



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

Y TRANSPORTES

TESIS

“ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN TRIDIMENSIONAL DE

PAVIMENTOS CON GEOCELDA - TIPO DIAMANTE

EN LA CARRETERA BINACIONAL KM 1000+250

A KM 1000+255, SECTOR HUAYTIRE –

MOQUEGUA”

PRESENTADO POR:

BACH. CARLOS FABIAN SOJO CAYCHO

ASESOR:

MAG. MARIO PEDRO RODRIGUEZ VASQUEZ

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN

INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA Y

TRANSPORTES

MOQUEGUA - PERÚ

2022

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	
PÁGINA DE JURADO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE APÉNDICES	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO I	
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1 Descripción de la Realidad Problemática.....	1
1.2 Definición del Problema.....	3
1.2.1 Problema General	3
1.2.2 Problemas Específicos	3

1.3	Objetivo de la Investigación.....	3
1.3.1	Objetivo General.....	3
1.3.2	Objetivos Específicos	3
1.4	Justificación y Limitaciones de la Investigación.....	4
1.4.1	Alcances	4
1.4.2	Limitaciones	4
1.5	Variables.....	5
1.5.1	Operacionalización de Variables.....	5
1.6	Hipótesis de la Investigación	5
1.6.1	Hipótesis General.....	5
1.6.2	Hipótesis Específicas	5
 CAPÍTULO II		
 MARCO TEÓRICO		
2.1	Antecedentes de la Investigación	6
2.2	Bases Teóricas.....	11
2.3	Marco Conceptual	23
 CAPÍTULO III		
 MÉTODO		
3.1	Tipo de Investigación	34
3.2	Diseño de Investigación	34
3.3	Población y Muestra.....	35

3.4	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	36
3.5	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	37
CAPÍTULO IV		
ANÁLISIS DE RESULTADOS		
4.1	Presentación de resultados por variables.....	38
4.2	Contrastación de hipótesis.....	70
4.3	Discusión de resultados	78
CAPÍTULO V		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1	Conclusiones	80
5.2	Recomendaciones.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
APÉNDICES		85
ANEXOS		86

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Obtención de Resultados de Laboratorio.....	48
Tabla 2. Calificación del suelo en función de la subrasante.....	51
Tabla 3. Deflexión Vertical de Pavimento con Geocelda – Viga Benkelman.	52
Tabla 4. Deflexión Vertical de Subrasante – Viga Benkelman	52
Tabla 5. Esfuerzo y Deformación - Pavimento con Geocelda.....	58
Tabla 6. Esfuerzo y Deformación – Subrasante	59
Tabla 7. Presiones – Pavimento con Geocelda.....	60
Tabla 8. Presiones – Subrasante	61
Tabla 9. Análisis de Costos de Pavimento sin y con Geocelda	62
Tabla 10. Deflexiones Verticales – Pavimento con Geocelda.....	64
Tabla 11. Deflexiones Verticales – Subrasante	64
Tabla 12. Costo comparativo en m ²	69
Tabla 13. Análisis Estadístico Anova – Ensayos de Laboratorio.....	71
Tabla 14. Análisis Estadístico Anova – Deflexiones Verticales Viga Benkelman.....	72
Tabla 15. Análisis Estadístico Anova – Deflexiones Verticales Método Numérico	73
Tabla 16. Análisis Estadístico Anova – Deflexiones Verticales Método Numérico	74

Tabla 17. Análisis Estadístico Anova – Costos de Ejecución	76
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sección Transversal de un pavimento	13
Figura 2. Deformaciones de pavimento.....	14
Figura 3. Comparación de deformaciones de pavimento	15
Figura 4. Parámetros de geocelda	16
Figura 5. Plancha de geocelda	17
Figura 6. Diamond Grid Heavy Duty	17
Figura 7. Autoencastrable.....	18
Figura 8. Plancha Autoencastrable	19
Figura 9. Planta de asfalto.....	19
Figura 10. Colocación de planchas	20
Figura 11. Malla uniaxial.....	21
Figura 12. Malla uniaxial.....	22
Figura 13. Malla uniaxial.....	23
Figura 14. Deformación tridimensional.....	24
Figura 15. Esfuerzo vs Deformación	25
Figura 16. Esfuerzo vs Deformación	26
Figura 17. Metodología de deformación.....	28
Figura 18. Distribución de esfuerzos para cargas puntuales según Boussinesq	29
Figura 19. Distribución de carga puntual.....	31
Figura 20. Método de módulo elasticidad equivalente por Palmer y Barber	32
Figura 21. Preparación de Ensayo de Viga Benkelman.....	38
Figura 22. Ejecución de Ensayo de Viga Benkelman.....	39

Figura 23. Ensayo de mecánica de suelos en laboratorio	39
Figura 24. Paisaje de la carretera Huaytire – Moquegua	40
Figura 25. Ensayo de Análisis Granulométrico	42
Figura 26. Ensayo de Límite Líquido	42
Figura 27. Ensayo de Límite Plástico	43
Figura 28. Ensayo Contenido de Humedad	44
Figura 29. Ensayo Peso Unitario Suelto	44
Figura 30. Ensayo Peso Unitario Compactado	45
Figura 31. Ensayo de Proctor.....	46
Figura 32. Ensayo de CBR	46
Figura 33. Ensayo de Viga Benkelman	47
Figura 34. Clasificación SUCS	48
Figura 35. Clasificación AASHTO.....	49
Figura 36. Ensayo CBR – Calicata 1	50
Figura 37. Clasificación Cualitativa	53
Figura 38. Histograma de resultados	63
Figura 39. Comparativo Deflexiones – P. con Geocelda.....	64
Figura 40. Comparativo Deflexiones – Subrasante	65
Figura 41. Esfuerzo y Deformación - Pavimento con Geocelda	66
Figura 42. Esfuerzo y Deformación - Subrasante.....	66
Figura 43. Bulbo de Presiones - Pavimento con Geocelda.....	67
Figura 44. Bulbo de Presiones - Subrasante	68
Figura 45. Diferencia de costos sin y con geocelda tridimensional.....	69

Figura 46. Comparación en m2 de la estructura de pavimento reforzado sin y con
geocelda..... 70

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
APÉNDICE 1. Matriz de Consistencia	85

RESUMEN

Las Geoceldas Tridimensionales son una alternativa técnica y tecnológicamente viable ya que se utilizan como material reforzado en varias divisiones de la ingeniería civil. En pavimentos flexible se da por la necesidad de aumentar el tiempo de vida útil del pavimento, base, subbase y subrasante. Los métodos numéricos es una herramienta adecuada para resolver problemas relacionados con naturaleza de los materiales siempre y cuando se analicen lineal y no lineal. El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar el comportamiento y las deformaciones del pavimento flexible con y sin la aplicación de la Geocelda Tridimensional (Diamond Grid). El método de Boussinesq y Palmer y Barber en la capa base, subbase capa y subrasante elemento de interfaz de capa y modelo elástico utilizado para geomallas para simular la interacción.

Palabras Clave: Deformación, Geocelda Tridimensional y Pavimentos.

ABSTRACT

Three-Dimensional Geocells are a technically and technologically viable alternative since they are used as a reinforced material in various divisions of civil engineering. In flexible pavements it is given by the need to increase the useful life of the pavement, base, subbase and subgrade. Numerical methods are an adequate tool to solve problems related to the nature of materials as long as they are analyzed linear and non-linear. The objective of this research work is to evaluate the behavior and deformations of the flexible pavement with and without the application of the Three-Dimensional Geocell (Diamond Grid). The Boussinesq and Palmer and Barber method on the base layer, subbase layer, and subgrade layer interface element and elastic model used for geogrids to simulate interaction.

Keywords: Deformation, Three-Dimensional Geocell and Pavements.

INTRODUCCIÓN

Las Geoceldas se define como las estructuras tridimensionales que van a permitir confinar suelos y materiales granulares, así mismo tener como objetivo la mejora de la fundación de una carretera.

Cuando se tiene un estado de deterioro de una vía se puede evidenciar que ha perdido su capacidad estructural, es por ello que es necesario su mantenimiento y rehabilitación que deben ser orientadas a dar una adecuada condición de operatividad, seguridad vial y condición de servicio.

Otro objetivo de la habilitación de vías pavimentadas tiene es construir o restablecer la funcionalidad del pavimento, para que pueda ser competente por un cierto período de servicio. Todas estas actividades integradas pueden generar el reemplazo total o parcial de las capas asfálticas. Mayormente los procesos constructivos de asfaltado son relacionados al aumento de periodos de vida útil, ante ello es necesario la buena selección de materiales los cuales deben concertar presupuestos y no tener un alto impacto ambiental y a la vez cumplir con la función adecuada de durabilidad.

El presente informe final de tesis escoge la geocelda Diamond Grid debido a que la construcción de pavimentos, mantenimiento de carreteras y operatividad de vías a requerido utilizar nuevas alternativas tecnológicas que debes cumplir requisitos como: ser amigable con el medio ambiente, sean rentables económicamente y sean viables a la hora de su ejecución; es por ello que el uso de la geocelda es una alternativa viable, debido a que cumple con las tres condiciones y características mencionadas, además es una solución directa para los suelos que tienen poca capacidad portante como lo son los suelos finos de Huaytire - Moquegua la cual presenta alta deformación .

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la Realidad Problemática

Problemática Internacional

Uno de los grandes problemas en los gobiernos regionales y/o municipios como también en las entidades privadas es que el pavimento debe cumplir con su vida útil, ya que un desgaste prematuro origina pérdidas económicas.

Otro problema captado comúnmente es poder encontrar materiales de buena calidad que a la vez sean fáciles de explotar y se puedan trasladar hacia la zona de ejecución del proyecto.

Por esta razón se han dado investigaciones y experimentos para obtener nuevos métodos, mecanismos y materiales para una adecuada cimentación de pavimentos que vayan acorde a los requerimientos mínimos (estructurales, técnicos, ambientales y económicos). Como resultado durante estos últimos años los experimentos realizados han arrojado excelentes resultados y uno de ellos son las GEOCELDAS TRIDIMENSIONALES.

Problemática Nacional

Durante muchos años, las autoridades viales del Perú han tomado medidas para reducir los costos de construcción de carreteras, los costos operativos de los vehículos y mantenimientos, al tiempo que mejoran el rendimiento de las carreteras para mejorar la sostenibilidad de la infraestructura del pavimento. Estos esfuerzos se han realizado comúnmente a través de la reducción de los costos económicos evaluados mediante análisis de costos del tiempo de vida del pavimento. Sin embargo, los esfuerzos para abordar la sostenibilidad son incompletos si no se consideran los impactos ambientales y sociales.

Problemática Regional

En zona de la Carretera Binacional, Sector Huaytire - Moquegua constantemente se visualiza las fallas prematuras del pavimento, ocasionando perjuicios económicos y sociales puesto que reduce la transitabilidad en dicha zona, más aún siendo un tramo crítico cuya temperatura llega a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se encuentra a 5,530 msnm.

En las vías de la zona alto andina de Moquegua se tiene alta presencia de suelos volcánicos e inestables (suelos blandos) o suelos saturados lo cual provoca que los suelos tengan características mecánicas y físicas de baja calidad.

1.2 Definición del Problema

1.2.1 Problema General

¿La Geocelda tridimensional es la solución a los problemas de refuerzo estructural de pavimento en Suelo inestable de Carretera Binacional Km 1000+250 a Km 1000+255, Sector Huaytire - Moquegua?

1.2.2 Problemas Específicos

- En la carretera Huaytire - Moquegua existe suelos inestables con alta deformación.
- Los Geosintéticos son productos nuevos y existe poca información de su metodología de aplicación.
- Los mejoramientos tradicionales encarecen el costo de la carretera Huaytire - Moquegua.

1.3 Objetivo de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Demostrar que el uso de las Geoceldas tridimensionales es la solución de los problemas de inestabilidad del suelo en la carretera Huaytire - Moquegua.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo de fundación de la carretera Huaytire - Moquegua.
- Determinar la deformación del suelo antes de la aplicación de la Geocelda tridimensional en la carretera Huaytire - Moquegua.

- Realizar las comparaciones de costos entre la ejecución de un pavimento tradicional versus el uso de la Geocelda tridimensional.

1.4 Justificación y Limitaciones de la Investigación

Al momento de aplicar la Geocelda tridimensional como sistema de refuerzo en pavimentos acompañado de un adecuado proceso de compactación se conformará un pavimento con alta resistencia que cumpla con la necesidad del tráfico y presupuesto establecido, dicha investigación beneficiará no solo a la Carretera Binacional, Sector Huaytire - Moquegua, sino servirá de referencia y alternativa de propuesta de mejora en las futuras vías de la región Moquegua.

1.4.1 Alcances

- El presente informe final definirá que el correcto uso de la Geocelda tipo Daimon Grid – tridimensional es la solución a los problemas de serviciabilidad en las carreteras ocasionados por los suelos inestables que se encuentran en el departamento de Moquegua.
- Se buscará analizar el impacto de la geocelda tridimensional en el ámbito técnico, vial y económico; que se utilizará en los pavimentos sobre suelo inestable con baja capacidad portante.

1.4.2 Limitaciones

- No se tiene la adecuada experiencia al momento de aplicar las geoceldas tridimensionales en carreteras de la región Moquegua.
- La falta de autorización y permisos para la intervención.

1.5 Variables

1.5.1 Operacionalización de Variables

1.5.1.1 Variable Independiente (X)

- Aplicación de la Geocelda tridimensional.

1.5.1.2 Variable Dependiente (Y)

- Deformación del Pavimento.

1.6 Hipótesis de la Investigación

1.6.1 Hipótesis General

El uso de la Geocelda tridimensional es la solución a los problemas de inestabilidad del suelo en la carretera Binacional KM 1000+250 a KM 1000+255, Sector Huaytire - Moquegua.

1.6.2 Hipótesis Específicas

1.6.2.1 Los ensayos de laboratorio demuestran la inestabilidad de suelo de fundación mediante ensayos estándares (Granulometría, Límites, Clasificación, CBR, Deformación, Contracción).

1.6.2.2 El uso de la Geocelda tridimensional mejora los problemas de inestabilidad de suelo.

1.6.2.3 El empleo de Geocelda tridimensional reduce los costos de pavimentación en suelo inestable.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Durante muchos años, las autoridades viales del Perú han tomado medidas para reducir los costos de construcción de carreteras, los costos operativos de los vehículos y mantenimientos, al tiempo correctivas tomadas después de una serie de fiascos, uno de estos de gran naturaleza. En ambos casos, las geocélulas se instalaron con bastante rapidez. Si bien las soluciones se ejecutaron en casos de emergencia, no fue necesario realizar ningún trabajo adicional y las soluciones demostraron ser a largo plazo. Este documento también intenta resaltar que las geocélulas no tienen que formar parte de un sistema de gestión de desastres, pero pueden y deben desempeñar un papel importante como parte del sistema diseñado para autopistas con varias ventajas inherentes.

Investigaciones Internacionales

Babu Sundararaman (2017) Artículo. Análisis de pavimento flexible utilizando Geocell-A Estudio de caso comparativo. Debido a la aplicación repetida de cargas, el rendimiento del pavimento se deteriora y, por lo tanto, se llevan a cabo procedimientos de evaluación de daños para corregir los defectos producidos en el pavimento flexible. La metodología de diseño para pavimentos flexibles a menudo requiere abordar los mecanismos de falla del pavimento, intensidades de carga y también desarrollar enfoques adecuados para la evaluación del rendimiento del pavimento.

En los últimos años, el uso de geocélulas para mejorar el rendimiento del pavimento ha recibido una atención considerable. El uso de geocélulas aumenta la estabilidad de las carreteras y mejora su rendimiento al mejorar la capacidad de carga del suelo. La geocélula también ayuda a disminuir el espesor de la densa capa bituminosa del pavimento flexible, esto a su vez resulta en la reducción del mantenimiento del costo de la construcción de carreteras. Para proporcionar una solución rentable y duradera para un problema en particular, el uso de Geocélulas SW 330 se ha propuesto en el presente estudio. Este documento se enfoca en el tema del fortalecimiento del limo de suelo de alta plasticidad (MH) disponible en las cercanías de la Carretera Nacional 8, la Estación de ferrocarril Bhilad, la Escuela Swaminarayan y el GIDC de Vapi, región de Gujarat, para ser utilizado como material de subgrado La ayuda de SW 330 Geocells como refuerzo. La prueba de CBR se llevó a cabo con SW 330 Geocell y sin Geocell tanto en

condiciones no remojadas como remojadas de suelo tipo MH para identificar los efectos del sistema de refuerzo de geocélulas SW 330. El uso de SW 330 Geocell aumentó el valor CBR y ayudó a disminuir el espesor de la capa bituminosa densa del pavimento flexible de 780 mm a 600 mm en el análisis de diseño. El uso de Geocélulas SW 330 también podría aumentar la estabilidad de las carreteras y mejorar su rendimiento al mejorar la capacidad de carga del suelo. Se hace un esfuerzo para hacer un estudio comparativo entre el diseño de pavimento flexible convencional y el tipo de pavimento flexible reforzado con geocelda Strata SW 330 geocell. Se comparan los resultados de diseño de ambos pavimentos; Las conclusiones analizadas y probables se enumeran aquí con el análisis de la tasa

Shahrokh P. Bagli (2017) Artículo. Geocells: el camino hacia el avance con la innovación de tres dimensionales. El entorno geotécnico fue completamente revolucionado con la aplicación de geosintéticos, empezando por los humildes no tejidos hasta los geomompuestos más complejos. La mayoría de estos sistemas son bidimensional. Los sistemas de confinamiento celular agregan la tercera dimensión a los geosintéticos, que se abren más avenidas de aplicaciones, que van desde proporcionar fortaleza hasta geosistemas, hasta protección contra erosión. Los sistemas de confinamiento celular son conocidos popularmente como "geocélulas". Las geocélulas son fuertes, ligeras, Sistemas tridimensionales fabricados con polietileno de alta densidad (HDPE) soldado por ultrasonidos Tiras que son expandibles en el sitio para formar una estructura similar a un panal, las geocélulas se llenan

con suelos compactos no cohesivos que están confinados dentro de las paredes celulares. El compuesto forma un rígido para una estructura semirrígida. La profundidad de las geocélulas así como el tamaño de cada unidad celular pueden variar según el requisito de diseño.

Investigaciones Nacionales

Córdova, G (2016) Sustento la Tesis “Protección de un muro de contención mediante un sistema de drenaje con geocompuestos en el hospital el Carmen de Huancayo – 2016”. (Tesis de Grado) Universidad Peruana los Andes. En esta investigación el tesista dio respuesta a la posible solución de: protección de un muro de contención mediante un sistema de drenaje con geocompuestos en el hospital El Carmen de Huancayo. Es por ello que el objetivo describe como sería la protección del muro de contención mediante un sistema de drenaje con geocompuestos; correspondiente es que un sistema de drenaje con geocompuestos permitirá una adecuada protección del muro de contención es a lo que determinamos la hipótesis. Se indica que el tipo de investigación aplicada, el nivel de investigación es explicativo, descriptivo y correlacional, el diseño es experimental con un enfoque cuantitativo. La población está conformada por toda la construcción del hospital El Carmen; la muestra es no probabilística y para efectos de la presente tesis se tomó al muro de contención que protege al bloque 1 y el bloque 2. El trabajo de investigación termina que para la adecuada protección del muro de contención, se debe emplear un sistema de drenaje geocompuesto; por ello se determinó emplear el FP 2L 20.2 MacDrain, porque este producto con sus

características y propiedades que va a dar una buena funcionalidad y desempeño del material. Se da el aseguramiento y protección de la estructura, el trabajo de investigación implementa una planta de tratamiento de agua para la reutilización de las aguas captadas, almacenaje y distribución de estas. Como conclusión; el trabajo de investigación en mención desarrolla un excelente y optimo comportamiento de protección del Muro de Contención, mediante el Sistema de Drenaje Mediante con Geocompuestos; esto paralelamente aporta a la protección del medio ambiente, considerando que la escases de agua es un problema global, considerando que debido al calentamiento global este recurso está disminuyendo; por ende se está analizando utilizar nuevamente las aguas subterráneas que se pierden en el riego y el consumo humano que significaría un gran ahorro y aporte a este recurso.

Nolasco, E (2020) en su tesis “Uso de geoceldas en pavimentos flexibles usadas en los últimos 10 años”, sustento la revisión sistemática mediante la selección del estudio de la comparación entre pavimentos flexibles con geoceldas y sin geoceldas, este tiene como principal parámetro los criterios tanto de inclusión como de exclusión de los artículos relacionados al tema en investigación, las estrategias de búsqueda, el respectivo registro de los datos con su adecuado análisis cuantitativo en cada estudio revisado, comparado y analizado.

Uno de los criterios de análisis es el problema de investigación que está directamente relacionado al título, tal cual demanda la metodología de investigación, es así como se definen los objetivos y las hipótesis, con la continuación de que los documentos de investigación sean o no considerados en la revisión sistemática, conjuntamente con la aplicación de las técnicas estadísticas para finalmente ser analizados de forma cuantitativa los resultados finales de los estudios analizados y recopilados.

Así la búsqueda de su información fue de fuentes confiables e indica que logró desarrollar un buen uso de geocelda en pavimentos flexibles. Tiene como objetivo la revisión de todo lo relacionado a la geocelda que se encuentren en tesis, artículos científicos, revistas, libros, en bases de calidad en los últimos 10 años. Todo ello estuvo sujeto a una constante evaluación teniendo como prametro y/o variable principal el Uso de Geoceldas en pavimentos flexibles, para cada uno de los tipos de revestimiento con el fin de demostrar cómo influyen al momento de la concepción y diseño de estas estructuras. Después de realizar todo el diseño, se continua con el análisis de sus variables definidas para un adecuado componente comparativo, todo ello en cumplimiento a la norma de construcción peruana CE 020 Estabilización de suelos y taludes.

2.2 Bases Teóricas

a) Estudio de Mecánica de suelos

Podría decirse que el suelo es el componente más crítico de cualquier sistema de transporte, ya que todos los sistemas de transporte se construyen sobre, dentro o con suelo y productos del suelo. La caracterización y evaluación del

suelo es fundamental para el desempeño de las estructuras de pavimento, que principalmente son:

- I. Determinación de las propiedades y características del suelo a utilizar en el diseño de pavimentos. Estas propiedades incluyen, entre otras, la resistencia del suelo, el módulo aplicable (o rigidez) y la estabilidad volumétrica de una estructura de pavimento; y
- II. Determinar las características del sitio de influencia que podrían requerir modificaciones a la estructura del pavimento o trabajos adyacentes para acomodar esas características.

A partir de esta información, se debe preparar un informe que documente los hallazgos de la investigación geotécnica.

b) Concepto de pavimento

El pavimento es una estructura que va a permitir que haya una interacción y comunicación vía terrestre, esta viene conformada por una o varias capas de materiales elaborados o no, los cuales son colocados sobre la subrasante (terreno acondicionado), que tiene como finalidad el tránsito de vehículos.

- Que se con alta seguridad.
- Que se tenga buena comodidad.
- Costo óptimo de operación
- Superficie impermeable.
- Textura y color que van acorde al requerimiento.
- Buena resistencia a la repetición de cargas.
- Adecuada resistencia a la acción del medio ambiente.

- Que no trasmita a las capas inferiores esfuerzos mayores a su resistencia.

Se debe considerar que el pavimento puede tener una construcción con varios materiales, como Asfalto, Concreto, Adoquines o Piedras. Sin embargo, en algunos países el término pavimento suele darse al Asfalto que es el material que utilizan para la construcción de vías de comunicación, rutas y/o calles.

En cuanto a el famoso hormigón o las conocidas mezclas asfálticas; son materiales que son más usados para la creación de pavimento urbano, debido al buen rendimiento de soporte y permite el constante paso de vehículos sin sufrir daños grandes.

En la actualidad se ha hecho prevalecer y difundir que la construcción de los pavimentos sea sostenible y que respete el medio ambiente.

Se detalla a continuación un gráfico típico de sección de pavimento flexible:



Figura 1. Sección Transversal de un pavimento

Fuente: CANACEM, 2014

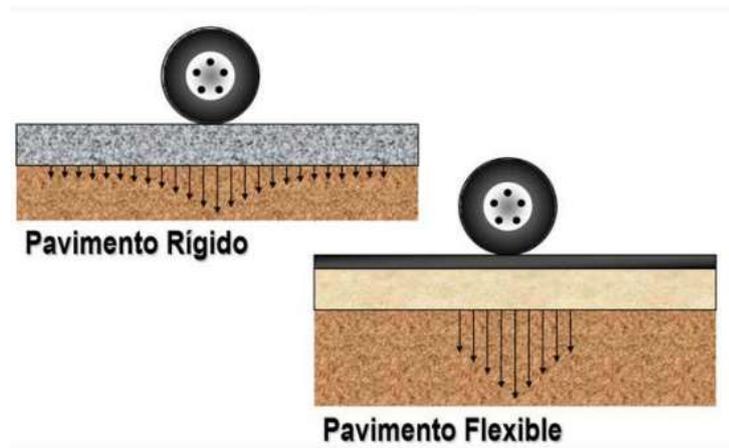


Figura 2. Deformaciones de pavimento

Fuente: CANACEM, 2014

c) Pavimentos con Geoceldas

Este tipo de pavimentos nos brinda características como la captación del escurrimiento y posterior retención en el espesor del pavimento, para luego conducir e infiltrar el líquido a la subrasante; también permite el paso del agua de tal forma que evacua la superficie de rodadura.

Mediante la ejecución de un pavimento flexible, se configura un sistema de amortiguación y de escurrimiento pluvial, es decir con granulometría abierta la cual se encuentra contenida en las geoceldas, es por ello que con este sistema se aprovecha como sistema de drenaje al propio pavimento.

Una ventaja de usar las geoceldas es que se puede usar granulometría uniforme (material granular con alto % de vacíos) y a la vez no pierda la capacidad de soporte de toda la capa debido al confinamiento que brinda la geocelda tridimensional incluso cuando se encuentra saturado.

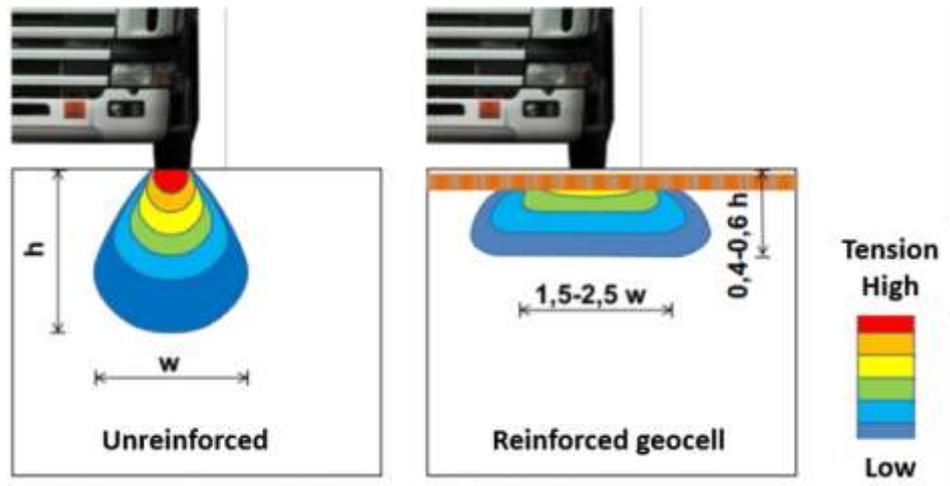


Figura 3. Comparación de deformaciones de pavimento

Fuente: CAMINEROS, 2018

Se puede considerar como propiedades esenciales de la geocelda: la resistencia a la deformación permanente (fatiga) y la rigidez elástica. Para el caso de los materiales sintéticos (aplicados como refuerzo) se tiene que la deformación plástica, se define como una deformación baja, por ejemplo, menos del 1.5 %. La efectividad real del refuerzo en base se refleja en el factor de mejoramiento del soporte (SIF) y en el factor de mejoramiento de módulo (MIF), cuyas características principales son:

Propiedad	Unidad	Método de prueba	Valor
Módulo de rigidez dinámica (neto) (prueba DMA)	MPa	EN-ISO 6721-1 ASTM E2254	**
Distorsión plástica acumulada (prueba de Método isotérmico escalonado (SIM))	% m/m	ASTM D6992	<3
Fuerza de tracción, pared celular no perforada (ancha)	kN/m	EN-ISO 10319	20-29
Fuerza de tracción, pared celular perforada (ancha)	kN/m	EN-ISO 10319	16-25
Resistencia a los UV y a la oxidación (Tiempo de inducción oxidativa a alta presión (HPOIT) a 150 °C)	minutos	ASTM D5885	> 400

* valores disponibles solo para geoceldas con paredes celulares rígidas

** los valores dependen de la aplicación

Figura 4. Parámetros de geocelda

Fuente: DIAMON GRID,2020

Detalles de Geocelda Tipo Diamong Grid:

Las medidas de este tipo son: novecientos (900) mm x quinientos sesenta (560) mm x cuarenta (40) mm.

Para las aplicaciones en pavimentos domésticos o rurales, ya que se tiene un enmallado o enrejillado clásico, es por ello que es adecuado para superficies limitadas que necesiten estabilización y refuerzo.

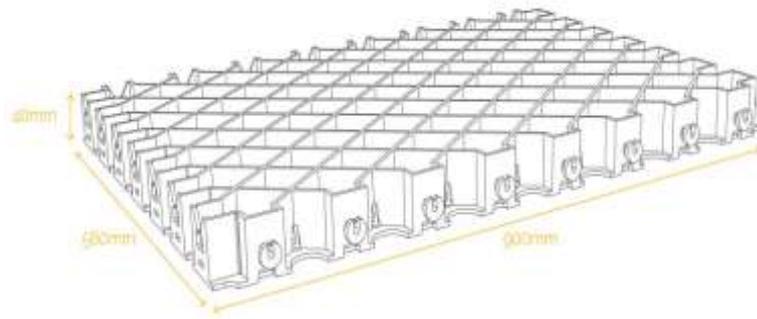


Figura 5. Plancha de geocelda

Fuente: DIAMON GRID,2020

La Diamond Grid Heavy Duty, sus medidas son: mil (1000) mm x mil (1000) mm x cuarenta (40) mm.

Este tipo está diseñado sobre todo para obras civiles y mineros, el cual presenta un enrejado o enmallado más grande.

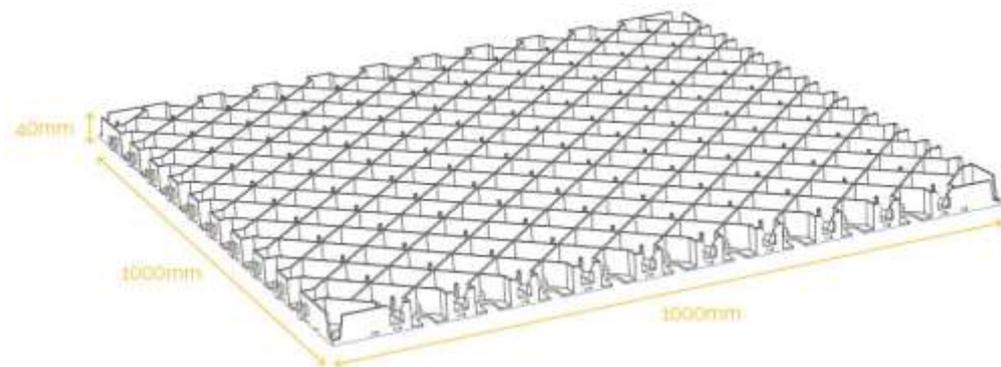


Figura 6. Diamond Grid Heavy Duty

Fuente: diamondgrid.com.

Contiene un sistema grueso y de fácil instalación a la vez es auto encastrable.

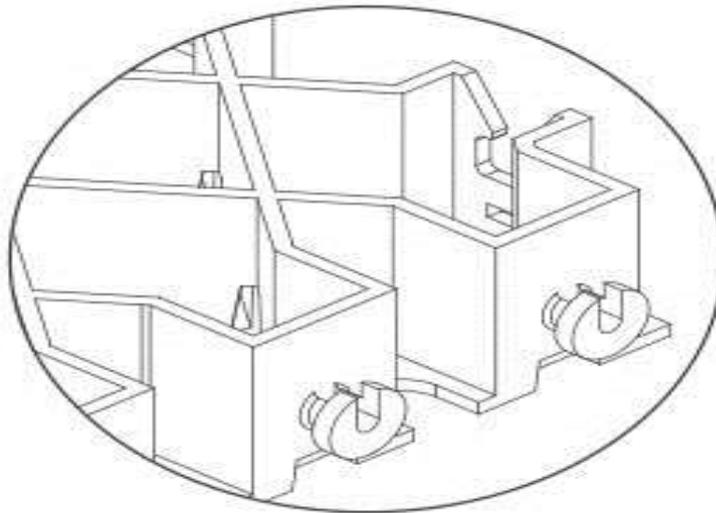


Figura 7. Autoencastrable

Fuente: diamondgrid.com.

d) Rigidez de Geocelda

Se debe considerar que una de sus principales características es la contribución con el endurecimiento del material de relleno por su alta capacidad de confinamiento, es debido al efecto Viga que se da sobre las celdas confinadas que se encuentran sobre los suelos de baja capacidad portante comportándose como una placa semirrígida con alta resistencia a la flexión y rigidez. Este efecto distribuye la carga de manera efectiva en un área amplia, lo que hace que el asentamiento diferencial disminuya (hasta un 80 %).

En la siguiente imagen se muestra la geocelda tridimensional y la planta de asfalto. Este asfalto se colocará sobre el relleno que va por encima de la geocelda Diamond Grid.



Figura 8. Plancha Autoencastrable

Fuente: elaboración en laboratorio - propia.



Figura 9. Planta de asfalto

Fuente: elaboración en laboratorio - propia.



Figura 10. Colocación de planchas

Fuente: civilsiempre123

Como parte de la ejecución se tiene el confinar el material, se tiene que la resistencia tangencial restringe la deformación lateral del material de relleno. La cohesión se manifiesta al incrementar la resistencia que a la vez viene acompañado con una rigidez alta a diferencia de otros métodos. Seguidamente las fuerzas tangenciales generadas por la presión aplicada son activadas, las cuales permiten el confinamiento del material de relleno y aumenta la resistencia.

Este sistema tiene la facilidad de colocar cualquier tipo de relleno que se encuentre disponible en la localidad.

Otra de sus características es que confina el material de relleno en x,y,z (3D) y evita que haya movimiento debajo de la carga, de manera que estabiliza el suelo.

e) Tipos de Geoceldas

Con el transcurrir de los años se ha vuelto más costoso la ejecución del movimiento de tierras, por la razón que la población ha crecido por ende las cargas vehiculares han ido en aumento, es por ello que es necesario utilizar materiales de última generación, para que así se obtengan incrementos en sus propiedades y a la vez mejoren el proceso constructivo.

En obras civiles el uso de la geomalla es necesaria porque permite y ayuda en mejoramientos, reforzamientos de caminos, taludes y/o cimentaciones.

❖ Geomalla Uniaxial

Las características de este tipo de geomalla es que su estructura solo se encuentra alienada en una dirección, unidas con juntas transversales, este tipo de geomalla es utilizada cuando se tiene definida la dirección de la aplicación de la carga.

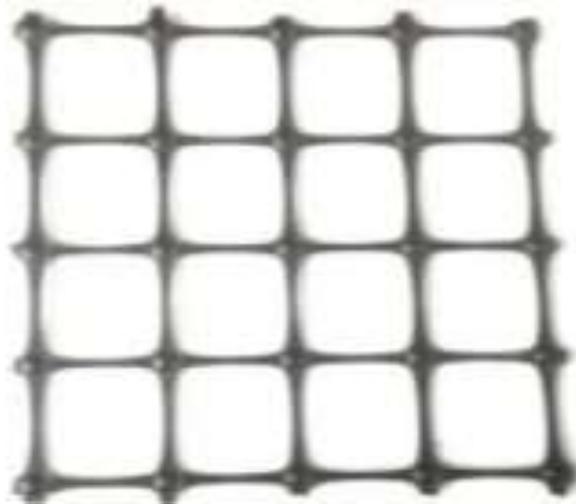


Figura 11. Malla uniaxial

Fuente: TDM asfaltos.

❖ Geomalla Biaxial

Las características de este tipo de geomalla es que su estructura se encuentra reforzada en las dos direcciones, esto permite que la distribución de los esfuerzos sea más eficiente. Este tipo de geomalla es utilizada cuando se presentan cargas altas durante un largo plazo o cuando se tiene cargas moderadas durante un determinado tiempo amplio en un corto plazo, otra de sus características es que la dirección de la instalación no exige definición debido a que funciona en ambas direcciones. Principalmente se fabrican de polipropileno y son resistentes a procesos degenerativos de los suelos.

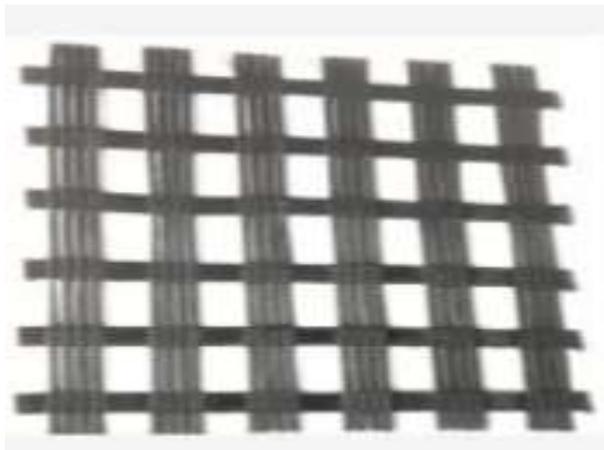


Figura 12. Malla uniaxial

Fuente: TDM asfaltos.

❖ Geocelda Tridimensional

Las Geoceldas son Geosintéticos tridimensionales ya sea tipo Diamante, Acordeón o Colmena tienen la propiedad de funcionar como un sistema el cual permite el confinamiento del suelo. Son elaboradas en base al polietileno de alta densidad resistente a la luz ultravioleta, agentes químicos y biológicos.



Figura 13. Malla uniaxial

Fuente: TDM asfaltos.

f) Asfalto

La emulsión asfáltica CSS1HP catiónica de quiebre lento, de color café y hp con polímeros es de color café, rotura lenta y estado líquido. Está modificada con polímeros y aditivos para obtener un residuo asfáltico con menor susceptibilidad térmica, mayor elasticidad y mejor adherencia.

2.3 Marco Conceptual

a) Deformación de suelos

Para la deformación de suelos aplicaremos los principios de la Teoría de la elasticidad (Ley de Hooke); Si un elemento cilíndrico lo sometemos a presión uniforme en la dirección vertical (σ_z), se genera una alteración de la longitud en todas las direcciones. Es por ello que las deformaciones son muy pequeñas comparadas con las dimensiones del cilindro, las deformaciones unitarias serán iguales al cambio relativo de la longitud.

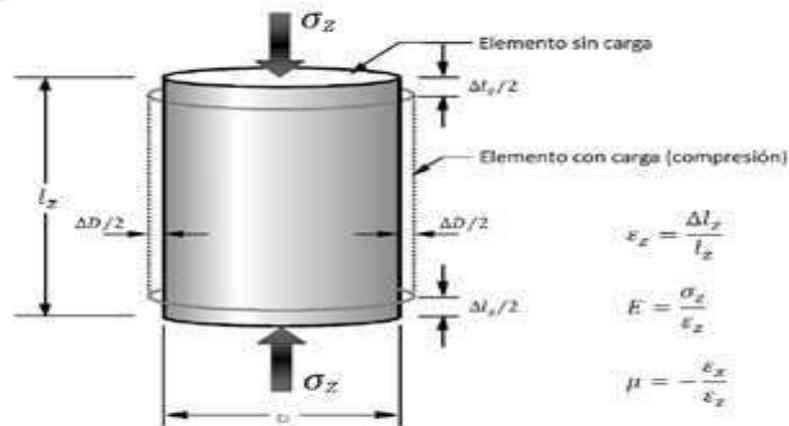


Figura 14. Deformación tridimensional

Fuente: Civilinfo.

Parámetros elásticos para el esfuerzo uniaxial.

Si el material es elásticamente lineal, entonces la relación entre el esfuerzo vertical σ_z y la deformación vertical ϵ_z , será constante, definiendo así el coeficiente de elasticidad o módulo de Young (E). a esta relación se le conoce como ley de Hooke, y para el caso unidimensional.

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (1)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad
 σ_z = Esfuerzo vertical
 ϵ_z = Deformación vertical

El esfuerzo máximo que un material puede resistir también se conoce como un límite elástico. Si la carga continúa más allá del límite elástico, algunos

materiales experimentan una reducción de la rigidez hasta el límite de rendimiento. Esta es una medida de la fuerza del material.

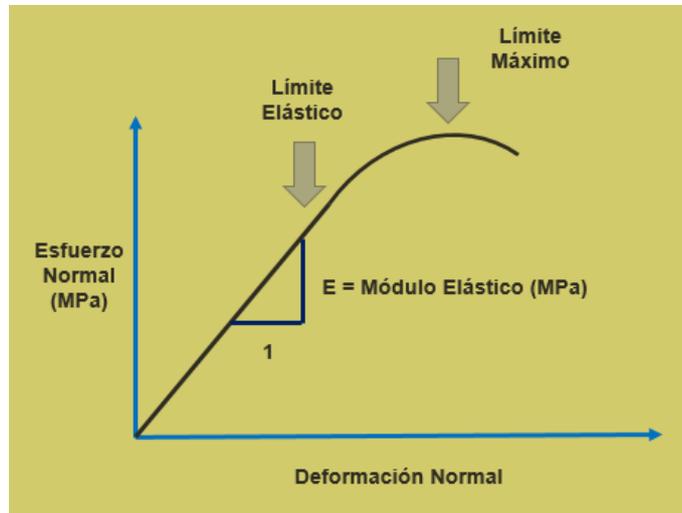


Figura 15. Esfuerzo vs Deformación

Fuente: Civilinfo.

Un material es isótropo cuando los parámetros que lo definen son los mismos en todas las direcciones. La isotropía permite la reducción del número de parámetros elásticos en un punto a dos, que son; el coeficiente de poisson (ν) y el módulo de elasticidad (E). Y también si los parámetros elásticos son iguales en todos los puntos, esta región es considerada homogénea.

Consecutivamente la deformación axial para un material considerado ideal es decir isótropico, homogéneo y elástico, provocado por una carga aplicada a un elemento tridimensional en términos de las componentes de esfuerzo, estas se encuentran dadas por la ley de Hooke a través de las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (3)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (4)$$

Dónde: (Todo ello en las direcciones x, y, z.)

E: Módulo de Elasticidad ν : Coeficiente de Poisson

ε_i : Deformaciones σ_i : Esfuerzos

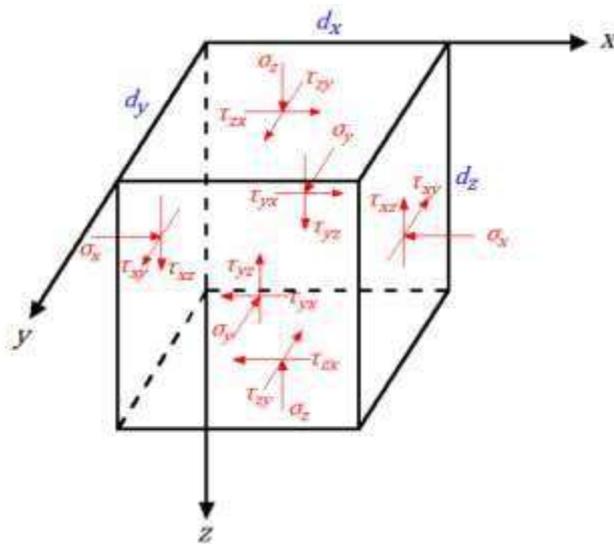


Figura 16. Esfuerzo vs Deformación

Fuente: Civilinfo.

Se muestra también los componentes del esfuerzo en las 3 direcciones y son expresadas de la siguiente manera:

$$\sigma_x = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_x \quad (5)$$

$$\sigma_y = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_y \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_z \quad (7)$$

Posteriormente podemos obtenerla deformaciones cortantes en función de las componentes de esfuerzo, de la siguiente manera:

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (8)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (9)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (10)$$

Dónde: - G: Módulo de Corte

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (11)$$

b) Teorías de Deformación tridimensional

❖ Análisis lineal

Para este caso se considera que los elementos (en este caso materiales), el comportamiento vendría hacer proporcional entre el esfuerzo que se aplica y la deformación resultante. En este caso el análisis generalmente es considerado en los análisis estructurales (pavimentos para el presente informe).

❖ Análisis no lineal

Para este caso se considera que los elementos (materiales), el comportamiento va a depender de la aplicación de esfuerzos y a la rigidez, ligada directamente

al comportamiento de suelos no estabilizados. También se considera cuando los materiales se comportan dependiendo a los esfuerzos aplicados (carga vehicular), ligado directamente a suelos no tratados o materiales no tratados.

c) Metodología de diseño de pavimentos flexibles

De acuerdo a las teorías vistas se va a considerar criterios básicos en el comportamiento de la estructura del pavimento que serán: la deformación permanente y la fatiga, lo cuales son producto de la aplicación de una carga vehicular.

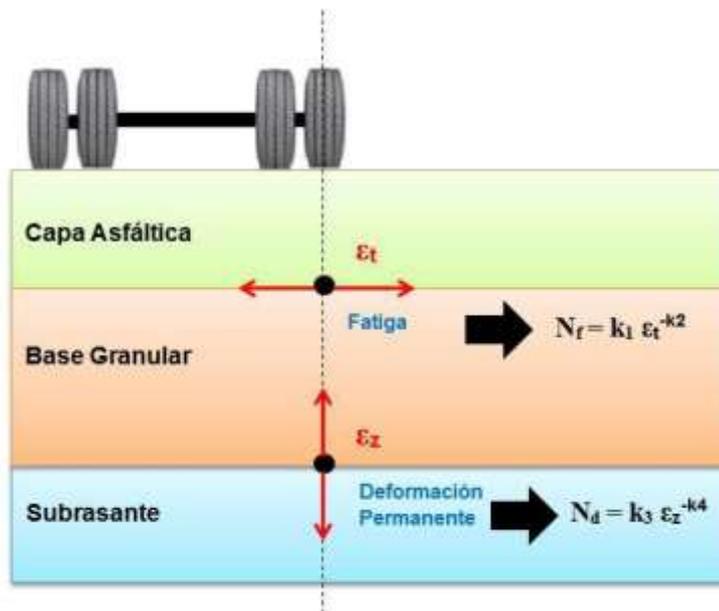


Figura 17. Metodología de deformación

Fuente: Camineros 2021.

Para el diseño de pavimentos flexibles debemos conocer su respuesta en puntos críticos, estas respuestas son definidas como las “respuestas mecánicas críticas”, que son desarrolladas a continuación:

- I. Primero tenemos **la deformación a tensión** que se da debajo de la o las capas estabilizadas directamente asociada al agrietamiento por fatiga, más conocida como “la piel de cocodrilo”. agrietamiento por fatiga, conocida también coloquialmente como “piel de cocodrilo”.

$$\epsilon_t < \epsilon_{t \text{ admisible}} \quad (12)$$

- II. Segundo tenemos **la deformación a compresión** que se da arriba de la subrasante que es asociada directamente a la deformación de la superficie del pavimento.

$$\epsilon_z < \epsilon_{z \text{ admisible}} \quad (13)$$

Boussinesq (1885)

Para calcular la distribución de esfuerzos de una carga puntual Boussinesq desarrolló las primeras expresiones aplicable en medios homogéneos, linealmente elásticos e isotrópicos. Esta solución fue comparada con la de Boussinesq dando como resultado alto porcentaje de aceptabilidad.

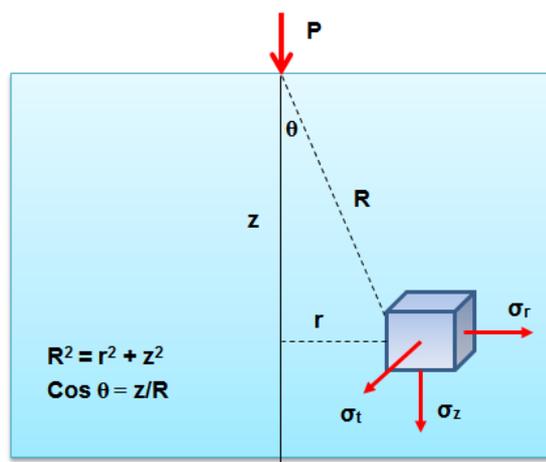


Figura 18. Distribución de esfuerzos para cargas puntuales según Boussinesq

Fuente: Civilinfo.com.

Tenemos soluciones brindadas por Boussinesq, las cuales indican que para el campo de esfuerzos y deformaciones generados por una carga puntual, se define con las siguientes ecuaciones:

Esfuerzo Vertical:

$$\sigma_z = \frac{3 P z^3}{2\pi \sqrt{r^2 + z^2}} \quad (14)$$

Esfuerzo Radial:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{3 r^2 z}{\sqrt{r^2 + z^2}} - \frac{1 - 2\nu}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right] \quad (15)$$

Esfuerzo tangencial:

$$\sigma_t = -\frac{P}{2\pi} (1 - 2\nu) \left[\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} - \frac{1}{r^2 + z^2 + z\sqrt{r^2 + z^2}} \right] \quad (16)$$

Deformación unitaria vertical:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (17)$$

Deformación unitaria radial:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (18)$$

Deformación unitaria tangencial:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \quad (19)$$

Para el caso de cargas puntuales Boussinesq la distribuyó en cargas distribuidas en área circular y determina las formulas para hallar el campo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, todo ello generado por carga circular a lo largo del eje de simetría de la misma.

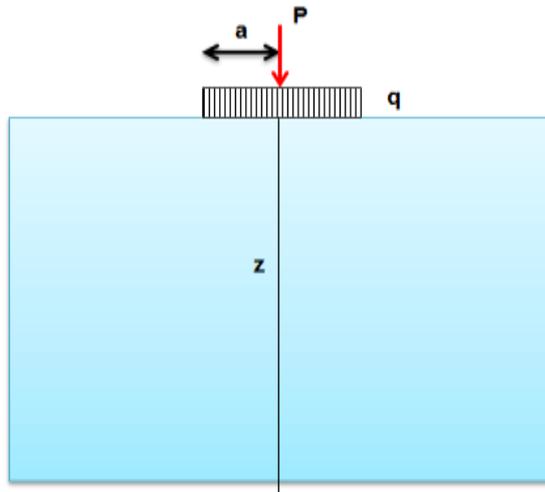


Figura 19. Distribución de carga puntual

Fuente: Civilinfo.com.

Esfuerzo vertical

$$\sigma_z = \sigma_o \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right)^3 \right] \quad (20)$$

Esfuerzo radial

$$\sigma_r = \frac{\sigma_o}{2} \left[(1 + 2\nu) - \frac{2z(1 + \nu)}{\sqrt{a^2 + z^2}} + \left(\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right)^3 \right] \quad (21)$$

Esfuerzo tangencial

$$\sigma_t = \frac{\sigma_o}{2} \left[(1 + 2\nu) - \frac{2z(1 + \nu)}{\sqrt{a^2 + z^2}} + \left(\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right)^3 \right] \quad (22)$$

Deformación unitaria vertical

$$\varepsilon_z = \frac{(1 + \nu)\sigma_o}{E} \left[\frac{\frac{z}{a}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}\right)^3} - (1 - 2\nu) \left(\frac{\frac{z}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} - 1 \right) \right] \quad (23)$$

Deformación unitaria radial

$$\varepsilon_r = \frac{(1 + \nu)\sigma_o}{2E} \left[\frac{-\frac{z}{a}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}\right)^3} - (1 - 2\nu) \left(\frac{\frac{z}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} - 1 \right) \right] \quad (24)$$

Deformación unitaria tangencial

$$\varepsilon_t = \frac{(1 + \nu)\sigma_o}{2E} \left[\frac{-\frac{z}{a}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}\right)^3} - (1 - 2\nu) \left(\frac{\frac{z}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2}} - 1 \right) \right] \quad (25)$$

Deflexión o compresión superficial

$$w_o = \frac{(1 + \nu)a \sigma_o}{E} \left[\frac{a}{\sqrt{a^2 + z^2}} + \frac{(1 - 2\nu)}{a} (\sqrt{a^2 + z^2} - z) \right] \quad (26)$$

Palmer y Barber

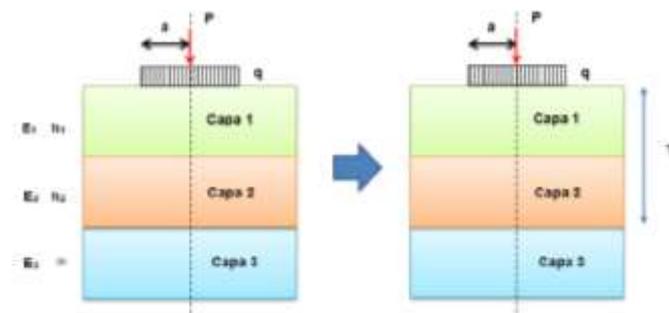


Figura 20. Método de módulo elástico equivalente por Palmer y Barber (1940)

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

Para el caso de cargas puntuales en multicapa Palmer y Barber define la obtencion de la deflexion en la superficie de la estructura con la siguiente formula:

$$\Delta_0 = \frac{2qa(1-\mu^2)}{E_n} \left[\frac{1 - \left(\frac{E_n}{\hat{E}}\right)}{\left[1 + \left(\frac{h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1}}{a}\right)^2 \left(\frac{\hat{E}}{E_n}\right)^{2/3}\right]^{1/2}} + \frac{E_n}{\hat{E}} \right] \quad (27)$$

Donde:

\hat{E} = Módulo equivalente del modelo estructural (N/m²)

E_i = Módulo de elasticidad de la capa i (N/m²)

n = Número de capas de la estructura de pavimento

h_i = Espesor de la capa i (cm)

a = Radio del plato de carga (cm)

El módulo equivalente \hat{E} se determina por la siguiente expresión:

$$\hat{E} = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad (28)$$

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1 Tipo de Investigación

La investigación fue de tipo experimental - descriptiva, debido a que existe semejanza con los experimentos realizados (experimentos cuantitativos), estos son utilizados para la recolección de datos de tal manera que tienen por finalidad la comprobación de la hipótesis, todo ello a través de un análisis estadístico y a su vez un análisis cuantitativo. Busca generalizar los resultados con la muestra y plantear un problema, revisar y desarrollar un marco teórico, elaborar una o varias hipótesis y finalmente definir variables.

3.2 Diseño de Investigación

La presente investigación fue de carácter experimental, pues la variable no ha sido modificada, así mismo en la presente investigación se ensaya, estudia, y expresa los resultados, estos son desarrollados después de la aplicación de la parte teórica, que permite corroborar las hipótesis, sus discusiones que nos ayudaran a realizar nuestra corroboración de hipótesis y sus discusiones.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se usó la técnica de muestreo, posteriormente la recopilación de datos para su procesamiento y finalmente la interpretación de los resultados.

- Método: Deductivo

Para tener resultados particulares es necesario tomar conclusiones generales.

- Tipo: Aplicado

Se trata de conocer, actuar y modificar la realidad de una problemática.

- Diseño: Experimental

Es la metodología de cómo será nuestra observación o experimento, así mismo definir las variables que serán observadas, la forma de medición de las variables, conexión y relación entre elementos y el procedimiento de análisis de datos obtenidos.

3.3 Población y muestra

Para la presente investigación se consideró como población y muestra lo siguiente:

- Población: 3 km de carretera Binacional Sector Huaytire - Moquegua.
- Muestra: 500 m. del tramo.

La población se obtiene del tamo crítico de la carretera Binacional Sector Huaytire – Moquegua en el cual analizaremos a través de ensayos la deformación del pavimento, así mismo se determinará como muestra 100 metros de cada kilómetro, como criterio para los datos estadísticos "ANOVA".

3.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

En el caso del presente trabajo de investigación, se utilizó la recolección de datos mediante ensayos estándares de laboratorio de la sub rasante, y ensayos en campo de la subrasante y del pavimento con uso de geocelda.

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

Para la recolección de todos los datos se inició el viaje al punto de evaluación, posteriormente se hizo la inspección visual para finalmente tomar la muestra y se realicen los ensayos en laboratorio.

Así mismo se hizo la toma datos a través de los ensayos in situ, ya que en el punto de extracción ya se aplicó la geocelda tridimensional en la estructura del pavimento.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Los medios materiales empleados para almacenar y recoger los datos, son determinados instrumentos. Tenemos por ejemplo la escala de actitudes, pruebas de conocimiento o formularios”.

Así mismo se consideró en el presente trabajo de investigación el consolidado de los datos mediante formatos de los ensayos de laboratorio, los cuales son: ensayo de límites de consistencia, ensayo de proctor modificado, ensayos de granulometría, ensayo de CBR, ensayo de CBR in situ con y sin geocelda

tridimensional, ensayo de viga Benkelman, ensayo de placa de carga con y sin geoceldas, costos comparativos con y sin geoceldas.

3.5 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El desarrollo del proyecto de investigación se realizó directamente in situ, obteniendo muestras de suelo en las calicatas N° 1 y N° 2, también se obtuvo la deformación del pavimento después de la aplicación de geocelda tridimensional, posteriormente se realizó el procesamiento de datos considerando los lineamientos del manual de ensayo de materiales del año 2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, donde se describió los resultados obtenidos después de la aplicación de la geocelda tridimensional.

Para el análisis de datos se obtuvo los propuestos en el Manual de carreteras brindado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, además, el fundamento para estas pruebas es la normativa AASTHO y ASTM.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados por variables

4.1.1 Variable Independiente

Se realizó un ensayo de deflexión en el pavimento con **geocelda tridimensional** utilizando la herramienta de viga Benkelman y en la subrasante tomando como modelo matemático de Boussinesq que es ideal para hallar **deformaciones a diferentes profundidades**.



Figura 21. Preparación de Ensayo de Viga Benkelman

Fuente: Elaboración en campo - propia.



Figura 228. Ejecución de Ensayo de Viga Benkelman

Fuente: Elaboración en campo - propia.

4.1.2 Variable Dependiente

Se realizó la exploración de 02 calicatas a cielo abierto a una profundidad de 1.00 m. de profundidad, para obtener las muestras y posteriormente realizar los ensayos de mecánica de suelos para hallar las **características del suelo de fundación (resistencia del suelo y pavimento).**



Figura 23. Ensayo de mecánica de suelos en laboratorio

Fuente: Elaboración en laboratorio - Propia.

Descripción de la intervención del estudio

La comunidad de Huaytire está situado en la región de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, distrito de Carumas. Se encuentra en las coordenadas UTM: E= 353526.81 y N= 8132645.07 de 4250.00 msnm.



Figura 24. Paisaje de la carretera Huaytire - Moquegua

Fuente: Elaboración en Campo - propia.

Recopilación de información

- Recopilación de información para analizar las características de suelo de fundación.

Se obtuvo la información mediante la toma de muestras de suelos de la Carretera Binacional Km 1000+250 a Km 1000+255, Sector Huaytire - Moquegua, situado en la región de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, distrito de Carumas.

Estas muestras se obtuvieron de ambas calicatas para que puedan ser procesadas posteriormente en laboratorio.

- Recaudar datos e información para determinar la reducción de la deformación con la aplicación de geocelda tridimensional.

Para poder obtener los datos de reducción de deformación en pavimento con y sin la aplicación de geocelda tridimensional, se realizó ensayo con viga Benkelman a una profundidad de 150 mm.

- Recopilación de información para la comparación de costos con la aplicación de geocelda tridimensional.

Para la evaluación de costos de la construcción de pavimentos con la aplicación con y sin geoceldas, se realizó el diseño de pavimentos cada uno con sus cálculos y presupuesto.

Exploración a cielo abierto

Se realizó dos (02) calicatas, descripción visual - manual y muestreo alterado.

Ensayos de laboratorio

Análisis Granulométrico

Se realizaron 02 ensayos de análisis granulométrico por tamizado. Como corresponde se tomó la fracción correspondiente de la pasante 38 de la malla N°04 para finos, finalmente toda la fracción con la retenida de la malla N° 200 se procedió a pesar y lavar.



Figura 25. Ensayo de Análisis Granulométrico

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

Límites de Consistencia

Con el material de la pasante de la malla N° 40, se realizó los ensayos de límites de consistencia.



Figura 26. Ensayo de Límite Líquido

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.



Figura 27. Ensayo de Límite Plástico

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

Clasificación del suelo

Obtenido los datos del ensayo granulométrico y los ensayos de límites de consistencia se obtuvo la clasificación en SUCS y AASTHO de ambas muestras.

Contenido de Humedad Natural

Para cada muestra se realizó los ensayos de contenido de humedad natural (finos y gruesos) en su condición natural (in situ), para esto se utilizó un horno para obtener un secado adecuado.



Figura 28. Ensayo Contenido de Humedad

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

Peso Unitario Suelto

Se determinó el peso unitario suelto colocando el material seco en el recipiente de forma suave, hasta el punto de derrame y luego se nivela a ras, después de obtenidos los resultados se usarán correctamente para la conversión de peso a volumen.



Figura 29. Ensayo Peso Unitario Suelto

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

Peso Unitario Compactado

Se determinó el peso unitario compactado colocando de la misma forma que el peso unitario suelto, solo que esta vez se realiza la colocación del material en tres partes igual y se realiza el varillado en cada capa colocada.



Figura 30. Ensayo Peso Unitario Compactado

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

Relación Densidad/Humedad (PROCTOR)

Para el ensayo Proctor se utilizó los datos de la humedad óptima y para el tipo de ensayo Proctor se procedió a revisar los pasantes del análisis granulométrico, es así que se obtuvo los golpes y capas adecuadas para poder realizar el ensayo adecuadamente. Se procedió a realizar el ensayo adicionando de manera progresiva cada 2 % de agua hasta obtener la compactación humedad adecuada.



Figura 31. Ensayo de Proctor

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

California Bearing Ratio (CBR)

Ya obtenido la densidad máxima seca y humedad óptima mediante ensayo de proctor, se prosigue con el ensayo de CBR para tres puntos compacto con diferentes golpes de 5 capas cada uno.



Figura 32. Ensayo de CBR

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

Ensayo Viga Benkelman

Para la lectura de las deflexiones verticales en el pavimento con geocelda y en la subrasante se procedió a realizar el ensayo tal cual se describe en el Manual de Transportes y Comunicaciones, para posteriormente realizar el análisis de datos en gabinete. Se procedió a realizar también la corrección de las deflexiones por temperatura.



Figura 33. Ensayo de Viga Benkelman

Fuente: Elaboración Laboratorio Geo y Pav.

Análisis de la investigación

- **Obtención de Resultados de los Ensayos de Laboratorio – Mecánica de Suelos**

Para el análisis en laboratorio se procedió a analizar las muestras de cada calicata y realizar los ensayos descritos. Es así se obtuvo los siguientes resultados por cada calicata:

Tabla 1

Obtención de Resultados de Laboratorio

Ensayos	Calicata - 1	Calicata - 2
CBR	15%	17%
Límite Líquido	31.74	33.00
Límite Plástico	29.64	30.50
Índice de Plasticidad	2.1	2.5
% de Finos	12.5	10.9
Proctor	1.83	1.825
% Humedad Optima	8.9	8.5

Fuente: Elaboración Propia.

En el resultado de la clasificación de Suelos por S.U.C.S. se obtuvo un Suelo con Arena mal graduada **con contenido de limo** con grava y con bloques, SP y SM, tal cual se observa en la figura 40.

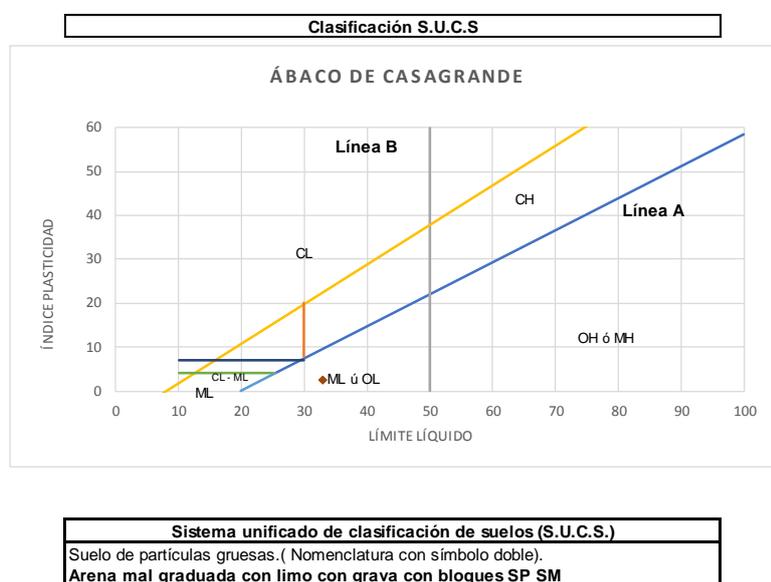


Figura 34. Clasificación SUCS

Fuente: Elaboración Propia.

En la clasificación AASHTO se obtuvo un suelo **de excelente a bueno**, la clasificación resultante es de tipo A-1-b, tal como se muestra en la figura 41.

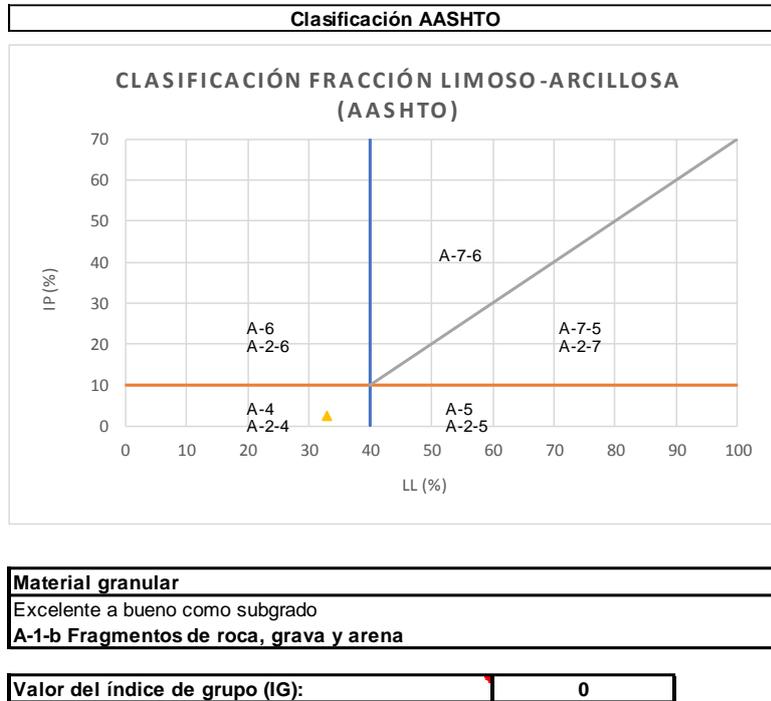


Figura 35. Clasificación AASHTO

Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto al resultado del ensayo de CBR, se obtuvieron porcentajes del 15% en la muestra 1 y de 17 % en la muestra 2. Al haber obtenido las muestras del terreno natural, la consideración tomada es que el CBR nos dio una calificación del suelo en función a la subrasante.

(Sánchez, 2012) nos dice que para la evaluación y diseño de pavimentos es muy útil el valor del CBR. Para evaluar el CBR de un suelo donde se va a fundar una estructura es decir en subrasante o superficie de colocación de estructuras, se debe realizar en laboratorio de forma que las condiciones del suelo sean similares a las de in situ y de esta forma tener el valor del CBR del

suelo que mejor represente esa situación según la ASTM D 698-70. Para el caso de bases y subbases, de un determinado suelo sea de corte o de préstamo, el principal objetivo es obtener la combinación óptima que brinde un adecuado grado de saturación, óptimo confinamiento el objetivo es encontrar la combinación de condiciones óptima de confinamiento, entre otros, para poder alcanzar una resistencia requerida.

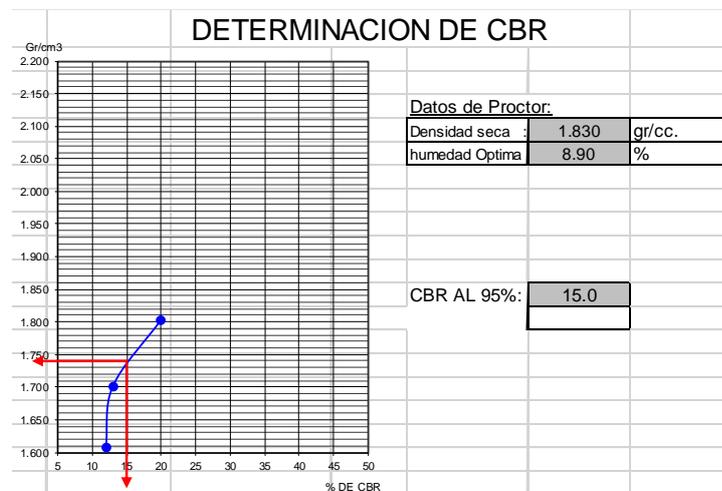


Figura 36. Ensayo CBR – Calicata 1

Fuente: Elaboración propia en excel.

Es por ello que según la tabla 2 (Manual de laboratorio de suelos para ingeniería civil. Bowles J.), calificamos al suelo en función de la subrasante, como un suelo regular, así también podemos observar que en dicha tabla se encuentra la clasificación obtenida mediante SUCS Y AASHTO.

Tabla 2*Calificación del suelo en función de la subrasante*

CBR	Calificación	Uso	SUCS	AASHTO
0 - 3	Muy Pobre	Subrasante	CH, MH	A5, A6, A7
3 - 7	Pobre - Regular	Subrasante	CH, MH	A4, A5, A6, A7
7 - 20	Regular	Subrasante	CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 - 50	Bueno	Base-Subbase	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
> 20	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Fuente: Manual de laboratorio de suelos para ingeniería civil. Bowles J. (1980)

Para la obtención de los módulos elásticos del suelo se tomó como referencia los suelos intermedios, puesto que se tiene un CBR entre 15% y 17%, los cuales son hallados más adelante.

- **Obtención de Resultados del Ensayo de Viga Benkelman - Deflexiones**

Luego de haber realizado el ensayo de viga Benkelman para ambos carriles del km 1000+250.00 al 1000+255.00, se procedió a procesar los datos obtenidos en campo, considerando la corrección por temperatura de las deflexiones.

Para el análisis y comparación se realizó el ensayo a nivel de superficie del pavimento con geocelda tridimensional y a nivel de subrasante a la misma altura del km 1000+250.00 al 1000+255.00.

A continuación, se muestran las tablas con las deflexiones obtenidas y corregidas por temperatura:

Tabla 3*Deflexión Vertical de Pavimento con Geocelda – Viga Benkelman*

Muestra N°	Progresiva		Deflexión (x 10-2 mm)		Temperatura °C	Corregido	Corregido	Radio Curvatura (m)
	Km.	Carril	D0 0.01 mm	D25 0.01 mm		D0 0.01 mm	D25 0.01 mm	Rc
1	1000+250	Der.	32	16	19.7	32	16	195
2	1000+250	Izq.	32	18	19.7	32	18	223
3	1000+255	Der.	28	17	19.7	28	17	284
4	1000+255	Izq.	33	23	19.7	33	23	313

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Tabla 4*Deflexión Vertical de Subrasante – Viga Benkelman*

Muestra N°	Progresiva		Deflexión (x 10-2 mm)		Temperatura °C	Corregido	Corregido	Radio Curvatura (m)
	Km.	Carril	D0 0.01 mm	D25 0.01 mm		D0 0.01 mm	D25 0.01 mm	Rc
1	1000+250	Der.	102	72	19.7	102	72	104
2	1000+250	Izq.	98	65	19.7	98	65	95
3	1000+255	Der.	95	70	19.7	95	70	125
4	1000+255	Izq.	103	78	19.7	103	78	125

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Obtención de Deflexiones – Método Numérico para Pavimento con Geocelda**

Para el análisis y comparación, se procedió a hallar las deflexiones de forma numérica; se ha considerado utilizar la metodología de Palmer y Barber, debido a que el pavimento ya se encuentra construido y este cuenta con la colocación de la geocelda tridimensional. También se han considerado los

espesores, módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson del Expediente definitivo en fase de ejecución.

Se realizó el cálculo de la presión de inflado de neumáticos a través del programa Shell, para así obtener la carga actuante al pavimento calculado.

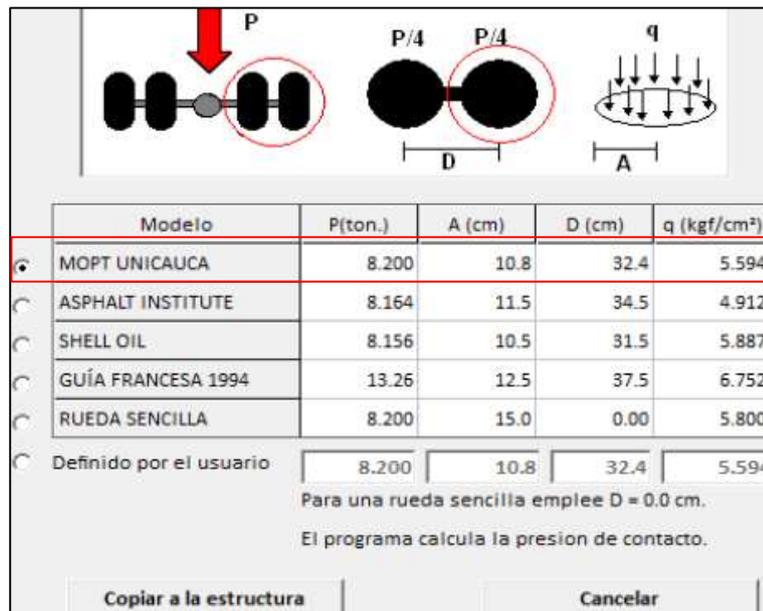


Figura 37. Clasificación Cualitativa

Fuente: caminero 2021

Eje trasero o equivalente:

$$8.2Tn * \left(\frac{1000kg}{1Tn} \right) = 8200kg.$$

Cálculo de la carga aplicada (P):

$$\frac{P}{2} = \frac{8200kg}{2} = 4100kg.$$

Cálculo de la presión de contacto (q):

$$q = 5.59 \frac{kg}{cm^2}$$

Cálculo del área de contacto (A_c):

$$A_c = \frac{P}{q}$$

$$A_c = \frac{4100kg}{5.59 \frac{kg}{cm^2}} = 732.14cm^2$$

Cálculo del radio de plato de carga (a):

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi * q}}$$

$$a = \sqrt{\frac{732.14}{3.1415}} = 15.28cm$$

Cálculo de espesor, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para:

✓ Capa de Rodadura: (Obtenidos de Expediente Definitivo)

$$E = \frac{13919.13kg}{cm^2}$$

$$\mu = 0,35$$

$$Espesor = 5cm$$

✓ Geocelda Tridimensional: (Obtenidos de Expediente Definitivo)

$$E = \frac{12141.12kg}{cm^2}$$

$$\mu = 0,37$$

$$Espesor = 15cm$$

✓ Base Granular: (Obtenidos de Expediente Definitivo)

Tiene un CBR (95%) = 87%

Po la metodología de Powell, Potter, Mayhew y Nunn:

$$E = 17.6 * CBR^{0.64}$$

$$E = 17.6 * 87\%^{0.64} = 307 \text{ MPA}$$

$$E = \frac{3130.53 \text{ kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\mu = 0,40$$

$$\text{Espesor} = 20 \text{ cm}$$

✓ Subrasante: (Obtenidos de E.D. y Ensayos en Laboratorio)

Tiene un CBR (95%) = 14% Según Expediente Técnico.

Tiene un CBR (95%) = 15% (C-01) Según Ensayos en Laboratorio.

Tiene un CBR (95%) = 17% (C-02) Según Ensayos en Laboratorio.

Ahora obteniendo un promedio del Expediente Técnico y de los Ensayos en Laboratorio tenemos:

$$CBR(95\%) = \frac{\left(\frac{15 + 17}{2}\right) + 14}{2} = 15\%$$

Po la metodología de Powell, Potter, Mayhew y Nunn:

$$E = 17.6 * CBR^{0.64}$$

$$E = 17.6 * 15\%^{0.64} = 99.59 \text{ MPA}$$

$$E = \frac{1015.52kg}{cm^2}$$

$$\mu = 0,45$$

Cálculo de la deflexión en la superficie de la estructura:

Primero debemos hallar el módulo equivalente \hat{E} , el cual es determinado con la ecuación (28):

$$\hat{E} = \frac{13919.13kg}{cm^2} * \left(\frac{5cm * \sqrt[3]{\frac{13919.13kg}{cm^2}} + 15cm * \sqrt[3]{\frac{1214.12kg}{13919.13kg * cm^2}} + 20cm * \sqrt[3]{\frac{3130.53kg}{13919.13kg * cm^2}}}{5cm + 15cm + 20cm} \right)^3$$

$$\hat{E} = 6794.33 kg/cm^2$$

A continuación, debemos obtener un coeficiente de Poisson promedio:

$$\mu = \frac{0.35 + 0.37 + 0.40 + 0.45}{4}$$

$$\mu = 0.39$$

Finalmente, con los datos obtenidos procedemos a obtener la deflexión en la superficie con la ecuación (27):

$$\Delta_0 = \frac{2 * \frac{5.59kg}{cm^2} * (1 - 0.39^2)}{\frac{1015.52kg}{cm^2}} * \left[\frac{1 - \frac{1015.52kg}{6794.33kg * cm^2}}{\left[1 + \left(\frac{5cm + 15cm + 20cm}{15.28cm} \right)^2 * \left(\frac{6794.33kg}{1015.52kg * cm^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{1015.52kg}{6794.33kg * cm^2}} \right]$$

$$\Delta_0 = 0.0453 cm$$

- **Obtención de Deflexiones – Método Numérico para Subrasante**

Para el análisis y comparación, se procedió a hallar las deflexiones de forma numérica; se ha considerado utilizar la metodología de Boussinesq, debido a que se tiene los datos de la subrasante.

Con la ecuación (26):

$$w_0 = \frac{(1 + 0.45) * 15.28cm * 5.59kg/cm^2}{\frac{1015.52kg}{cm^2}} * \left[\frac{15.28cm}{\sqrt{(15.28cm)^2 + (0cm)^2}} + \frac{(1 - 2 * 0.45)}{15.28cm} * (\sqrt{(15.28cm)^2 + (0cm)^2} - 0cm) \right]$$

$$w_0 = 0.1342 \text{ cm}$$

- **Obtención de Esfuerzo Máximo Vertical y Deformación Unitaria Vertical – Método Numérico para Pavimento con Geocelda**

Para el análisis y comparación, se procedió a hallar los esfuerzos y deformaciones de forma numérica; se ha considerado utilizar la metodología de Boussinesq, considerando como una capa al pavimento con geocelda tridimensional.

Con la ecuación (20): Para Z = 100 cm

$$\sigma_z = \frac{5.59kg}{cm^2} * \left[1 - \left(\frac{100cm}{\sqrt{(15.28cm)^2 + (100cm)^2}} \right)^3 \right] * 100\%$$

$$\sigma_z = \frac{0.1902kg}{cm^2}$$

Con la ecuación (23): Para Z = 100 cm

$$\varepsilon_z = \frac{(1 + 0.37) * \frac{5.59kg}{cm^2}}{\frac{12141.12kg}{cm^2}} * \left[\frac{\frac{100cm}{15.28cm}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{100cm}{15.28cm}\right)^2}\right)^3} - (1 - 2 * 0.37) * \left(\frac{\frac{100cm}{15.28cm}}{\sqrt{1 + \left(\frac{100cm}{15.28cm}\right)^2}} - 1\right) \right]$$

* 100%

$$\varepsilon_z = 0.0016 \text{ cm}$$

Se obtuvo la tabla con diferentes profundidades la cual se muestra a continuación:

Tabla 5

Esfuerzo y Deformación - Pavimento con Geocelda

Z (cm)	σ_Z (kg/cm²)	ξ_Z (%)
0.00	5.59	0.0164
5.00	5.42	0.0290
10.00	4.67	0.0316
15.00	3.67	0.0274
20.00	2.79	0.0218
25.00	2.12	0.0170
30.00	1.63	0.0134
35.00	1.29	0.0106
40.00	1.03	0.0086
45.00	0.84	0.0070
50.00	0.70	0.0059
55.00	0.59	0.0050
60.00	0.50	0.0042
65.00	0.43	0.0037
70.00	0.38	0.0032
75.00	0.33	0.0028
80.00	0.29	0.0025
85.00	0.26	0.0022
90.00	0.23	0.0020
95.00	0.21	0.0018
100.00	0.19	0.0016

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Obtención de Esfuerzo Máximo Vertical y Deformación Unitaria Vertical – Método Numérico para Subrasante**

Para el análisis y comparación, se procedió a hallar los esfuerzos y deformaciones de forma numérica; se ha considerado utilizar la metodología de Boussineq, considerando como una capa a la subrasante.

Con la ecuación (20): Para $Z = 100$ cm

$$\sigma_z = \frac{5.59kg}{cm^2} * \left[1 - \left(\frac{100cm}{\sqrt{(15.28cm)^2 + (100cm)^2}} \right)^3 \right] * 100\%$$

$$\sigma_z = \frac{0.1902kg}{cm^2}$$

Con la ecuación (23): Para $Z = 100$ cm

$$\varepsilon_z = \frac{(1 + 0.45) * \frac{5.59kg}{cm^2}}{\frac{1015.52kg}{cm^2}} * \left[\frac{\frac{100cm}{15.28cm}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{100cm}{15.28cm} \right)^2} \right)^3} - (1 - 2 * 0.45) * \left(\frac{\frac{100cm}{15.28cm}}{\sqrt{1 + \left(\frac{100cm}{15.28cm} \right)^2}} - 1 \right) \right] * 100\%$$

$$\varepsilon_z = 0.0189 \text{ cm}$$

Se obtuvo la tabla con diferentes profundidades la cual se muestra a continuación:

Tabla 6

Esfuerzo y Deformación – Subrasante

Z (cm)	σ_z (kg/cm²)	ξ_z (%)
0.00	5.59	0.0798
5.00	5.42	0.2792
10.00	4.67	0.3421
15.00	3.67	0.3086
20.00	2.79	0.2501

25.00	2.12	0.1969
30.00	1.63	0.1552
35.00	1.29	0.1238
40.00	1.03	0.1002
45.00	0.84	0.0824
50.00	0.70	0.0687
55.00	0.59	0.0580
60.00	0.50	0.0496
65.00	0.43	0.0428
70.00	0.38	0.0373
75.00	0.33	0.0328
80.00	0.29	0.0290
85.00	0.26	0.0258
90.00	0.23	0.0232
95.00	0.21	0.0209
100.00	0.19	0.0189

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Obtención de Bulbo de Presiones – Método Numérico para Pavimento con Geocelda**

Posteriormente se realizó el modelamiento de las presiones en el pavimento con geocelda tridimensional, obteniendo las presiones a diferentes profundidades con la ecuación (14).

Tabla 7

Presiones – Pavimento con Geocelda

Profundidad (m)	Carga (KN)	Radio (m)	σ_z (KN/m²)
0.00	80.42	0.14	0.00
0.25	80.42	0.28	78.27
0.50	80.42	0.42	39.59
0.75	80.42	0.57	22.14
1.00	80.42	0.71	13.93
1.25	80.42	0.85	9.53
1.50	80.42	0.99	6.91
1.75	80.42	1.13	5.24
2.00	80.42	1.27	4.10
2.25	80.42	1.41	3.30
2.50	80.42	1.56	2.71

2.75	80.42	1.70	2.27
3.00	80.42	1.84	1.92

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Obtención de Bulbo de Presiones – Método Numérico para Subrasante**

Posteriormente se realizó el modelamiento de las presiones en subrasante, obteniendo las presiones a diferentes profundidades con la ecuación (14).

Tabla 8

Presiones – Subrasante

Profundidad (m)	Carga (KN)	Radio (m)	σ_z (KN/m²)
0.00	80.42	0.21	0.00
0.25	80.42	0.42	20.72
0.50	80.42	0.64	13.82
0.75	80.42	0.85	8.70
1.00	80.42	1.06	5.83
1.25	80.42	1.27	4.15
1.50	80.42	1.48	3.09
1.75	80.42	1.70	2.39
2.00	80.42	1.91	1.90
2.25	80.42	2.12	1.55
2.50	80.42	2.33	1.28
2.75	80.42	2.55	1.08
3.00	80.42	2.76	0.92

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Obtención de Costos de Pavimento sin uso de Geocelda y Pavimento con uso de Geocelda**

Obtenidos los resultados físicos y mecánicos que nos definen que el uso de la geocelda tridimensional es más eficiente en suelos inestables el cual también fue identificado, procedimos a realizar el análisis de costos para evaluar la

diferencia entre la construcción de un pavimento convencional y la construcción de un pavimento con geocelda tridimensional.

Para la obtención de los costos se realizó una planilla de metrados, y el cálculo del presupuesto total en el programa S10, de donde también se obtuvo el análisis de precios unitarios y la lista de insumos, obteniendo la siguiente tabla de presupuestos totales:

Tabla 9

Análisis de Costos de Pavimento sin y con Geocelda

TESIS:		"ANÁLISIS DE COSTO DE PAVIMENTOS SIN GEOCELDA - TIPO DIAMANTE EN LA CARRETERA BINACIONAL KM 1000+250 A KM 1000+255, SECTOR HUAYTIRE - MOQUEGUA"	
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	COSTO SIN GEOCELDA S/.	COSTO CON GEOCELDA S/.
01	PAVIMENTACIÓN		
01.01	OBRAS PROVISIONALES	51,875.43	51,875.43
01.02	OBRAS PRELIMINARES	3,147.16	3,147.16
01.03	MOVIMIENTO DE TIERRAS	493.76	346.55
01.04	PAVIMENTACIÓN ASFÁLTICA	7,225.60	7,323.20
01.05	SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL	83.21	83.21
TOTAL COSTO DIRECTO		62,825.16	62,775.55

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Análisis comparativo de los Resultados de los Ensayos de Laboratorio**
– **Mecánica de Suelos**

De acuerdo a los datos obtenidos en Laboratorio de las Calicatas 1 y 2, se pudo verificar que los resultados son similares y no hay diferencias considerables como para determinar un margen de error.

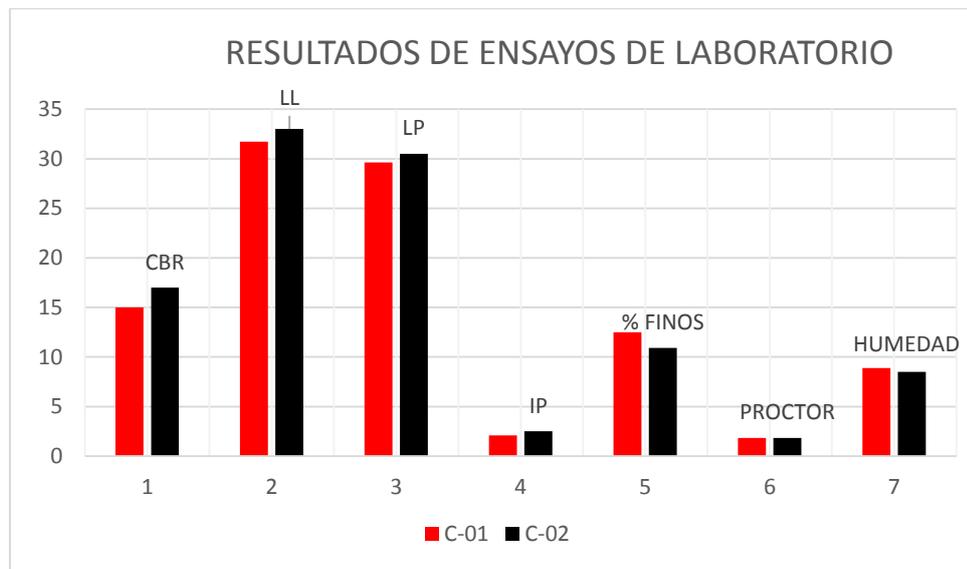


Figura 38. Histograma de resultados

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Análisis comparativo de Deflexiones Verticales**

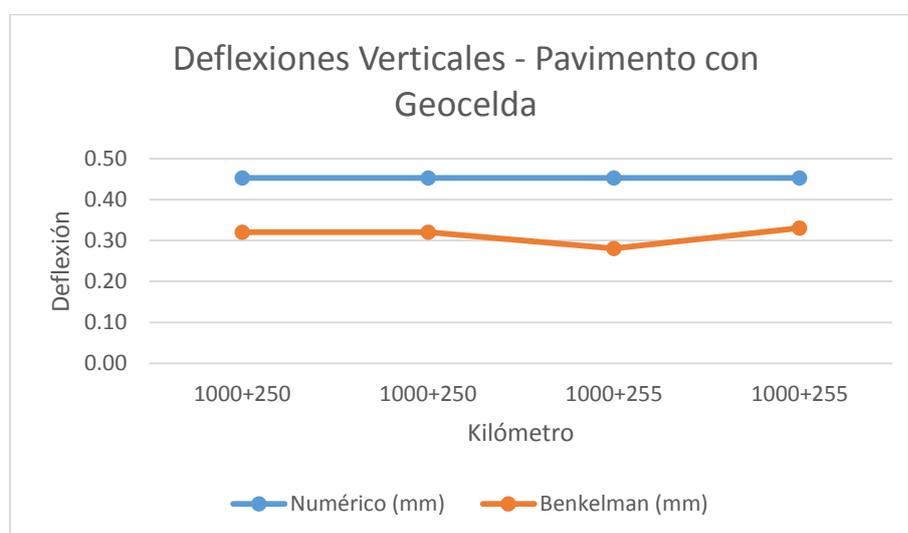
Realizado el ensayo de Viga Benkelman para la obtención de deflexiones y realizado el análisis numérico, se procedió a realizar el comparativo entre el ensayo y el modelamiento numérico, así como también verificar las diferencias de deflexiones entre el pavimento con geocelda y la subrasante.

Es por ello que se realizó las tablas y gráficos comparativos de deflexiones verticales mostrados a continuación:

Tabla 10*Deflexiones Verticales – Pavimento con Geocelda*

Deflexiones Verticales			
Km	Carril	Benkelman (mm)	Numérico (mm)
1000+250	Der.	0.3205	0.4532
1000+250	Izq.	0.3205	0.4532
1000+255	Der.	0.2804	0.4532
1000+255	Izq.	0.3305	0.4532

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

*Figura 39. Comparativo Deflexiones – P. con Geocelda*

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Tabla 11*Deflexiones Verticales – Subrasante*

Deflexiones Verticales			
Km	Carril	Benkelman (mm)	Numérico (mm)
1000+250	Der.	1.0215	1.3416
1000+250	Izq.	0.9815	1.3416
1000+255	Der.	0.9514	1.3416
1000+255	Izq.	1.0315	1.3416

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

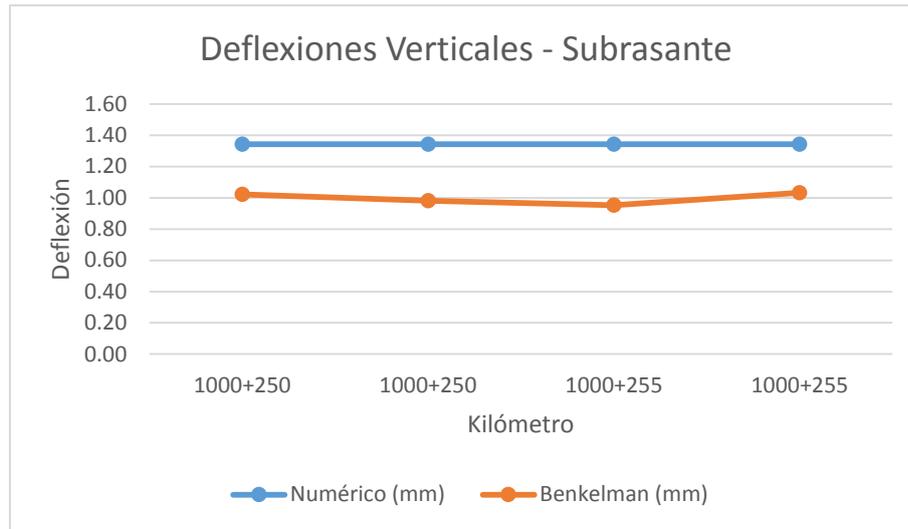


Figura 40. Comparativo Deflexiones – Subrasante

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Se puede resaltar en los resultados de la subrasante del ensayo de campo y del método analítico, que a mayores distancias las deflexiones disminuyen considerablemente y también que son mayores sin el uso de la geocelda.

- **Análisis comparativo de Esfuerzos Verticales y Deformaciones Verticales**

Se halló también los esfuerzos máximos verticales y la deformación unitaria vertical que se producen al aplicar la carga en el pavimento con uso de geocelda tridimensional y la subrasante, todo ello mediante la metodología numérica.

Es por ello que se realizaron los gráficos comparativos de los esfuerzos máximos verticales y las deformaciones unitarias verticales a diferentes profundidades, mostrados a continuación:

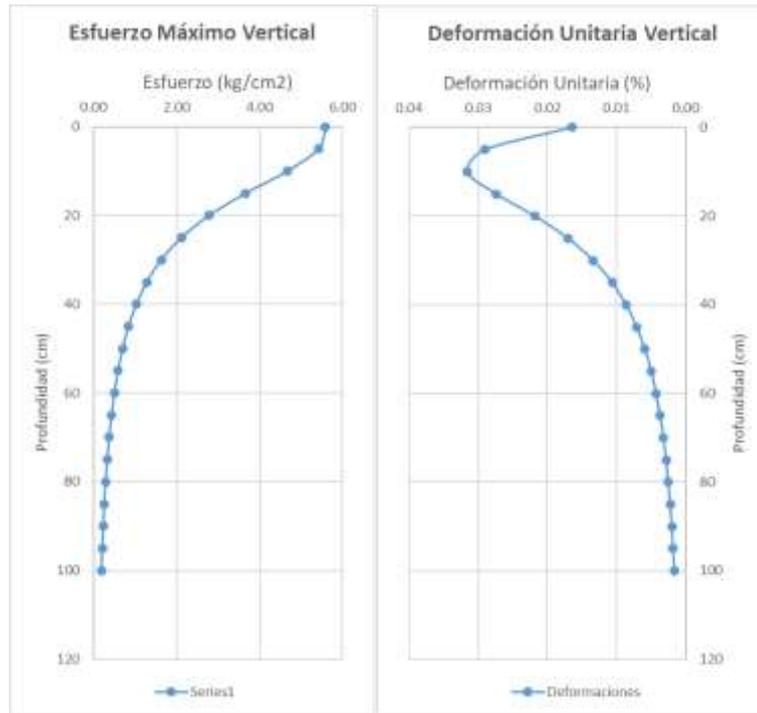


Figura 41. Esfuerzo y Deformación - Pavimento con Geocelda

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

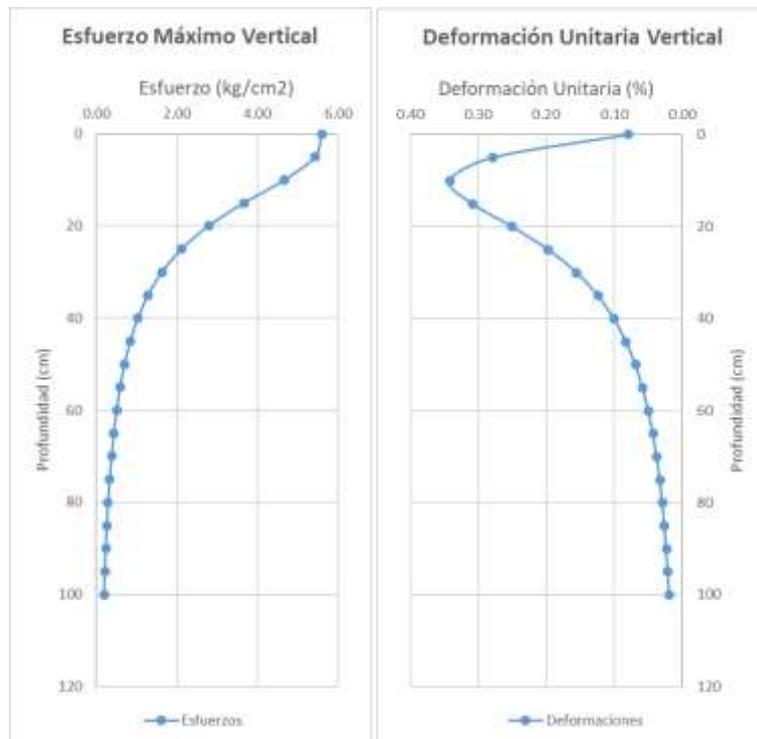


Figura 42. Esfuerzo y Deformación - Subrasante

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

- **Análisis comparativo de Bulbo de Presiones**

Se halló también las presiones que se producen al aplicar la carga en el pavimento con uso de geocelda tridimensional y la subrasante, todo ello mediante la metodología numérica, considerando para cada uno un radio respecto al comportamiento mecánico.

Es por ello que se realizó tabla y gráfico comparativos de las presiones a diferentes profundidades, mostrados a continuación:

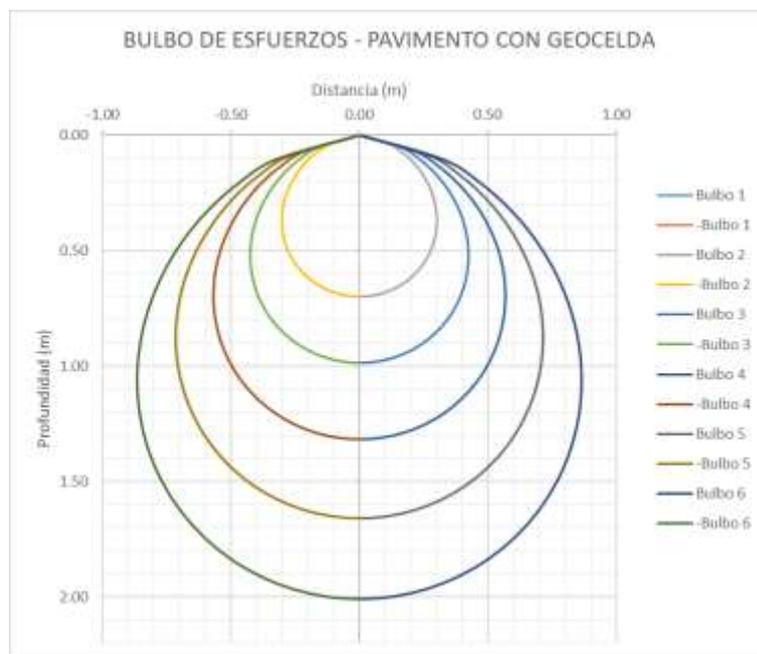


Figura 43. Bulbo de Presiones - Pavimento con Geocelda

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

En el bulbo de presiones hallado se aprecia como las presiones disminuyen hasta la altura de 2.00 m.

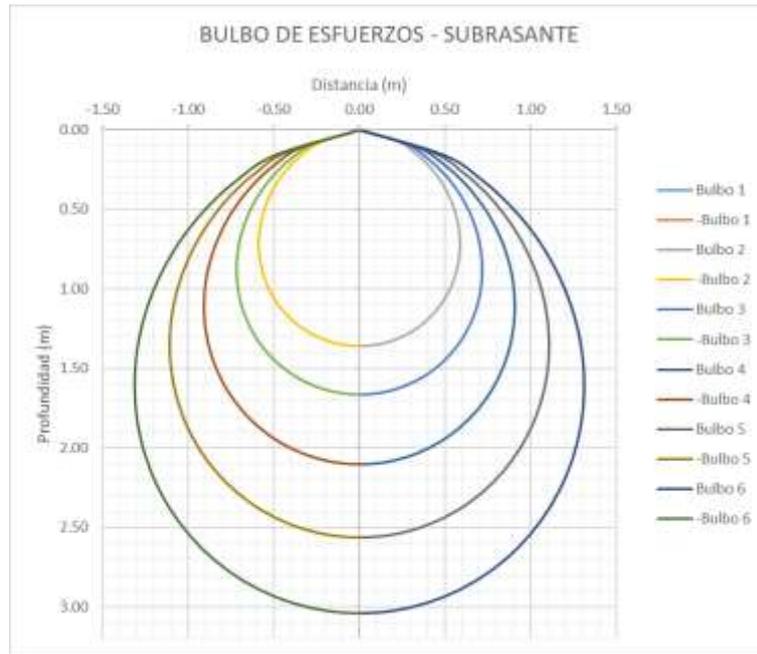


Figura 44. Bulbo de Presiones - Subrasante

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

En el bulbo de presiones hallado se aprecia como las presiones disminuyen hasta la altura de 3.00 m.

- **Análisis comparativo de Costos de Pavimento sin uso de Geocelda y Pavimento con uso de Geocelda**

Para el análisis de costos de ejecución se decidió considerar un pavimento Convencional y un Pavimento con Geocelda, en la figura 51 se muestra gráficamente las diferencias de los costos totales de inversión para la construcción de pavimento sin geocelda tridimensional y con geocelda tridimensional.

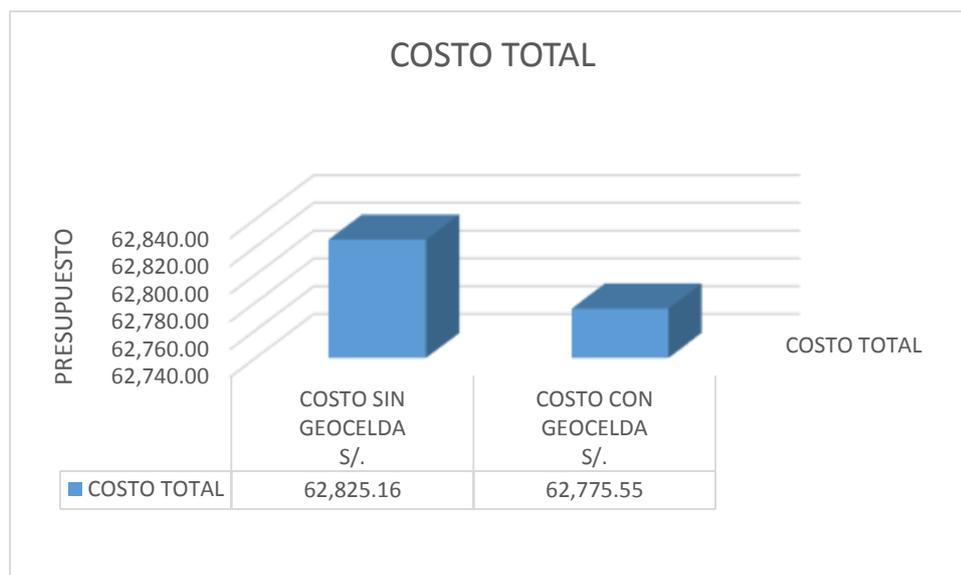


Figura 45. Diferencia de costos sin y con geocelda tridimensional

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Posteriormente hallamos el costo comparativo para la construcción del pavimento sin y con geocelda tridimensional por metro cuadrado, cabe resaltar que el área del proyecto es definida por los 5.00 metros de muestra por la suma del ancho de los carriles (3.50 m + 3.50 m + 1.00 m).

Tabla 12

Costo comparativo en m²

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	COSTO SIN GEOCELDA S/.	COSTO CON GEOCELDA S/.
1	PRESUPUESTO	62,825.16	62,775.55
2	ÁREA DEL PROYECTO (M2)	35.00	35.00
3	COSTO POR METRO CUADRADO	1,795.00	1,793.59

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

En la figura 52 se muestra gráficamente las diferencias de los costos totales de inversión para la construcción de pavimento sin geocelda tridimensional y con geocelda tridimensional.

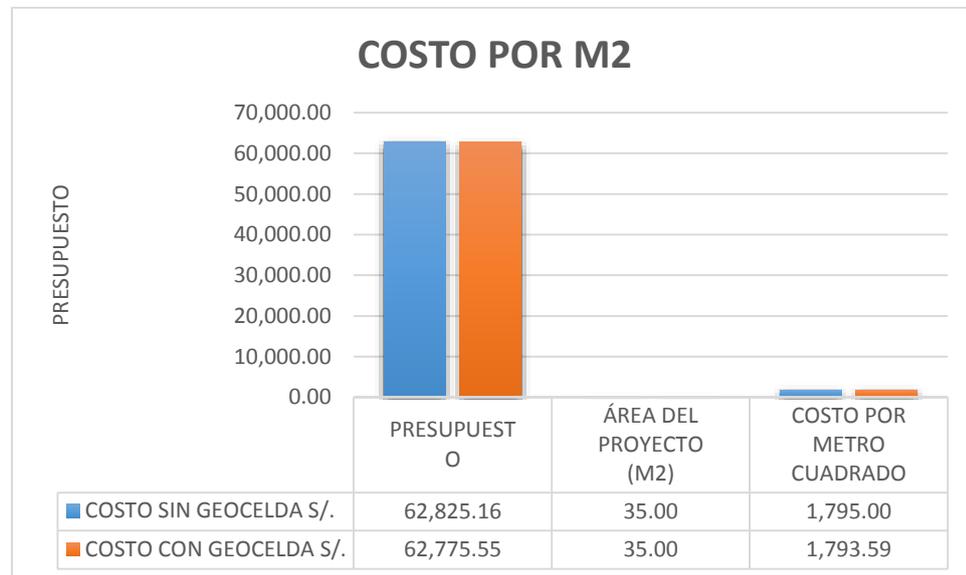


Figura 46. Comparación en m2 de la estructura de pavimento reforzado sin y con geocelda

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

4.2 Contrastación de hipótesis

4.2.1 Análisis Estadístico (Anova)

- **Análisis estadístico de los Resultados de los Ensayos de Laboratorio – Mecánica de Suelos**

Para la revisión de los datos estadísticos se realizó el análisis estadístico Anova de los resultados de los ensayos de laboratorio, que se encuentran en la tabla 1, realizando el procedimiento en una plantilla de Excel, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13*Análisis Estadístico Anova – Ensayos de Laboratorio*

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Calicata - 1	7	86.86	12.41	175.23
Calicata - 2	7	87.40	12.49	188.13

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.02	1.00	0.02	0.00011	0.99	4.75
Dentro de los grupos	2180.18	12.00	181.68			
Total	2180.20	13.00				

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Para verificar si se da por aceptada o no la hipótesis nula (H_0), es necesario verificar si el valor F se encuentra dentro o fuera del área de rechazo y verificar el valor crítico para F en comparación al valor F .

Verificación:

- $F_c > F$

Se Acepta: H_0 (Hipótesis Nula) *H_0 : Las características de los suelos son similares.*

- $F_c < F$

Se Acepta: H_1 (Hipótesis Alternativa) *H_1 : Las características de los suelos son diferentes.*

Reemplazando:

$$F_c = 4.75 > F = 0.00011$$

“Se ACEPTA la Hipótesis Nula”.

- **Análisis estadístico de las Deflexiones Verticales**

Para la revisión de los datos estadísticos se realizó el análisis estadístico Anova de los resultados del ensayo de Viga Benkelman y del método numérico, tanto para pavimento con geocelda como para subrasante, que se encuentran en las tablas 10 y 11, realizando el procedimiento en una plantilla de Excel, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 14

Análisis Estadístico Anova – Deflexiones Verticales Viga Benkelman

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Benkelman Geocelda	4	1.25	0.31	0.00		
Benkelman Subrasante	4	3.99	1.00	0.00		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.93	1.00	0.93	1002.63	0.00	5.99
Dentro de los grupos	0.01	6.00	0.00			
Total	0.94	7.00				

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Verificación:

- $F_c > F$

Se Acepta: H_0 (Hipótesis Nula)

H_0 : Las deflexiones verticales por viga Benkelman de Pavimento con Geocelda y Subrasante son similares.

- $F_c < F$

Se Acepta: H_1 (Hipótesis Alternativa)

H_1 : Las deflexiones verticales por viga Benkelman de Pavimento con Geocelda y Subrasante son diferentes.

Reemplazando:

$$F_c = 5.99 < F = 1002.63$$

“Se RECHAZA la Hipótesis Nula”.

Tabla 15

Análisis Estadístico Anova – Deflexiones Verticales Método Numérico

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Numérico Geocelda	4	1.81	0.45	0.00		
Numérico Subrasante	4	5.37	1.34	0.00		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.58	1.00	1.58	65535.00	0.00	5.99
Dentro de los grupos	0.00	6.00	0.00			
Total	1.58	7.00				

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Verificación:

- $F_c > F$

Se Acepta: H_0 (Hipótesis Nula)

H_0 : Las deflexiones verticales por método numérico de Pavimento con Geocelda y Subrasante son similares.

- $F_c < F$

Se Acepta: H_1 (Hipótesis Alternativa)

H_1 : Las deflexiones verticales por método numérico de Pavimento con Geocelda y Subrasante son diferentes.

Reemplazando:

$$F_c = 5.99 < F = 65535.00$$

“Se RECHAZA la Hipótesis Nula”.

- **Análisis estadístico de las Deformaciones Unitarias Verticales**

Para la revisión de los datos estadísticos se realizó el análisis estadístico Anova de los resultados del método numérico para hallar las deformaciones, tanto para pavimento con geocelda como para subrasante, que se encuentran en las tablas 5 y 6, realizando el procedimiento en una plantilla de Excel, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 16

Análisis Estadístico Anova – Deformaciones Unitarias Verticales

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Deformaciones Geocelda	21	0.22	0.01	0.00
Deformaciones Subrasante	21	2.33	0.11	0.01

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.11	1.00	0.11	19.56	0.00	4.08
Dentro de los grupos	0.22	40.00	0.01			
Total	0.32	41.00				

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Verificación:

- $F_c > F$

Se Acepta: H_0 (Hipótesis Nula)

H_0 : Las deformaciones unitarias verticales de Pavimento con Geocelda y Subrasante son similares.

- $F_c < F$

Se Acepta: H_1 (Hipótesis Alternativa)

H_1 : Las deformaciones unitarias verticales de Pavimento con Geocelda y Subrasante son diferentes.

Reemplazando:

$$F_c = 4.08 < F = 19.56$$

“Se RECHAZA la Hipótesis Nula”.

- **Análisis estadístico de los Costos de Pavimento sin uso de Geocelda y Pavimento con uso de Geocelda**

Para la revisión de los datos estadísticos se realizó el análisis estadístico Anova de los resultados de los costos de ejecución un pavimento sin geocelda y un pavimento con geocelda, que se encuentran en la tabla 12, realizando el procedimiento en una plantilla de Excel, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 17*Análisis Estadístico Anova – Costos de Ejecución*

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	64655.16	21551.72	1278397037.08
Columna 2	3	64604.14	21534.71	1276378116.42

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	433.84	1.00	433.84	0.00000034	1.00	7.71
Dentro de los grupos	5.11E+09	4.00	1.28E+09			
Total	5.11E+09	5.00				

Fuente: Análisis de Cálculo C.S.C.

Verificación:

- $F_c > F$

Se Acepta: H_0 (Hipótesis Nula) *H_0 : Los costos de ejecución de un pavimento sin geocelda y un pavimento con geocelda son similares.*

- $F_c < F$

Se Acepta: H_1 (Hipótesis Alternativa) *H_1 : Los costos de ejecución de un pavimento sin geocelda y un pavimento con geocelda son diferentes.*

Reemplazando:

$$F_c = 7.71 < F = 0.00000034$$

“Se ACEPTA la Hipótesis Nula”.

4.2.2 Se cumplió con la contrastación de hipótesis:

- ✓ Hipótesis Especifica N° 01; Se da por aceptada la hipótesis nula, puesto que con los ensayos de laboratorio se determinó las propiedades físicas del suelo y estas por ser del mismo tipo de suelo resultan ser similares.
- ✓ Hipótesis Especifica N° 02; Se da por rechazada la hipótesis nula, puesto que el pavimento con geocelda tiene una deflexión vertical inferior a la deflexión en la subrasante, lo cual permite definir claramente a la geocelda como un elemento de solución a los problemas de suelos inestables.

Así mismo se da por rechazada la hipótesis nula, puesto que el pavimento con geocelda tiene una deformación unitaria vertical inferior a la deformación unitaria vertical en la subrasante.
- ✓ Hipótesis Especifica N° 03; Se da por aceptada la hipótesis nula; puesto que la carpeta asfáltica con geocelda es de 0.078% menos que la carpeta asfáltica convencional, tal como detalla a continuación:

Costo de carpeta asfáltica convencional en caliente 1795.00 soles/m²

Costo de carpeta asfáltica con geocelda 1793.59 soles/m².

Pero considerando que el corte y/o relleno corresponde a solo 5 m² de área de influencia los costos son cercanos, pero si se considera el uso de la geocelda en proyectos de gran magnitud los costos tendrán una considerable variación lo cual permitiría rechazar la hipótesis nula.
- ✓ Hipótesis General; Se da por aceptada la hipótesis general; puesto que se comprobó que el uso de la Geocelda en pavimento es la solución a los problemas generados por un suelo inestable.

4.3 Discusión de Resultados

Primera discusión

La reducción de la estructura de pavimento con geoceldas genera mayor estabilidad al pavimento, brindando menor volumen de movimiento de tierras, menor volumen de compactación de material granular para base y la fácil instalación de material granular.

Segunda discusión

Los problemas que afectan a los pavimentos hechos sobre el suelo inestable son diferentes y muchos. Especialmente los que se ubican cerca de fuentes de agua, y debido a que la carretera Huaytire – Moquegua se encuentra cerca de un bofedal, se tiene un suelo inestable, esto se pudo verificar con los ensayos realizados en campo y en laboratorio.

Tercera discusión

La reducción de capas del de pavimento al aplicar la geocelda tridimensional, reduce el volumen de material a utilizar, dando así una reducción a la hora de realizar excavaciones, reducción de transporte de material con maquinaria, explotaciones de canteras y reducción de contaminación. En el presente desarrollo de proyecto de investigación al realizar el ensayo de asentamiento con y sin geocelda tridimensional se pudo estimar que la estructura de pavimento flexible transmite los esfuerzos gracias el efecto viga y reduce las deformaciones tanto unitarias como verticales y es así que tenemos también la distribución de las presiones.

Cuarta discusión

La geocelda tridimensional en la estructura de pavimento flexible disminuye el asentamiento cuando la carga aplicada en un área puntual se distribuye en un área mayor, por lo tanto, el volumen del material de relleno se reduce considerablemente, así mismo se tiene resultados calculados de inversión de ambos casos, el monto de inversión para la estructura de pavimento sin geocelda tridimensional asciende la suma de S/. 62,825.16 y con geocelda tridimensional es de S/. 62,775.55. También podemos verificar otro indicador, el cual es el costo unitario por metro cuadrado, dando como resultado de S/.1795.00 soles/m² sin geocelda y S/.1793.59 soles/m² con geocelda, reduciéndose el costo de inversión en 1.00%, considerando que solo hemos asumido 35 m² de área de proyecto.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se cumplió con todos los objetivos propuestos en la presente tesis.

✓ Objetivo General:

- Se cumplió con determinar que el uso de la geocelda tridimensional en la Carretera Binacional Km 1000+250 a Km 1000+255, Sector Huaytire – Moquegua, soluciona los problemas de inestabilidad del suelo, debido a que se obtiene menores deflexiones y deformaciones; y el costo de construcción del pavimento con geocelda es menor a comparación a la construcción de un pavimento convencional.

✓ Objetivo Específico N° 01:

- Se realizó todos los ensayos de laboratorio de las muestras obtenidas de las calicatas 1 y 2, para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo de fundación de la carretera Huaytire – Moquegua.
- Se obtuvo un CBR de 15% y 17% de cada calicata respectivamente, lo cual nos indica un suelo regular para la subrasante.

- Se determinó que el suelo de la carretera Huaytire – Moquegua es relativamente inestable, verificando el CBR y tomando la consideración que el suelo en etapas de precipitación se encontrará parcialmente saturado.
- ✓ Objetivo Específico N° 02:
- Se cumplió con determinar la deflexión del pavimento con el uso de la geocelda tridimensional cuyo valor promedio es de 0.3831 mm.
 - Se cumplió con determinar la deflexión de la subrasante cuyo valor promedio es de 1.1690 mm.
 - Se cumplió con determinar que la deformación del pavimento con el uso de la geocelda tridimensional es menor en comparación a la deformación de la subrasante de un suelo inestable.
- ✓ Objetivo Específico N° 03:
- Se cumplió con determinar el costo de la construcción de un pavimento sin el uso de la geocelda tridimensional cuyo valor es de S/. 62,825.16.
 - Se cumplió con determinar el costo de la construcción de un pavimento con el uso de la geocelda tridimensional cuyo valor es de S/. 62,775.55.
 - Se cumplió con determinar que el costo de la construcción de un pavimento con el uso de la geocelda tridimensional es menor en comparación a la deformación de un pavimento convencional.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda al Gobierno Regional de Moquegua y a los gobiernos locales, el uso de la geocelda tridimensional en la estructura del pavimento flexible, el cual deberá ser rellenado con material propio combinado al 50% con material granular para la base, el cual incrementará el porcentaje del CBR, por lo que los proyectos de inversión pública y privada deben considerar en su cartera de proyectos este sistema de refuerzo.

Se recomienda el uso de geocelda tridimensional, especialmente en suelos inestables y/o baja capacidad de resistencia; es decir en suelos del sector andino especialmente, debido a que el uso de la geocelda está directamente relacionado a la disminución de deformación.

Se recomienda que, para los cálculos finales de deformación, como es el caso del modelo matemático de Boussinesq, se debe utilizar metodologías no lineales.

Se recomienda el uso de la geocelda tridimensional, debido a que es una de las pocas alternativas que garantiza hasta 50 años de vida útil en la conservación de la vía, el cual reduce el costo de construcción, el mantenimiento de la carpeta y el tiempo de ejecución de la obra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Córdova, G. (2016) En su tesis. Protección de un muro de contención mediante un sistema de drenaje con geocompuestos en el hospital el Carmen de Huancayo – 2016. Universidad Peruana los Andes. Disponible en: [<http://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/UPLA/255/GABY%20ROCIO%20CORDOVA%20PEREZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>].

Dal, A. Utilización de geosintéticos en defensa de márgenes – Casos de obras. Disponible en: [www.urbabil.es/].

Determinación de la resistencia a la flexión del Concreto. URL [<http://www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2008/pdf/DICIEMBRE.pdf>] Duravía – Carolina García, (2012). ¿Resistencia a la flexión del concreto? <http://www.duravia.com.pe/blog/wp-content/uploads/ResistenciaConcreto-ACI-ICA-version-web.pdf>

ICG PERÚ, (2009). Norma Técnica CE. 010 Pavimentos Urbanos. URL http://www.construccion.org.pe/normas/rne2009/rne2006/files/titulo2/05_C E/Pavimentos Urbanos.pdf

Mattos, Jesús (2019) En su tesis. Mejora de la Subrasante de Suelo Arcilloso aplicando el Sistema de Confinamiento Celular para reducir las capas del Pavimento. Universidad Ricardo Palma. Disponible en: [file:///C:/Users/USER/Downloads/T030_47027525_T.pdf].

Duarte Duarte, María (2019) En su tesis. 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. Pontificia Universidad Javeriana. Disponible en: [https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7505/tesis601.pdf;jsessionid=7D26A3083B07350ED9C0DE1E8649484D?sequence=1].