	-8,767	415,200
	0,727	4,500	0,000	0,087	-0,117	0,000	243,200	-301,300	10,260	47,930	-8,986	259,200
	1,077	4,500	0,000	0,087	-0,117	0,000	242,500	-300,800	10,290	-58,800	-8,474	254,400
	0,000	0,000	0,100	0,001	-0,003	0,000	3,047	-8,115	0,872	0,000	5,593	123,000
	1,017	0,000	0,100	0,099	0,099	-0,393	332,000	331,500	-979,700	-4,300	5,341	501,600
	0,000	3,200	0,100	0,000	-0,003	0,000	0,471	-7,924	1,358	0,000	1,446	154,400
	0,902	3,200	0,100	0,084	0,085	-0,337	282,600	285,300	-840,100	-5,549	1,451	470,600
	1,077	3,200	0,100	-0,063	0,042	-0,114	-122,300	159,600	-256,200	21,890	1,316	326,800
	0,727	3,200	0,100	-0,063	0,042	-0,114	-122,200	159,200	-256,200	-33,010	1,492	333,500
	0,000	4,500	0,100	0,000	-0,004	0,000	0,850	-8,283	1,360	0,000	-7,867	147,400
	0,902	4,500	0,100	0,084	0,085	-0,337	282,900	285,000	-840,100	-5,234	-7,678	464,000
0,727	4,500	0,100	-0,063	0,042	-0,114	-121,800	158,900	-256,200	-32,740	-7,827	326,800	
1,077	4,500	0,100	-0,063	0,042	-0,114	-122,000	159,300	-256,200	22,260	-7,440	320,400	
Subbase	0,000	0,000	0,100	0,000	-0,002	0,000	3,026	-8,169	2,813	0,000	5,639	123,000
	1,017	0,000	0,100	-0,099	-0,099	-0,393	332,000	331,600	-1469,000	-4,303	5,358	501,600
	0,000	3,200	0,100	-0,001	-0,002	0,000	0,450	-8,004	4,127	0,000	1,366	154,400
	0,902	3,200	0,100	-0,085	-0,085	-0,337	282,500	285,400	-1259,000	-5,536	1,450	470,600
	1,077	3,200	0,100	-0,078	-0,032	-0,114	-122,400	159,600	-341,700	21,900	1,320	326,800
	0,727	3,200	0,100	-0,078	-0,032	-0,114	-122,200	159,200	-341,700	-32,980	1,513	333,500
	0,000	4,500	0,100	-0,001	-0,002	0,000	0,864	-8,317	4,074	0,000	-7,849	147,400
	0,902	4,500	0,100	-0,085	-0,085	-0,337	282,900	285,000	-1259,000	-5,250	-7,697	464,000
	0,727	4,500	0,100	-0,078	-0,032	-0,114	-121,800	158,900	-341,700	-32,750	-7,853	326,800
	1,077	4,500	0,100	-0,078	-0,032	-0,114	-122,100	159,300	-341,800	22,240	-7,458	320,400
	0,000	0,000	0,250	-0,005	-0,001	0,000	-18,690	2,814	7,747	0,000	4,917	131,800
	1,017	0,000	0,250	-0,004	-0,004	-0,183	277,800	279,000	-816,900	-2,637	4,751	336,900
	0,000	3,200	0,250	-0,008	-0,002	-0,001	-30,010	3,302	12,680	0,000	-0,683	182,900
	0,902	3,200	0,250	-0,005	-0,005	-0,190	287,800	285,200	-845,200	-3,259	-1,145	385,500
	1,077	3,200	0,250	-0,026	-0,003	-0,106	53,600	195,400	-434,300	31,400	-1,116	321,500
	0,727	3,200	0,250	-0,027	-0,004	-0,106	52,470	195,400	-433,700	-37,780	-1,110	329,500
	0,000	4,500	0,250	-0,007	-0,002	-0,001	-29,750	3,314	12,530	0,000	-3,996	175,900
	0,902	4,500	0,250	-0,005	-0,005	-0,190	288,000	285,200	-845,400	-3,008	-3,433	378,900
0,727	4,500	0,250	-0,027	-0,003	-0,106	52,700	195,300	-433,800	-37,570	-3,520	322,800	
1,077	4,500	0,250	-0,026	-0,003	-0,106	53,820	195,400	-434,400	31,690	-3,399	315,000	
Subrasante	0,000	0,000	0,250	-0,005	-0,001	0,000	-18,690	2,828	9,987	0,000	4,917	131,800
	1,017	0,000	0,250	-0,017	-0,017	-0,183	277,800	279,000	-749,900	-2,637	4,751	336,900
	0,000	3,200	0,250	-0,008	-0,003	-0,001	-30,000	3,299	16,560	0,000	-0,694	182,900
	0,902	3,200	0,250	-0,019	-0,019	-0,190	287,800	285,200	-775,000	-3,259	-1,145	385,500
	1,077	3,200	0,250	-0,035	-0,013	-0,106	53,610	195,400	-385,900	31,400	-1,116	321,500
	0,727	3,200	0,250	-0,036	-0,013	-0,106	52,460	195,400	-385,100	-37,780	-1,110	329,500
	0,000	4,500	0,250	-0,008	-0,003	-0,001	-29,750	3,352	16,350	0,000	-3,985	175,900
	0,902	4,500	0,250	-0,019	-0,019	-0,190	288,000	285,200	-775,200	-3,008	-3,433	378,900
	0,727	4,500	0,250	-0,036	-0,013	-0,106	52,700	195,300	-385,300	-37,570	-3,520	322,800
	1,077	4,500	0,250	-0,035	-0,013	-0,106	53,820	195,400	-386,000	31,690	-3,399	315,000

Tabla 9-6 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 3 Geocelda de 75[mm]

Layer	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (Mpa)	Stress YY (Mpa)	Stress ZZ (Mpa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displaceme nt UX (µm)	Displaceme nt YY (µm)	Displaceme nt ZZ (µm)	
Capa de Rodadura	0,000	0,000	0,000	0,007	-0,005	0,000	17,540	-14,490	-0,539	-0,002	5,398	108,700	
	1,017	0,000	0,000	-0,402	-0,403	-0,464	-632,000	-633,700	-795,200	-4,686	5,150	567,100	
	0,000	3,200	0,000	0,007	-0,005	0,000	17,510	-14,130	-0,596	-0,006	-0,197	113,800	
	0,902	3,200	0,000	-0,316	-0,316	-0,364	-497,000	-497,400	-624,800	-4,799	-0,116	467,600	
	1,077	3,200	0,000	0,111	-0,128	0,000	302,200	-335,600	5,906	-63,530	-0,093	273,600	
	0,727	3,200	0,000	0,111	-0,128	0,000	302,900	-336,200	5,879	53,890	-0,136	277,700	
	0,902	7,200	0,000	-0,260	-0,258	-0,298	-408,600	-404,400	-511,300	-5,174	0,905	403,500	
	0,727	7,200	0,000	0,090	-0,104	0,000	246,000	-272,700	4,719	43,180	0,996	248,600	
	1,077	7,200	0,000	0,090	-0,104	0,000	245,300	-272,200	4,747	-53,570	0,727	244,000	
	0,000	7,200	0,000	0,005	-0,004	0,000	13,960	-10,660	-0,583	-0,151	0,777	115,100	
	0,000	8,500	0,000	0,006	-0,004	0,000	14,470	-11,140	-0,587	-0,045	-8,611	110,200	
	0,902	8,500	0,000	-0,266	-0,265	-0,306	-418,700	-415,200	-524,400	-4,914	-8,536	406,500	
	0,727	8,500	0,000	0,093	-0,107	0,000	252,600	-280,100	4,852	44,610	-8,669	247,600	
	1,077	8,500	0,000	0,093	-0,107	0,000	252,000	-279,600	4,878	-54,490	-8,280	243,100	
	0,000	0,000	0,075	0,002	-0,003	0,000	5,612	-8,724	0,529	0,000	6,085	116,400	
	1,017	0,000	0,075	0,048	0,048	-0,410	237,600	237,000	-984,900	-4,137	5,923	505,800	
	0,000	3,200	0,075	0,002	-0,004	0,000	5,635	-10,230	0,815	0,000	0,753	136,500	
	0,902	3,200	0,075	0,047	0,047	-0,405	234,400	234,200	-972,500	-4,727	0,808	513,300	
	1,077	3,200	0,075	-0,095	0,027	-0,115	-190,000	134,800	-242,400	18,840	0,817	329,600	
	0,727	3,200	0,075	-0,095	0,026	-0,115	-189,600	134,300	-242,400	-28,310	0,801	334,600	
	0,902	7,200	0,075	0,038	0,039	-0,331	189,900	192,900	-795,500	-5,131	0,168	447,200	
	0,727	7,200	0,075	-0,078	0,022	-0,094	-156,900	111,100	-198,200	-24,110	0,234	301,600	
	1,077	7,200	0,075	-0,079	0,022	-0,094	-157,200	111,400	-198,200	13,860	0,106	296,000	
	0,000	7,200	0,075	0,001	-0,003	0,000	3,689	-7,992	0,764	0,000	0,086	139,900	
	0,000	8,500	0,075	0,001	-0,003	0,000	4,008	-8,347	0,773	0,000	-8,447	133,900	
	0,902	8,500	0,075	0,038	0,039	-0,331	190,100	192,700	-795,500	-4,860	-8,487	441,400	
	0,727	8,500	0,075	-0,078	0,022	-0,094	-156,700	110,800	-198,200	-23,880	-8,621	295,700	
	1,077	8,500	0,075	-0,078	0,022	-0,094	-157,000	111,200	-198,200	14,170	-8,160	290,300	
	Subbase	0,000	0,000	0,075	0,001	-0,002	0,000	5,618	-8,749	1,708	0,000	5,837	116,400
		1,017	0,000	0,075	-0,140	-0,141	-0,410	237,600	237,100	-1417,000	-4,146	5,821	505,800
0,000		3,200	0,075	0,000	-0,002	0,000	5,591	-10,400	2,608	0,000	0,861	136,500	
0,902		3,200	0,075	-0,139	-0,139	-0,405	234,400	234,200	-1399,000	-4,742	0,746	513,300	
1,077		3,200	0,075	-0,098	-0,045	-0,115	-190,100	134,800	-295,200	18,850	0,730	329,600	
0,727		3,200	0,075	-0,098	-0,045	-0,115	-189,700	134,400	-295,200	-28,340	0,779	334,600	
0,902		7,200	0,075	-0,114	-0,113	-0,331	189,900	192,900	-1144,000	-5,100	0,253	447,200	
0,727		7,200	0,075	-0,080	-0,036	-0,094	-157,000	111,000	-241,100	-24,080	0,314	301,600	
1,077		7,200	0,075	-0,080	-0,036	-0,094	-157,200	111,400	-241,100	13,890	0,152	296,000	
0,000		7,200	0,075	0,000	-0,002	0,000	3,647	-8,113	2,447	0,000	0,203	139,900	
0,000		8,500	0,075	0,000	-0,002	0,000	3,976	-8,368	2,407	0,000	-8,384	133,900	
0,902		8,500	0,075	-0,114	-0,113	-0,331	190,200	192,700	-1144,000	-4,861	-8,369	441,400	
0,727		8,500	0,075	-0,080	-0,037	-0,094	-156,700	110,800	-241,200	-23,890	-8,502	295,700	
1,077		8,500	0,075	-0,080	-0,036	-0,094	-157,000	111,300	-241,200	14,150	-8,143	290,300	
Subrasante		0,000	0,000	0,225	-0,004	-0,001	0,000	-14,920	1,510	8,529	0,000	5,908	127,200
	1,017	0,000	0,225	-0,020	-0,020	-0,195	292,500	293,500	-795,600	-2,652	5,643	336,400	
	0,000	3,200	0,225	-0,007	-0,002	0,000	-27,730	4,761	14,310	0,000	1,500	166,800	
	0,902	3,200	0,225	-0,025	-0,025	-0,242	362,500	364,200	-987,000	-3,088	1,614	416,900	
	1,077	3,200	0,225	-0,046	-0,015	-0,125	41,510	240,100	-446,900	38,660	1,609	333,700	
	0,727	3,200	0,225	-0,047	-0,015	-0,125	40,660	240,100	-446,400	-44,770	1,618	340,000	
	0,902	7,200	0,225	-0,021	-0,021	-0,198	296,100	294,800	-805,200	-3,404	-2,406	377,600	
	0,727	7,200	0,225	-0,039	-0,013	-0,102	32,670	193,400	-362,800	-37,430	-2,352	315,400	
	1,077	7,200	0,225	-0,038	-0,013	-0,102	33,520	193,500	-363,400	30,670	-2,402	308,300	
	0,000	7,200	0,225	-0,007	-0,002	0,000	-24,010	1,816	13,950	0,000	-1,986	174,200	
	0,000	8,500	0,225	-0,006	-0,002	0,000	-23,740	1,728	13,820	0,000	-5,615	167,000	
	0,902	8,500	0,225	-0,021	-0,022	-0,198	296,300	294,700	-805,300	-3,131	-5,124	370,600	
	0,727	8,500	0,225	-0,039	-0,013	-0,102	32,930	193,300	-362,900	-37,200	-5,235	308,400	
	1,077	8,500	0,225	-0,038	-0,013	-0,102	33,760	193,400	-363,500	30,990	-5,060	301,500	

Tabla 9-7 Esfuerzos, deformaciones y deflexiones Camión tipo 3 Geocelda de 100[mm]

Layer	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (Mpa)	Stress YY (Mpa)	Stress ZZ (Mpa)	Strain XX (µstrain)	Strain YY (µstrain)	Strain ZZ (µstrain)	Displaceme nt UX (µm)	Displaceme nt YY (µm)	Displaceme nt ZZ (µm)	
Capa de Rodadura	0,000	0,000	0,000	0,007	-0,005	0,000	18,730	-14,970	-0,664	-0,002	5,461	108,800	
	1,017	0,000	0,000	-0,402	-0,402	-0,464	-630,200	-632,000	-795,800	-4,770	5,245	543,300	
	0,000	3,200	0,000	0,007	-0,005	0,000	19,070	-14,750	-0,763	-0,006	-0,238	113,900	
	0,902	3,200	0,000	-0,316	-0,316	-0,364	-495,500	-496,000	-625,300	-4,872	-0,197	448,900	
	1,077	3,200	0,000	0,098	-0,131	0,000	272,200	-337,900	11,580	-63,990	-0,171	270,500	
	0,727	3,200	0,000	0,098	-0,131	0,000	273,000	-338,500	11,550	54,180	-0,241	274,600	
	0,902	7,200	0,000	-0,259	-0,257	-0,298	-407,500	-403,100	-511,700	-5,269	0,990	388,200	
	0,727	7,200	0,000	0,079	-0,106	0,000	221,400	-274,400	9,342	43,410	1,080	246,100	
	1,077	7,200	0,000	0,079	-0,106	0,000	220,800	-273,900	9,373	-53,990	0,803	241,500	
	0,000	7,200	0,000	0,006	-0,004	0,000	15,240	-11,080	-0,733	-0,158	0,849	115,200	
	0,000	8,500	0,000	0,006	-0,004	0,000	15,770	-11,590	-0,738	-0,046	-8,724	110,400	
	0,902	8,500	0,000	-0,265	-0,264	-0,306	-417,600	-413,900	-524,800	-4,999	-8,667	390,900	
	0,727	8,500	0,000	0,082	-0,109	0,000	227,500	-281,900	9,595	44,850	-8,798	245,000	
	1,077	8,500	0,000	0,081	-0,109	0,000	226,800	-281,400	9,628	-54,900	-8,404	240,600	
	0,000	0,000	0,100	0,001	-0,003	0,000	2,713	-7,349	0,798	0,000	6,248	119,000	
	1,017	0,000	0,100	0,090	0,090	-0,358	302,500	302,300	-892,900	-3,974	6,004	464,200	
	0,000	3,200	0,100	0,000	-0,004	0,000	1,701	-8,890	1,312	0,000	1,123	143,700	
	0,902	3,200	0,100	0,095	0,095	-0,375	316,900	316,900	-936,000	-4,652	1,058	497,500	
	1,077	3,200	0,100	-0,070	0,047	-0,127	-134,300	177,000	-285,600	26,280	1,064	338,600	
	0,727	3,200	0,100	-0,070	0,047	-0,127	-134,000	176,500	-285,600	-35,620	1,060	343,900	
	0,902	7,200	0,100	0,077	0,078	-0,307	257,500	260,100	-765,700	-5,084	-0,047	436,500	
	0,727	7,200	0,100	-0,058	0,038	-0,104	-111,400	145,200	-233,500	-30,120	-0,096	311,400	
	1,077	7,200	0,100	-0,058	0,039	-0,104	-111,600	145,500	-233,500	19,910	-0,178	305,500	
	0,000	7,200	0,100	0,000	-0,003	0,000	0,361	-7,138	1,237	0,000	-0,155	148,100	
	0,000	8,500	0,100	0,000	-0,003	0,000	0,698	-7,476	1,241	0,000	-8,412	141,800	
	0,902	8,500	0,100	0,077	0,077	-0,307	257,800	259,900	-765,700	-4,830	-8,246	430,400	
	0,727	8,500	0,100	-0,058	0,038	-0,104	-111,100	144,900	-233,500	-29,880	-8,382	305,300	
	1,077	8,500	0,100	-0,058	0,038	-0,104	-111,300	145,300	-233,500	20,240	-7,931	299,500	
	Subbase	0,000	0,000	0,100	0,000	-0,002	0,000	2,662	-7,350	2,572	0,000	6,518	119,000
		1,017	0,000	0,100	-0,090	-0,090	-0,358	302,500	302,300	-1339,000	-3,985	6,189	464,200
0,000		3,200	0,100	0,000	-0,002	0,000	1,718	-9,010	3,963	0,000	0,903	143,700	
0,902		3,200	0,100	-0,095	-0,095	-0,375	316,900	316,900	-1404,000	-4,642	0,987	497,500	
1,077		3,200	0,100	-0,086	-0,036	-0,127	-134,300	176,900	-381,400	26,290	0,998	338,600	
0,727		3,200	0,100	-0,086	-0,036	-0,127	-134,000	176,500	-381,400	-35,590	0,977	343,900	
0,902		7,200	0,100	-0,078	-0,077	-0,307	257,500	260,100	-1148,000	-5,095	-0,005	436,500	
0,727		7,200	0,100	-0,071	-0,029	-0,104	-111,400	145,200	-311,400	-30,100	0,065	311,400	
1,077		7,200	0,100	-0,071	-0,029	-0,104	-111,600	145,500	-311,500	19,900	-0,139	305,500	
0,000		7,200	0,100	-0,001	-0,002	0,000	0,409	-7,161	3,650	0,000	0,014	148,100	
0,000		8,500	0,100	0,000	-0,002	0,000	0,682	-7,475	3,718	0,000	-8,631	141,800	
0,902		8,500	0,100	-0,078	-0,077	-0,307	257,700	259,900	-1148,000	-4,846	-8,417	430,400	
0,727		8,500	0,100	-0,071	-0,029	-0,104	-111,200	145,000	-311,500	-29,900	-8,555	305,200	
1,077		8,500	0,100	-0,071	-0,029	-0,104	-111,400	145,300	-311,500	20,190	-8,203	299,500	
0,000		0,000	0,250	-0,004	-0,001	0,000	-17,100	2,686	7,038	0,000	5,641	128,500	
1,017		0,000	0,250	-0,004	-0,004	-0,166	253,200	254,400	-744,600	-2,479	5,517	315,500	
0,000		3,200	0,250	-0,008	-0,001	-0,001	-32,010	6,845	11,770	0,000	1,822	170,400	
0,902		3,200	0,250	-0,005	-0,005	-0,211	320,700	322,700	-944,200	-2,877	1,785	397,800	
1,077		3,200	0,250	-0,029	-0,003	-0,118	59,770	222,400	-486,200	35,740	1,773	328,000	
0,727		3,200	0,250	-0,029	-0,003	-0,118	58,720	222,500	-485,800	-41,380	1,796	334,400	
0,902		7,200	0,250	-0,004	-0,005	-0,173	262,100	260,200	-770,500	-3,095	-2,759	363,000	
0,727		7,200	0,250	-0,024	-0,003	-0,097	47,640	178,300	-395,400	-34,530	-2,735	311,900	
1,077		7,200	0,250	-0,024	-0,003	-0,097	48,680	178,400	-395,900	28,460	-2,725	304,700	
0,000		7,200	0,250	-0,007	-0,002	-0,001	-27,560	3,257	11,540	0,000	-2,495	178,300	
0,000		8,500	0,250	-0,007	-0,002	-0,001	-27,250	3,150	11,440	0,000	-5,118	170,900	
0,902		8,500	0,250	-0,004	-0,005	-0,173	262,400	260,100	-770,600	-2,915	-4,739	355,900	
0,727		8,500	0,250	-0,024	-0,003	-0,097	47,880	178,300	-395,400	-34,390	-4,820	304,800	
1,077		8,500	0,250	-0,024	-0,003	-0,097	48,900	178,300	-396,000	28,680	-4,706	297,700	
Subrasante		0,000	0,000	0,250	-0,004	-0,001	0,000	-17,100	2,546	9,174	0,000	5,641	128,500
		1,017	0,000	0,250	-0,016	-0,016	-0,166	253,200	254,400	-683,500	-2,479	5,517	315,500
	0,000	3,200	0,250	-0,008	-0,002	-0,001	-32,010	6,887	15,440	0,000	1,822	170,400	
	0,902	3,200	0,250	-0,020	-0,020	-0,211	320,700	322,600	-866,700	-2,838	1,670	397,800	
	1,077	3,200	0,250	-0,039	-0,013	-0,118	59,790	222,400	-432,900	35,790	1,658	328,000	
	0,727	3,200	0,250	-0,039	-0,013	-0,118	58,740	222,400	-432,300	-41,340	1,682	334,400	
	0,902	7,200	0,250	-0,017	-0,017	-0,173	262,100	260,200	-706,500	-3,095	-2,759	363,000	
	0,727	7,200	0,250	-0,033	-0,012	-0,097	47,640	178,300	-351,100	-34,530	-2,735	311,900	
	1,077	7,200	0,250	-0,032	-0,011	-0,097	48,680	178,300	-351,700	28,460	-2,725	304,700	
	0,000	7,200	0,250	-0,007	-0,002	-0,001	-27,560	3,252	15,070	0,000	-2,504	178,300	
	0,000	8,500	0,250	-0,007	-0,002	-0,001	-27,250	3,146	14,950	0,000	-5,108	170,900	
	0,902	8,500	0,250	-0,017	-0,017	-0,173	262,400	260,100	-706,600	-2,867	-4,598	355,900	
0,727	8,500	0,250	-0,033	-0,012	-0,097	47,900	178,200	-351,200	-34,340	-4,680	304,800		
1,077	8,500	0,250	-0,032	-0,011	-0,097	48,920	178,300	-351,800	28,730	-4,564	297,700		

INFORME DE LABORATORIO DE SUELOS

Subrasante Pista de Prueba.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Obras Civiles
Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras



INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 34439

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS:

3.1 Muestra de suelo MS-13717-1

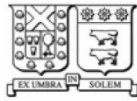
3.1.1 Descripción e identificación de suelos, según ASTM D 2488-09a ^(a)

Fecha realización	03/01/2017		
Laboradorista	Sr. Jorge Gómez		
Profundidad [m]	1,80	Profundidad napa de agua [m]	No presenta
Ubicación GPS	Sur: 42°16'32,3" - Oeste: 73°41'35,0"		
Descripción visual			
Calicata N°	1		
Horizonte N°	1	2	3
Desde [m]	0,00	0,20	0,30
Hasta [m]	0,20	0,30	1,80
Espesor estrato [m]	0,20	0,10	1,50
Nombre local	Base estabilizada	Arena limosa	Integral
Nombre del grupo	Base estabilizada	Arena limosa	Integral
Símbolo del grupo (USCS)	GW	SM	SP
Tamaño máximo (mm)	20	20	120
Proporción grava [%]	50	40	50
Proporción arena [%]	40	25	50
Proporción finos [%]	10	35	0
Color	Gris	Amarillo	Gris
Olor	No presenta	No presenta	No presenta
Condición de humedad	Húmedo	Húmedo	Húmedo
Angularidad (grano grueso)	Sub angular	Rodado	Rodado
Dureza (grano grueso)	Duro	Duro	Duro
Cementación (suelos intactos gruesos)	Fuerte	Fuerte	Fuerte
Consistencia (suelos intactos finos)	Firme	Firme	Firme
Estructura (Suelos intactos)	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Presencia materia orgánica y/o raíces	No presenta	No presenta	No presenta
Resistencia en seco (grano fino)	Nula	Media	Nula
Dilatabilidad (grano fino)	Rápida	Lenta	Rápida
Dureza (grano fino)	Baja	Media	Baja
Plasticidad (grano fino)	No plástica	Media	No plástica
Compacidad	No aplica	No aplica	No aplica
Observaciones generales	Sin observaciones		

CWD/RYL/ye

Avda. Placeres 401 – Valparaíso. – Fono: 32 2654184 – 2654840 – e-mail: lemco.laboratorio@usm.cl
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA APROBACIÓN DE LEMCO
2 de 11

 SISTEMA NACIONAL
DE ACREDITACION
INN - CHILE
ACREDITACIÓN LE 489-490-491-492-493



INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 34439

3.1.2 Determinación de la granulometría, 8.102.1 (MC-V8, 2014)

Horizonte N°		3
Tamices		Porcentaje que pasa [%]
ASTM	mm	
3"	80	100
2 1/2"	63	97
2"	50	94
1 1/2"	40	90
1"	25	82
3/4"	20	77
3/8"	10	64
N°4	5	52
N°10	2	40
N°40	0,5	8
N°200	0,08	0
Tamaño máx. [mm]		80
Fecha de ensayo		09/01/2017
Ejecutado por		Sr. Maximiliano Vásquez

3.1.3 Determinación del límite líquido y límite plástico, según NCh 1517/1 Of.79 y NCh 1517/2 Of.79

Fecha realización	10/01/2017	Límite líquido [%]	-
Método de ensayo empleado	Mecánico	Límite plástico [%]	-
Tipo de acanalador	ASTM	Índice plasticidad [%]	N.P.
Ejecutado por	Sr. Maximiliano Vásquez		

3.1.4 Clasificación USCS según ASTM D 2487-11 ^(a)

Clasificación USCS	SP	Fecha realización	11/01/2017
Nomenclatura vial AASHTO	A-1a(0)	Laboratorista	Sr. Jorge Gómez

3.1.5 Densidad máxima de suelos usando mesa vibradora, según ASTM D 4253-00 (2006)

Dens. máx. seca, método 1A	[g/cm ³]	2,133	Fecha realización	11/01/2016
Dens. máx. seca, método 1B	[g/cm ³]	2,088	Moldes usados [cm ³]	14150
Ejecutado por	Sr. Maximiliano Vásquez			

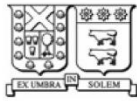
3.1.6 Densidad mínima de suelos, según ASTM D 4254-00 (2006)e1

Dens. mín. seca, método A	[g/cm ³]	1,877	Fecha realización	11/01/2016
Método		Poruña	Moldes usados [cm ³]	14150
Ejecutado por	Sr. Maximiliano Vásquez			

3.1.7 Ensayo de proctor modificado, según NCh 1534/2 Of.79

Densidad máxima seca [g/cm ³]	2,08	Humedad óptima [%]	5,4
Descarte ó reemplazo material	Reemplazo	Método	D
Fecha realización	10/01/2017	Material retenido 20 mm [%]	23
Ejecutado por	Sr. Maximiliano Vásquez		

CWD/RYL/ye



INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 34439

3.1.8 Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio (CBR), según NCh 1852 Of.81

Fecha realización	12/01/2017	Laboratorista	Sr. M. Vásquez
Método preparado y compactado probeta	D		
N° golpes	56	25	10
Método (muestra sumergida o no)	Sumergida		
Tiempo de inmersión [h]	96		
Dens. seca antes inmersión [g/cm ³]	2,08	1,99	1,90
Dens. seca después inmersión [g/cm ³]	2,08	1,99	1,90
Humedad antes compactación [%]	5,5	5,4	5,7
Humedad después compactación [%]	5,6	5,5	5,6
Hum. capa sup. 25 mm. desp. inm. [%]	5,8	5,9	6,1
Hum. después inmersión [%]	6,7	6,9	7,1
Expansión (% de la altura inicial) [%]	0,0	0,0	0,0
Razón soporte a 0.2" [%]	102,9	73,8	39,5
Razón sop. a 0.2" a 95% DMCS P.M. [%]	68,0		
Sobrecargas utilizadas [Kg]	4,55	4,55	4,55

CWD/RYL/ye

Materiales de Construcción: Subbase y Gravilla



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Obras Civiles
Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras



INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 34439

3.4 Muestra de base acopio Planta NAJAR Butalcura MS-13717-4

3.4.1 Determinación de la granulometría, 8.102.1 (MC-V8, 2014)

Horizonte N°		3
Tamices		Porcentaje que pasa [%]
ASTM	mm	
1"	25	100
3/4"	20	99
3/8"	10	80
N°4	5	64
N°10	2	52
N°40	0,5	17
N°200	0,08	6
Tamaño máx. [mm]		25
Fecha de ensayo		05/01/2017
Ejecutado por		Sr. Maximiliano Vásquez

3.4.2 Determinación del límite líquido y límite plástico, según NCh 1517/1 Of.79 y NCh 1517/2 Of.79

Fecha realización	06/01/2017	Límite líquido [%]	-
Método de ensayo empleado	Mecánico	Límite plástico [%]	-
Tipo de acanalador	ASTM	Índice plasticidad [%]	N.P.
Ejecutado por		Sr. Maximiliano Vásquez	

3.4.3 Clasificación USCS según ASTM D 2487-11 ^(a)

Clasificación USCS	SW-SM	Fecha realización	09/01/2017
Nomenclatura vial AASHTO	A-1b(0)	Laboratorista	Sr. M. Vásquez

3.4.4 Densidad máxima de suelos usando mesa vibradora, según ASTM D 4253-00 (2006)

Dens. máx. seca, método 1A	[g/cm³]	2,119	Fecha realización	10/01/2016
Dens. máx. seca, método 1B	[g/cm³]	2,161	Moldes usados [cm³]	14150
Ejecutado por		Sr. Maximiliano Vásquez		

3.4.5 Densidad mínima de suelos, según ASTM D 4254-00 (2006)e1

Dens. mín. seca, método A	[g/cm³]	1,863	Fecha realización	10/01/2016
Método		Poruña	Moldes usados [cm³]	14150
Ejecutado por		Sr. Maximiliano Vásquez		

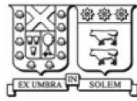
3.4.6 Ensayo de proctor modificado, según NCh 1534/2 Of.79

Densidad máxima seca [g/cm³]	2,09	Humedad óptima [%]	10,8
Descarte ó reemplazo material	Descarte	Método	D
Fecha realización	09/01/2017	Material retenido 20 mm [%]	1
Ejecutado por		Sr. Maximiliano Vásquez	

CWD/RYL/ye

Avda. Placeres 401 – Valparaíso. – Fono: 32 2654184 – 2654840 – e-mail: lemco.laboratorio@usm.cl
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA APROBACIÓN DE LEMCO
10 de 11

SISTEMA NACIONAL
DE ACREDITACIÓN
INN - CHILE
ACREDITACIÓN LE 489-490-491-492-493



INFORME DE ENSAYO OFICIAL N° 34439

3.4.7 Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio (CBR), según NCh 1852 Of.81

Fecha realización	10/01/2017	Laboratorista	Sr. M. Vásquez
Método preparado y compactado probeta	D		
N° golpes	56	25	10
Método (muestra sumergida o no)	Sumergida		
Tiempo de inmersión [h]	96		
Dens. seca antes inmersión [g/cm ³]	2,09	1,99	1,84
Dens. seca después inmersión [g/cm ³]	2,09	1,99	1,84
Humedad antes compactación [%]	10,8	11,1	11,0
Humedad después compactación [%]	11,0	10,9	11,0
Hum. capa sup. 25 mm. desp. inm. [%]	11,2	11,5	11,7
Hum. después inmersión [%]	12,1	12,3	12,6
Expansión (% de la altura inicial) [%]	0,0	0,0	0,0
Razón soporte a 0.2" [%]	107,8	66,6	48,0
Razón sop. a 0.2" a 95% DMCS P.M. [%]	65,0		
Sobrecargas utilizadas [Kg]	4,55	4,55	4,54

3.5 Acopio Planta NAJAR Butalcura MS-13717-5

3.5.1 Desgaste de las gravas por el método de la máquina de los Ángeles, según NCh 1369 Of.78

Pérdida de masa [%]	15,3		
Tipo de material	Gravilla		
Grado de ensayo	6	Masa total utilizada [g]	5.000
Ejecutado por	Sr. Ramón Villarroel	Fecha de ensayo	23/01/2017

4. OBSERVACIONES:

- Ensayos bajo acreditaciones LE 489, LE 490, LE 491, LE 492 y LE 493 del Instituto Nacional de Normalización INN.

5. REFERENCIAS

^(a) Actividades fuera de las acreditaciones del Instituto Nacional de Normalización para este laboratorio. Sin inscripción en el registro MIMVU.

Rodrigo Yáñez L.
Jefe (S) de Laboratorio
Especialista Mecánica de Suelos



CWD/RYL/ye

9.4

ANEXO IV

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ESTACIÓN TOTAL

Tabla 9-8 Especificaciones de Modelo de Estación Total [23]

MODELO	Nivo 5C	DISPLAY	
MEDICIÓN DE ANGULOS		Pantalla	LCD TFT en color QVGA
Precisión	5"	Tipo de pantalla	LCD
Ángulo de lectura		DISPLAY	
Método de lectura	Absoluto	Pantalla	LCD TFT en color QVGA
Compensación	Compensador doble eje	Tipo de pantalla	LCD
TELESCOPIO		Tipo de teclado	Estándar
Longitud	125 mm	TIEMPO DE TRABAJO	
Diametro del objetivo	45 mm	Almacenamiento	128 Mb.
Aumento de lente	30 X	Incluyendo la medición EDM	7.5 horas aprox.
Imagen	Recta	Medición de ángulos	20 horas parox.
Campo visual	1° 20'	Tiempo de recarga	4 horas
Distancia min de enfoque	1.5 mm	Tipo de batería	Batería Recargable Li-ion
MEDICION DE DISTANCIAS		INTERFASE	
MODO PRISMA		BAJADA DE DATA	
01 Prisma	5,000 mts.	Cable USB	Sí.
03 Prismas	6,000 mts.	Memoria USB	Sí (Slot para USB)
Precisión de medida	(3+2 ppm x D) mm	Bluetooth (sin cable)	Sí.
TIEMPO DE MEDICIÓN		ESPECIFICACIONES FÍSICAS	
Grueso	0.8 seg.	Plomada óptica	Sí.
Fino	1.5 seg.	Plomada laser	Opcional.
Continuo	1.8 seg.	Peso incluido la batería	3,9 kg.
MODO LASER		Protección	IP55
Distancia		Rango de temperatura	-20° a +50°C (de -4° a +122°F)
Precisión			

9.6 ANEXO V

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN

7.6.1 MOVIMIENTO DE TIERRAS

7.6.1.1 Replanteo Geométrico

El Contratista replanteará la solución geométrica del proyecto en planta, definiendo los ejes, vértices y deflexiones en terreno, así como las líneas de soleras. No se podrá continuar con las etapas posteriores de la ejecución de las obras, mientras la Inspección Técnica de Obras (I.T.O.) no haya recepcionado satisfactoriamente esta partida, registrándola en el Libro de Obras

7.6.1.2 Excavación en Corte

En aquellos sectores en que la subrasante de las calles va en corte, se excavará el material necesario para dar espacio al perfil tipo correspondiente.

En caso de encontrar material inadecuado bajo el horizonte de fundación, deberá extraerse en su totalidad, reponiéndolo con el material especificado en el punto 1.3 y compactándolo a una densidad no inferior al 95% de la densidad máxima compactada seca (D.M.C.S.) del Proctor Modificado, NCh 1534 II – D, o al 80% de la densidad relativa, NCh 1726, según corresponda.

Por material inadecuado ha de entenderse rellenos no controlados o suelos naturales con un Poder de Soporte California (CBR) inferior en 20 % al CBR de Proyecto.

Cuando el 20% o más de las muestras de los CBR de subrasante sea inferior al 80 % del CBR de diseño, el material de la subrasante deberá ser reemplazado por uno que corresponda a lo menos al CBR de diseño, o bien, se deberá rediseñar y aprobar su diseño por el Depto. Proyectos de Pavimentación.

7.6.1.3 Rellenos

Se formarán con el mejor material proveniente de la excavación o empréstito si se requiere. El CBR mínimo exigible del material será el CBR de diseño.

Todos los materiales que integran el relleno deberán estar libres de materias orgánicas, pasto, hojas, raíces u otro material objetable. El material de relleno deberá contar con visto bueno de la I.T.O.

El material de relleno colocado en capas deberá corresponder al tipo de suelo y al equipo de compactación a emplear. En todo caso, el espesor máximo de la capa compactada será de 0.15 m para suelo fino (arcilla-limo); de 0.20 m para finos con granulares y de 0.30 m para suelos granulares.

Podrá aumentarse el espesor de la capa a compactar, sí se dispone de equipos modernos y se presenta la debida justificación comprobada en una cancha de prueba, lo que será verificado en terreno por la I.T.O. y contar con el visto bueno del Departamento Proyectos de Pavimentación: En esas condiciones la I.T.O. podrá autorizar el aumento de espesor.

En la formación de las diferentes capas de rellenos se podrán aceptar bolones de tamaño máximo igual a un 1/2 del espesor compactado de la capa y en una proporción tal que quede uniformemente distribuida, sin formar nidos ni zonas inestables. Las capas de rellenos deberán ser compactadas al 95% de la D.M.C.S. del Proctor Modificado, NCh 1534 II – D, o al 80% de la densidad relativa, NCh 1726, según corresponda.

7.6.1.4 Sub-rasante Natural

Una vez ejecutados los trabajos necesarios para dar los niveles de subrasante se deberá proceder como se indica:

- El suelo se escarificará 0.20 m y se compactará a objeto de proporcionar una superficie de apoyo homogénea, con la excepción de suelos finos del tipo CH y MH, en que se cuidará de no alterar la estructura original del suelo.

- La compactación se realizará hasta obtener una densidad mayor o igual al 95% de la D.M.C.S. del Proctor Modificado, NCh 1534 II – D, o al 80% de la densidad relativa, NCh 1726, según corresponda.

- El Contratista deberá solicitar la recepción de esta partida antes de proceder a la colocación de la capa estructural siguiente. Para este efecto deberá presentar los resultados obtenidos por el laboratorio de terreno.

- La subrasante terminada deberá cumplir, además de la compactación especificada, con las pendientes y dimensiones establecidas en el proyecto.

7.6.1.5 Controles

Sub-rasante natural, subrasante mejorada y rellenos.

a) De compactación

Un ensayo de densidad “in-situ” cada 350 m² como máximo por capa.

Se controlará la compactación a través del ensayo del cono de arena, sin perjuicio del uso del densímetro nuclear, en forma complementaria cuando corresponda, destacándose que su uso queda restringido tratándose de subrasantes de pumicitas o suelos con algún contenido de material granular.

La I.T.O. verificará que el densímetro nuclear se encuentre debidamente calibrado usando como referencia el ensayo del cono de arena. Se aceptará como límite la certificación cada 12 meses y, para cada obra en la que se decida utilizar este instrumento, se deberá previamente establecer con precisión la curva de calibración correspondiente con resultados obtenidos para el suelo del proyecto en ejecución y usando el ensayo de cono de arena con al menos 10 puntos.

b) De uniformidad de compactación

En caso de que la I.T.O. encuentre poco homogénea la uniformidad de compactación de la “capa granular”, solicitará al autocontrol de la Empresa Contratista un control de uniformidad de la compactación realizada a través del cono de arena o densímetro nuclear.

c) CBR

Un ensayo como mínimo.

De detectarse heterogeneidad del suelo de subrasante o de rellenos, se tomarán otros CBR complementarios.

d) Acciones de control.

Serán realizadas por el laboratorio del Contratista. Este laboratorio deberá encontrarse con inscripción vigente en los registros del Minvu.

7.6.2 SUBBASE

La capa de subbase deberá cumplir las siguientes especificaciones:

7.6.2.1 Materiales

El material a utilizar deberá estar homogéneamente revuelto, libre de grumos o terrones de arcilla, materiales vegetales o de cualquier otro material perjudicial.

Deberá contener un porcentaje adecuado de partículas chancadas para lograr el CBR especificado y el 60% o más de las partículas retenidas en el tamiz N° 4 ASTM (American Society for Testing and Materials), tendrán a lo menos 2 caras fracturadas.

Esta subbase estará constituida por mezclas naturales o artificiales de agregados granulares y finos de tal manera que estén comprendidos entre la siguiente banda granulométrica:

Tabla 9-9 Banda Granulometrica de la Sub-Base

TAMIZ ASTM	% que pasa
1"	100
3/4"	55-100
N°4	30-75
N°10	20-65
N°40	10-50
N°200	0-20

7.6.2.2 Límites de Atterberg

La fracción del material que pasa la malla N° 40 deberá tener un límite líquido (L.L.) inferior a 35% y un índice de plasticidad (I.P.) inferior a 8%.

7.6.2.3 Desgaste "Los Ángeles"

El agregado grueso deberá tener un desgaste inferior a un 40% de acuerdo al ensayo de desgaste "Los Ángeles", NCh 1369.

7.6.2.4 Poder de Soporte California (CBR)

El CBR debe ser igual o superior al 50%. El C.B.R. se medirá a 0.2" de penetración en muestra saturada y previamente compactada a una densidad igual o

superior al 95% de la D.M.C.S. obtenida en el ensayo Proctor Modificado, NCh. 1534 II – D.

7.6.2.5 Compactación

La sub-base deberá compactarse hasta obtener una densidad no inferior a un 95% de la D.M.C.S. obtenida en el ensayo Proctor Modificado, NCh 1534 II – D.

7.6.2.6 Controles

a) Compactación

En la capa de sub-base, se efectuará un ensayo de Densidad " in-situ " cada 500 m² como máximo.

Se controlará la compactación a través del ensayo del cono de arena, sin perjuicio del uso del densímetro nuclear, en forma complementaria cuando corresponda.

La I.T.O. verificará que el densímetro nuclear se encuentre debidamente calibrado usando como referencia el ensayo del cono de arena. Se aceptará como límite la certificación cada 12 meses y, para cada obra en la que se decida utilizar este instrumento, se deberá previamente establecer con precisión la curva de calibración correspondiente con resultados obtenidos para el suelo del proyecto en ejecución y usando el ensayo de cono de arena con al menos 10 puntos.

b) Uniformidad de compactación

En caso que la I.T.O. encuentre poco homogénea la uniformidad de compactación de la "capa granular", solicitará al autocontrol de la Empresa Contratista un control de uniformidad de la compactación realizada a través del cono de arena o densímetro nuclear.

c) C.B.R.

Un ensayo por obra si el material proviene de una planta de áridos fija o uno por planta de procedencia.

d) Graduación y Límites de Atterberg

Un ensayo por obra si el material proviene de una planta de áridos fija o uno por planta de procedencia.

e) Desgaste “Los Ángeles”

Un ensayo por obra si el material proviene de una planta de áridos fija o uno por planta de procedencia.

f) Tolerancia de espesor y terminación superficial

Se aceptará una tolerancia de terminación máxima de + 0 y - 10 mm. En puntos aislados, se aceptará hasta un 5% menos del espesor de diseño.

g) Las acciones de control.

Serán realizadas por el laboratorio del Contratista. Este laboratorio deberá encontrarse con inscripción vigente en los registros del Minvu.

7.6.3 GEOCELDAS

Finalmente, las características del producto a utilizar quedan especificadas en la siguiente tabla:

Tabla 9-10 Propiedades de geocelda seleccionada

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	NORMAS	UNIDAD	VALOR DE LA PRUEBA
Densidad Mínima de Polímeros	ASTM D 1505	g/cm ³ (lb/ft ³)	0.935 - 0.965 (58.4 - 60.2)
Resistencia de Agrietamiento con cargas constantes de tensión	ASTM D 5397	horas	> 400
Resistencia Medioambiental de Agrietamiento	ASTM D 1693	horas	6000
Contenido de Carbon Negro	ASTM D 1603	% por peso	1.5% mínimo
Espesor Nominal de la lamina antes de texturar	ASTM D 5199	mm(mil)	1.27 (50) -5%, +10%
Espesor Nominal de la lamina después de texturar	ASTM D 5199	mm(mil)	1.52 (60) -5%, +10%
Las tiras de polietileno deberán texturizarse con dentaciones romboides. Las dentaciones romboides deberán tener una densidad superficial de 22-31 por cm ² (140-200 por in ²)			