

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DISEÑO CON GEOSINTÉTICOS PARA LA FUNCIÓN DE SEPARACIÓN,
FILTRACIÓN Y REFUERZO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

Gino Gabriel Sicha Flores

ASESOR: Augusto Martín Alza Vilela

Lima, marzo del 2018



A mi familia que me ha apoyado y aconsejado durante todos estos años.

A mi asesor, por su apoyo académico.

RESUMEN

El presente trabajo consistió en el diseño, análisis técnico y económico del uso de geosintéticos para tres funciones en particular en pavimentos flexibles. Primero, se evaluó la aplicación de un geotextil no tejido punzonado de separación entre el material granular y el suelo de fundación. Luego, se analizó la aplicación de un geotextil no tejido punzonado como envoltura de subdrenes longitudinales cumpliendo la función de filtración. Por último, se evaluó la aplicación de una geomalla triaxial de refuerzo para la optimización del pavimento en estudio.

Para la función de separación, el diseño realizado se basó en la norma AASHTO M288-96 y en libro “Designing with Geosynthetics” del Dr. Koerner. Mediante este procedimiento se determinó que el geotextil a especificar para el presente caso de estudio sería el geotextil comercial GT320P. El análisis técnico por su parte, se centró en la comparación del número de ejes equivalentes calculados para dos diseños. Por un lado, un pavimento que mantenga los espesores efectivos de capa, gracias al uso de un geotextil separador y otro con menor espesor efectivo de material granular debido a la mezcla parcial de este con el suelo de la subrasante. Mediante este análisis, se pudo concluir que una contaminación de subbase de sólo 0.5 pulgadas conllevaría a una reducción de más de 10% de serviciabilidad del pavimento en todos los tramos. En cuanto al análisis económico, se comparó el costo de los materiales de dos soluciones para el problema técnico presentado. Una opción consistió en un pavimento que emplee un espesor de material granular adicional llamado “espesor de sacrificio” que asegure la serviciabilidad del pavimento a largo plazo. La otra opción consistió en emplear el diseño convencional inicial, pero añadiendo el geotextil especificado. De este análisis, se determinó que para un espesor de sacrificio mayor a 1 pulgada el uso de un geotextil resultaría más rentable en lugar de emplear un espesor de sacrificio.

En cuanto a la función de filtración, el diseño realizado se basó en la norma AASHTO M288-96, en la guía de la FHWA, en el manual de hidrología del MTC y en el libro “Designing with Geosynthetics” del Dr. Koerner. De esta forma, se determinó que el geotextil a especificar para esta función sería el geotextil comercial GT240. El análisis técnico consistió en comparar el tráfico soportado por un pavimento sin sistema de subdrenaje longitudinal respecto a uno que si lo incluyera en el diseño. Para esto, se redujo el coeficiente de drenaje del pavimento inicial para simular su comportamiento

sin subdrenes. Se observó que una reducción de 0.1 del coeficiente de permeabilidad disminuiría cerca de un 30% la serviciabilidad del pavimento. Lo cual justificaría el uso de geotextil para esta función. El análisis económico se enfocó en comparar estos diseños respecto a un tiempo de vida estimado. Se concluyó que aquellos pavimentos sin subdrenaje con un tiempo de vida real menor a 6 años serían menos rentables que emplear sistemas de subdrenaje con geotextil.

Finalmente, para la función de refuerzo, el diseño preliminar se basó en la norma AASHTO R-50 y se empleó el programa de la empresa TENSAR para efectuar el diseño definitivo correspondiente a la geomalla TX160 para optimización del pavimento. El análisis técnico consistió en comparar de forma porcentual la variación de serviciabilidad entre el diseño con geomalla y el diseño convencional. En este caso, el uso de geomalla aumentó en más de 20% la serviciabilidad del pavimento del sector 3 al 6 aun así tratándose de una optimización de pavimento. Para el sector 1 y 2 se logró superar la serviciabilidad del diseño convencional, pero no significativamente. Luego, mediante el análisis económico se comparó el costo de los materiales de ambos diseños. De esta forma, se determinó que el diseño con geomalla generó un ahorro de más de 10 % respecto al diseño inicial.

Para los temas tratados, se desarrolló un programa en Visual Studio en el lenguaje de programación Visual Basic el cual facilitó el diseño y análisis. Además, se realizaron especificaciones técnicas y planos para las tres aplicaciones del material geosintético los cuales forman parte de la información a entregar al momento de realizar un proyecto.

SUMMARY

The following research examines the use of geosynthetics in flexible pavements on three functions. The methods used to examine these include an overview of the design analysis, technical analysis and economic analysis of the use of geosynthetics. The approach used for this research required an evaluation of the following: first, the application of a non-woven needle-punched geotextile between the granular material and the foundation soil; second, the application of a non-woven needle-punched geotextile as a wrap of longitudinal sub-rows fulfilling the function of filtration. Third, the application of a triaxial reinforcement geogrid for the optimization of the pavement.

For the separation function, the design was based on the AASHTO M288-96 standard and on the book "Designing with Geosynthetics" by Dr. Koerner. Through this procedure it was determined that the geotextile to be specified for the present case study would be the commercial geotextile GT320P. The technical analysis focused on the comparison of the number of equivalent axes that can support two pavements in particular. On one hand, a design that maintains effective layer thicknesses, thanks to the use of a separating geotextile. On the other hand, a pavement with less effective thickness of granular material due to the contamination of this with the soil of the subgrade. Through this analysis, it was observed that a subbase contamination of only 0.5 inches, would lead to a reduction of more than 10% of pavement serviceability in all sections. In regard to the economic analysis, the cost of the materials of two solutions was compared for the technical problem presented. One of these options consisted of a pavement that uses sacrificial thicknesses that assure the pavement's long-term serviceability. The other option consisted of evaluating the initial conventional design by adding the specified geotextile. Through this analysis it was determined that for a sacrificial thickness greater than 1 inch, the use of a geotextile would be more profitable instead.

Regarding the filtration function, the design was based on the AASHTO M288-96 standard, the FHWA guide, the MTC hydrology manual and the book "Designing

with Geosynthetics" by Dr. Koerner. In this way, it was determined that the geotextile specified for this function would be the commercial geotextile GT240.

The technical analysis consisted in comparing the traffic supported by a pavement without longitudinal subdrain system to one that includes it in the design. For this, the initial pavement drainage coefficient was reduced to simulate the behavior of this without sub-drains. From this analysis it was observed that a reduction of 0.1 of the permeability coefficient would reduce the pavement's serviceability by about 30%. Which would justify the use of geotextile for this function. The economic analysis focused on comparing these designs with respect to an estimated life time. It was observed that those pavements without subdrainage with a real life time lower than 6 years would be less profitable than using systems of geotextile sub-drainage.

Finally, for the reinforcement function, the preliminary design was based on the AASHTO R-50 standard and the program of the company TENSAR was used to carry out the final design corresponding to the TX160 geogrid for pavement optimization.

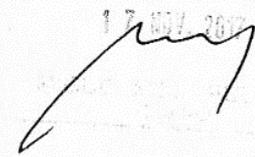
The technical analysis consisted in comparing in a percentage way the variation of serviceability between the design with geogrid and the conventional design. In this case, the use of geogrid increased by more than 20% the pavement's serviceability from sector 3 to sector 6, even in the case of pavement optimization. For sector 1 and 2, the serviceability of conventional design was overcome, but not significantly.

Then, through the economic analysis, the cost of the materials of both designs was compared. In this way, it was determined that the design with geogrid generated a saving of more than 10% compared to the initial design.

For the topics discussed, a program was developed in Visual Studio in the programming language Visual Basic which facilitated the design and analysis. In addition, technical specifications and plans were made for the three applications of the geosynthetic material which are part of the information to be delivered at the time of carrying out a project.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Diseño con geosintéticos para la función de separación, filtración y refuerzo en pavimentos flexibles.
Área : Geotecnia
Asesor : Augusto Martín Alza Vilela
Alumno : GINO GABRIEL SICHA FLORES
Código : 2010.1795.412
Tema N° : # 62
Fecha : Lima, 24 de octubre de 2017



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El uso de geosintéticos ha venido revolucionando la construcción de obras civiles en el mundo debido a sus características. Sus principales ventajas como por ejemplo su facilidad de instalación, la mejora en su calidad de manufactura, etc, han dado la posibilidad de reemplazar materiales convencionales. Sin embargo, en el Perú, su aplicación como solución viable a problemas ingenieriles, como en el diseño de carreteras, suele ser limitado.

Para fomentar su uso es importante dar una idea global del diseño de carreteras con geosintéticos y de sus impactos. Desde el punto de vista técnico, una evaluación de la condición de la carretera, así como la estimación del tiempo de vida y de mantenimiento pueden ser de gran ayuda. Otra forma de fomentar su uso es mostrando su rentabilidad. Por ejemplo, en el caso de la aplicación de geomallas de refuerzo, basta con calcular el costo de la piedra ahorrada en la base respecto al costo del geosintético para obtener el monto ahorrado (Koerner, 2013). Vale recalcar que es importante considerar correctamente las condiciones de campo ya que estas pueden ser adversas. Además, debe realizarse una correcta colocación del material y entender sus limitaciones para obtener buenos resultados (Koerner y Koerner, 2015).

El presente trabajo busca dar una idea global acerca del diseño con geosintéticos en carreteras para las funciones de separación, filtración y refuerzo. Se presentará un caso de estudio de pavimento flexible para el cual se diseñará con geosintéticos para tres aplicaciones. La primera consistirá en el diseño con geotextiles para la función de separación entre la capa granular correspondiente y la subrasante. Luego se realizará el diseño con geotextil para la función de filtración aplicado como envolvente de subdrenes colocado en la subrasante. Por último, se realizará el diseño con geomalla como refuerzo de base granular. Luego, se procederá a una evaluación del impacto técnico y económico. Para esto, se comparará un diseño convencional respecto al efectuado y se procederá a elegir la opción más conveniente.

Es importante que las soluciones presentadas sean tomadas en consideración ya que su estudio y aplicación podrían permitir un mayor avance y eficiencia en el diseño de carreteras. Su continuo desarrollo y buena aplicación puede conllevar a que se muestre



i



cada vez como alternativa técnica, económica para ciertas aplicaciones en el país. Según el profesor Koerner, doctor que viene estudiando este material hace más de 35 años, los geotextiles y las geomallas son la clave para un mayor tiempo de vida de los pavimentos (Koerner, 2013).

OBJETIVO Y ALCANCE

OBJETIVO

Este proyecto tiene como objetivo principal brindar una idea global acerca del diseño con geotextiles como separación y filtración y geomallas como refuerzo. De esta forma, se busca presentar la correcta forma de diseño y selección de estos geosintéticos, así como, el impacto técnico y económico que puede conllevar el uso de estos materiales. Así mismo, se busca asegurar el correcto funcionamiento de material en campo mediante un conjunto de especificaciones técnicas. Por último, esta tesis tiene como objetivo facilitar el entendimiento de los conceptos tratados mediante el desarrollo de una aplicación en Microsoft Visual Studio 2017. Esta última, proporcionará una forma interactiva de captar estos conceptos y podrá aplicarse para diversos casos de estudio.

ALCANCE

Por un lado, se emplearán métodos de diseño con geotextiles para la función de separación aplicada entre la subrasante y la capa granular correspondiente en pavimentos flexibles. Luego, se realizará un análisis técnico y económico asumiendo un correcto funcionamiento del material. Además, se presentará una especificación técnica de material, la cual fomentará las buenas prácticas en cuanto a la parte constructiva. El desarrollo del diseño, análisis técnico y económico será programado en Microsoft Visual Studio 2017 en el lenguaje de programación Visual Basic.

Por otro lado, se emplearán métodos de diseño con geotextiles para la función de filtración aplicado como envolvente de drenes en pavimentos flexibles. Se mostrará el impacto técnico y económico que conlleva su correcta instalación y se presentará una especificación técnica correspondiente a esta aplicación. El desarrollo del diseño, análisis técnico y económico será programado en Microsoft Visual Studio 2017 en el lenguaje de programación Visual Basic.

Finalmente, se emplearán métodos de diseño con geomallas para la función de refuerzo aplicado entre la subrasante y la capa granular correspondiente en pavimentos flexibles. Al igual que para casos anteriores, se realizará un análisis del impacto técnico y económico asumiendo el correcto funcionamiento de material y se presentará una guía de instalación. El desarrollo del diseño, análisis técnico y económico será programado en Microsoft Visual Studio 2017 en el lenguaje de programación Visual Basic. Para este caso también se hará uso del programa Spectra Pave4-Pro de la empresa TENSAR.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS ESPERADOS

METODOLOGÍA

Actividades 1: Emplear métodos de diseño con geotextil, analizar viabilidad técnica y económica, y proponer especificaciones técnicas para la función de separación aplicada entre la subrasante y la subbase en pavimentos flexibles.



ii



- 1.1 Diseñar por especificación empleando norma AASHTO M288.
- 1.2 Diseñar por función empleando la metodología propuesta en libro "Designing with geosynthetics" del Dr. Koerner
- 1.3 Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista técnico.
- 1.4 Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista económico.
- 1.5 Realizar especificación técnica.

Actividades 2: Emplear métodos de diseño con geotextil, analizar viabilidad técnica y económica, y proponer especificaciones técnicas para la función de filtración aplicado en sistemas de subdrenaje en pavimentos flexibles.

- 2.1 Diseñar por especificación empleando norma AASHTO M288-96.
- 2.2 Diseñar por función basándose en la metodología propuesta en el manual FHWA NHI-07-092 y empleando conceptos del manual de hidrología, hidráulica y drenaje del MTC y del libro "Designing with geosynthetics" del Dr. Koerner.
- 2.3 Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista técnico.
- 2.4 Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista económico.
- 2.5 Realizar especificación técnica.

Actividades 3: Emplear métodos de diseño con geomalla, analizar viabilidad técnica y económica, y proponer especificaciones técnicas para la función de refuerzo de base en pavimentos flexibles.

- 3.1 Diseñar por especificación empleando la norma AASHTO R-50.
- 3.2 Diseñar mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.
- 3.3 Analizar la viabilidad del uso del geomalla del punto de vista técnico.
- 3.4 Analizar la viabilidad del uso del geomalla del punto de vista económico.
- 3.5 Realizar especificación técnica.

RESULTADOS ESPERADOS

Respecto al caso de estudio, se espera obtener resultados a favor del uso de geosintéticos para las funciones tratadas respecto a soluciones convencionales del punto de vista técnico y económico. Además, se espera facilitar este tipo de análisis para diversos proyectos mediante el programa desarrollado.

REFERENCIAS

Koerner, G. R. (2013). *Data Base Development for Determination of Long Term Benefit/Cost of Geotextile Separators (Vol. 2)*.

Koerner, R. M., & Koerner, G. R. (2015). *Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions*. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(3).

Máximo: 100 páginas



iii



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Revisión de la Literatura	2
1.2. Justificación e hipótesis.....	3
1.2.1. Justificación.....	3
1.2.2. Hipótesis.....	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Metodología.....	4
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Tipos y características de geosintéticos a emplear	6
2.1.1. Geotextil.....	7
2.1.2. Geomalla	8
2.2. Funciones en estudio	9
2.2.1. Separación.....	9
2.2.2. Filtración	11
2.2.3. Refuerzo	12
2.3. Métodos de diseño.....	13
2.3.1. Diseño por costo y disponibilidad.....	13
2.3.2. Diseño por especificación	14
2.3.3. Diseño por función.....	16
2.3.3.1. Geotextil como separación entre base y subrasante.....	17

2.3.3.2.	Geotextil de filtración para envolvente de subdrenos.....	24
2.3.3.3.	Geomalla de refuerzo entre base y subrasante.....	27
3.	CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO: PROYECTO KISHUARA	30
3.1.	Generalidades del proyecto	30
3.2.	Estudio de mecánica de suelos	31
3.3.	Parámetros de diseño.....	37
3.4.	Estructura final adoptada.....	40
4.	CAPÍTULO IV: DISEÑO CON GEOSINTÉTICOS APLICADO PARA CASO DE ESTUDIO	43
4.1.	Diseño con geotextil para la función de separación	43
4.1.1.	Diseño por especificación	43
4.1.2.	Diseño por función.....	44
4.1.3.	Análisis técnico	46
4.1.4.	Análisis económico	49
4.1.5.	Especificaciones técnicas.....	52
4.2.	Diseño con geotextil para la función de filtración.....	55
4.2.1.	Diseño por especificación	55
4.2.2.	Diseño por función.....	56
4.2.3.	Análisis técnico	64
4.2.4.	Análisis económico	67
4.2.5.	Especificaciones técnicas.....	69
4.3.	Diseño con geomallas para la función de refuerzo.....	72
4.3.1.	Diseño por especificación	72
4.3.2.	Diseño con programa Spectra Pave4-Pro.....	74
4.3.3.	Análisis técnico	80
4.3.4.	Análisis económico	81
4.3.5.	Especificaciones técnicas.....	83

5. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMENTARIOS DE LOS DISEÑOS DESARROLADOS PARA CASO DE ESTUDIO.....	88
5.1. Diseño con geotextil para la función de separación	88
5.2. Diseño con geotextil para la función de filtración.....	90
5.3. Diseño con geomalla para la función de refuerzo	90
6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
7. REFERENCIAS.....	96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de fibra polimérica usadas para la elaboración de geotextiles (Koerner, 2012).....	7
Figura 2.2: Geotextiles típicos: tejido, no tejido, tricotado y cosido (Shukla, 2016)...	7
Figura 2.3: Fotomicrograma de varios tipos de geotextiles. (a) magnificada 5 veces y las otras por 30 veces (Koerner, 2012).....	8
Figura 2.4: Geomallas típicas: (a) extruida, (i) uniaxial, (ii) biaxial, (iii) triaxial, (b) soldada, (c) tejida (Scukla, 2016).....	9
Figura 2.5: Concepto de geosintético de separación en pavimento flexible: (a) pavimento con geosintético de separación; (b) pavimento sin geosintético de separación (Schukla, 2016).	10
Figura 2.6: (a) Mecanismo de bombeo del material fino en el agregado grueso. (b) Intrusión de la piedra en el suelo de la subrasante. En ambos casos no se emplea geotextil de separación (Koerner, 2014).	10
Figura 2.7: Función de filtración de geotextil bajo distintos tipos de suelo (Schukla, 2016).	11
Figura 2.8: Sección típica de subdrenes con geotextil de filtración. (a) y (b) incluyen tubería de drenaje; (c) y (d) solo contiene piedra chancada (Koerner, 2012).	12
Figura 2.9: Mecanismo efectuado debido a la interacción entre el suelo y el geosintético de refuerzo en pavimentos representado mediante ensayos de laboratorio (Perkins, 1999).	12
Figura 2.10: Arena de río no reforzada y reforzada luego de ensayo (Wu, et al., 2015).	13
Figura 2.11 Se muestra gráficamente los siguientes valores: MARV, promedio, y desviación estándar (Shukla, 2016).	15
Figura 2.12: Efecto de reventado en el geotextil generado por el agregado de la base (Koerner, 2012).	18
Figura 2.13: (a) Geotextil sujeto a esfuerzos de tensión aplicado por las piedras que buscan desplazarse lateralmente; (b) simplificación del mecanismo en (a) aplicando esfuerzos de tensión en geotextil en ensayos de laboratorio (Koerner, 2012).	20
Figura 2.14: Efecto de punzonamiento en geotextil causado por una roca. La presión es aplicada por debajo del material en este ejemplo (Koerner, 2012).	21

Figura 2.15: Movilización de energía por una roca que cae libremente sobre un geotextil con un apoyo inflexible (Koerner, 2012).	22
Figura 2.16: Factores de modificación recomendados para relacionados con propiedades mecánicas (Koerner, 2012).	23
Figura 2.17: Ensayo a largo plazo de flujo en geotextiles en contacto con suelo (Koerner y Ko, 1982).	27
Figura 2.18: Valores típico de TBR para un pavimento reforzado y no reforzado para llegar a un ahuellamiento dado (Shukla, 2002).	28
Figura 3.1: Mapa de ubicación del tramo de la carretera en estudio.	30
Figura 4.1: Especificaciones para asegurar supervivencia de geotextil no tejido como separador de capas según AASHTO 288-96 desarrollado en Visual Studio.	44
Figura 4.2: Diseño de geotextil de separación desarrollado en Visual Studio.	46
Figura 4.3: Análisis técnico para la función de separación desarrollado en Visual Studio.	48
Figura 4.4: Análisis económico entre pavimento con espesor de sacrificio y pavimento sin espesor adicional, pero con geotextil de separación desarrollado en Visual Studio.	51
Figura 4.5: Propiedades del geotextil a aplicar como filtro en sistema de subdrenaje según AASHTO M288-96.	56
Figura 4.6: Resultados de cálculo de diámetro de tubería realizado en Visual Studio.	58
Figura 4.7: Velocidad de flujo vs. Pendiente de subdrén según manual del MTC (MTC, 2011).	59
Figura 4.8: Diseño según la FHWA para sistema de subdrenaje desarrollado en Visual Studio.	63
Figura 4.9: Análisis técnico para sistema de subdrenaje desarrollado en Visual Studio.	66
Figura 4.10: Análisis económico para sistema de subdrenaje desarrollado en Visual Studio.	68
Figura 4.11: Diseño empleando normal AASHTO R-50 y GMA White Paper II desarrollado en Visual Studio.	74
Figura 4.12: Parámetros de tráfico ingresados en programa Spectra Pave4-Pro.	75
Figura 4.13: Parámetros ingresados en programa Spectra Pave4-Pro.	75

Figura 4.14: Aporte del uso de geomalla triaxial manteniendo espesores de capa en programa Spectra Pave4-Pro.....	76
Figura 4.15: Optimización de pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.	76
Figura 4.16: Optimización de sección 1 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.....	77
Figura 4.17: Optimización de sección 2 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.....	77
Figura 4.18: Optimización de sección 3 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.....	78
Figura 4.19: Optimización de sección 4 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.....	78
Figura 4.20: Optimización de sección 5 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.....	79
Figura 4.21: Optimización de sección 6 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.....	79
Figura 4.22: Análisis económico para la sección 1 empleando geomalla triaxial desarrollado en Visual Studio.	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Identificación de función primaria de algunos geosintéticos (Koerner, 2012).	6
Tabla 2.2: Propiedades de resistencia y requerimientos de geotextil según AASHTO M288-96 (AASHTO, 2011).	15
Tabla 2.3: Requerimientos para las propiedades de geotextil de separación según AASHTO M288-96 (AASHTO, 2011).	15
Tabla 2.4: Requerimientos para geotextil de drenaje subsuperficial según AASHTO M288-96 (AASHTO, 2011).	16
Tabla 2.5: Factores de reducción recomendados relacionados a propiedades mecánicas (Koerner, 2012).	17
Tabla 2.6: Valores recomendados para el análisis de punzonamiento (Koerner, 2012).	22
Tabla 2.7: Guía para evaluar la naturaleza del Proyecto y las condiciones de exposición para la aplicación de drenaje (Carroll, 1983).	24
Tabla 2.8: Factores de reducción recomendados relacionados a propiedades hidráulicas en flujos estáticos (Koerner, 2012).	25
Tabla 2.9: TAA máximo según condiciones de campo para flujo permanente (Holtz et al, 2008).	26
Tabla 3.1: Sectorización de la carretera Andahuaylas - Desvío Kishuara.	31
Tabla 3.2: Análisis granulométrico de los seis sectores de la carretera en estudio. ...	36
Tabla 3.3: CBR sin mejoramiento de subrasante, con mejoramiento y cálculo de Mr para cada tramo.	37
Tabla 3.4: Estimación del nivel de confiabilidad según la clasificación de la carretera (AASHTO, 1993).	38
Tabla 3.5: Valores de desviación standard normal según el nivel de confiabilidad (AASHTO, 1993).	38
Tabla 3.6: Valores de ejes estándar de ejes equivalentes.	39
Tabla 3.7: Diseño estructural adoptado para un tiempo de vida de diseño de 10 años.	42
Tabla 4.1: Análisis técnico respecto al uso de geotextil de separación entre subbase y subrasante.	49

Tabla 4.2: Análisis económico comparando pavimento con geotextil de separación respecto a pavimento con espesor de sacrificio de subbase.	51
Tabla 4.3: Ficha técnica del geotextil no tejido punzonado empleado para la función de separación.	53
Tabla 4.4: Diseño por función de los 6 tramos del caso de estudio.	63
Tabla 4.5: Análisis técnico del uso de subdrenes para los 6 tramos del caso de estudio.	66
Tabla 4.6: Análisis económico del uso de subdrenes para los 6 tramos del caso de estudio.	69
Tabla 4.7: Ficha técnica del geotextil no tejido punzonado empleado para la función de filtración.	70
Tabla 4.8: Optimización de sección 6 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.	80
Tabla 4.9: Análisis técnico entre valores requeridos, de diseño convencional y con geomalla.	81
Tabla 4.10: Análisis económico de la optimización de pavimento.	83
Tabla 4.11: Ficha técnica de la geomalla TX160 para la función de refuerzo.	85
Tabla 5.1: Análisis técnico y económico respecto al uso de geotextil de separación entre subbase y subrasante	89
Tabla 5.2: Valores de coeficiente estructural empleados en el programa SpectraPave4-Pro para el diseño con geomalla.	91
Tabla 5.3: Espesores mínimos recomendables de concreto asfáltico y base según ESAL (AASHTO, 1993).	91
Tabla 5.4: Análisis técnico y económico respecto al uso de geomalla de refuerzo de base para optimización de pavimento.	92

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El uso de geosintéticos ha venido revolucionando la construcción de obras civiles en el mundo debido a sus características. Sus principales ventajas como su facilidad de instalación, la reducción de costos en algunos casos, entre otros, han dado la posibilidad de reemplazar materiales convencionales. De esta forma se han podido aplicar en distintos proyectos en el Perú como en la carretera Iquitos-Nauta como refuerzo de base o Ilo-Desaguadero como envolvente de subdrenes. A pesar de esto, su aplicación en el país como solución viable sigue siendo limitado.

Para fomentar el uso de geosintéticos en pavimentos, es importante brindar una idea global del diseño de carreteras con geosintéticos y de sus impactos. Desde el punto de vista técnico, la evaluación de la condición de la carretera, así como la estimación del tiempo de vida y de mantenimiento pueden ser de gran ayuda. Otra forma de fomentar su uso, consistiría en mostrar su rentabilidad. Por ejemplo, en el caso de la aplicación de geomallas de refuerzo, basta con calcular el costo de la piedra ahorrada en la base respecto al costo del geosintético para obtener el monto ahorrado (Koerner, 1997). Sin embargo, es importante considerar correctamente las condiciones de campo ya que estas pueden ser adversas. Al mismo tiempo, debe realizarse una correcta colocación del material y entender sus limitaciones para obtener buenos resultados (Koerner y Koerner, 2015).

El presente trabajo busca dar una idea global acerca del diseño con geosintéticos en carreteras para la función de separación, filtración y refuerzo. Se presentó un caso de estudio el cual fue diseñado con geosintéticos para tres aplicaciones en particular. La primera, consistió en el diseño con geotextiles para la función de separación entre la base y la subrasante. Luego, se realizó el diseño con geotextil para la función de filtración aplicado como envolvente de subdrenes. Por último, se efectuó el diseño con geomalla como refuerzo aplicada entre la capa granular (base o subbase) y la subrasante. Una vez realizado el diseño, se evaluó el impacto técnico y económico. Para esto, se comparó el diseño convencional respecto al efectuado y se eligió la opción más conveniente.

Las soluciones presentadas buscan fomentar la aplicación de estos materiales ya que podrían permitir un mayor avance y eficiencia en el diseño de carreteras. Su continuo

desarrollo y correcta aplicación, podría presentarlo como una alternativa técnica y económica cada vez más viable para ciertas aplicaciones en el país.

1.1. Revisión de la Literatura

El desarrollo de nuevos materiales, así como su implementación pueden ser una alternativa técnica y económica para ciertas aplicaciones. Su uso en carreteras en el país ha ido tomando más fuerza, pero su aplicación sigue siendo limitada. Para fomentar su implementación, es importante dar una idea global del diseño de carreteras con geosintéticos y de sus impactos.

Desde el punto de vista técnico, una evaluación de la condición de la carretera, así como la estimación del tiempo de vida y de mantenimiento pueden ser de gran ayuda. En cuanto a la evaluación de la pista, existen métodos en campo (como la medición de deflexiones) e investigaciones que demuestran que el uso de geomallas o geotextiles reducen las deformaciones de la superficie del pavimento aumentando su vida útil (Murad Abu-Farsakh, 2016). Para predecir la longevidad de un pavimento existen dos métodos conocidos. El primero requiere del uso del programa Micro Paver Software, que emplea las condiciones de la carretera y el tiempo de uso. El segundo utiliza las ecuaciones empíricas de AASHTO por medio del valor de ESAL y la velocidad de diseño (Koerner, 1997).

Otra forma de fomentar el uso de geosintéticos es mostrando su rentabilidad. Puede estimarse el costo directo del material como el costo de la mano de obra que puede representar su aplicación. Así mismo, existen métodos para evaluar el costo a largo plazo. Por ejemplo, el método de Carroll o Barksdale presentan técnicas para estimar el costo total del proyecto durante su tiempo de vida (Koerner, 1997). Vale recalcar que para el diseño debe considerarse correctamente las condiciones de campo ya que estas pueden ser adversas. Así mismo, realizar una correcta colocación del material y entender sus limitaciones es fundamental para obtener buenos resultados (Koerner y Koerner, 2015).

En cuanto a los métodos de diseño, es importante destacar los más representativos. Por un lado, el diseño por costo y disponibilidad depende únicamente del gramaje, el cual está relacionado con el costo del producto y de su disponibilidad (Koerner, 2012). Por otro lado, el diseño por especificación hace uso de normas como la AASHTO M288-

96 y es necesario identificar la aplicación del geosintético para la correcta elección del material. Por último, el diseño por función consiste en determinar un factor de seguridad apropiado para la función principal que va a cumplir el geosintético. Se toman en cuenta las características del geosintético ligadas a esta función, así como las requeridas en campo (Koerner, 2012).

1.2. Justificación e hipótesis

1.2.1. Justificación

Según el Dr. Koerner, los geotextiles y las geomallas son la clave para un mayor tiempo de vida de los pavimentos (Koerner, 1997). Las soluciones existentes buscan mostrar estos beneficios.

Los geotextiles de separación evitan la mezcla de los materiales entre capas. Esto ayuda a mantener los espesores de diseño y por consiguiente aumentan la durabilidad del pavimento (Koerner, 2012).

Por otro lado, la utilización de geotextiles de filtración como envolvente de subdrenes busca evitar la contaminación excesiva de suelos finos retardando su posible colmatación (Koerner, 2012).

En cuanto al diseño de pavimentos con geomallas de refuerzo, su coeficiente estructural puede aumentar respecto a un diseño convencional en caso ambos diseños mantengan los mismos espesores de material. Otra aplicación consiste en disminuir estos espesores en caso se busque obtener el mismo coeficiente estructural de un diseño convencional. Por consecuencia, esto podría reducir el costo final del proyecto (Koerner, 2012).

1.2.2. Hipótesis

A partir de los puntos mencionados, la hipótesis plantea que el uso de geosintéticos buscaría mejorar técnica y económicamente el comportamiento de los pavimentos con respecto a los métodos convencionales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Esta tesis tiene como objetivo principal brindar una idea global acerca del diseño con geotextil como separación y filtración y geomalla como refuerzo. Para esto, se aplicaron distintos métodos de diseño y se evaluó el impacto técnico y económico de

estos materiales. Se desarrolló una aplicación en Visual Studio tanto el diseño, como el análisis técnico y económico y se aplicó para un caso de estudio en particular. De esta forma, el usuario podrá entender de forma interactiva los conceptos presentados en esta tesis. Así mismo, podrá aplicarla para diversos casos de estudio brindando una idea más sólida de los puntos tratados.

1.3.2. Objetivos específicos

Se emplearon métodos de diseño con geotextil para la función de separación aplicado entre la subrasante y la subbase en pavimentos flexibles. Luego, se realizó un análisis técnico y económico asumiendo una correcta instalación del material. Además, se presentaron las especificaciones técnicas del material para esta aplicación. El desarrollo del diseño, análisis técnico y económico fue programado en Microsoft Visual Studio 2017 en el lenguaje de programación Visual Basic.

Por otro lado, se emplearon métodos de diseño con geotextil para el caso de estudio para la función de filtración aplicado como envolvente de drenes en pavimentos flexibles. Se mostró el impacto técnico y económico que conlleva su correcta instalación y se presentaron las especificaciones técnicas del geotextil correspondiente a esta aplicación. El desarrollo del diseño, análisis técnico y económico fue programado en Microsoft Visual Studio 2017 en el lenguaje de programación Visual Basic.

Finalmente, se emplearon métodos de diseño con geomalla para el caso de estudio para la función de refuerzo aplicado entre la subrasante y la subbase en pavimentos flexibles. Al igual que para los casos anteriores, se realizó un análisis técnico y económico asumiendo la correcta instalación del material y se presentaron las especificaciones técnicas de la geomalla. El desarrollo del diseño, análisis técnico y económico fue programado en Microsoft Visual Studio 2017 en el lenguaje de programación Visual Basic. Para este caso, también se hizo del programa Spectra Pave4-Pro de la empresa TENSAR.

1.4. Metodología

Actividades 1: Emplear métodos de diseño con geotextil, analizar viabilidad técnica y económica y proponer especificaciones técnicas para la función de separación aplicado entre subrasante y subbase en pavimentos flexibles.

1.1. Diseñar por especificación empleando norma AASHTO M288-96.

- 1.2. Diseñar por función empleando la metodología propuesta en libro “Designing with Geosynthetics” del Dr. Koerner.
- 1.3. Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista técnico.
- 1.4. Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista económico.
- 1.5. Realizar especificaciones técnicas del material para la aplicación.

Actividades 2: Emplear métodos de diseño con geotextil, analizar viabilidad técnica y económica y proponer especificaciones técnicas para la función de filtración aplicado en sistemas de subdrenaje en pavimentos flexibles.

- 2.1. Diseñar por especificación empleando norma AASHTO M288-96.
- 2.2. Diseñar por función basándose en la metodología propuesta en el manual FHWA NHI-07-092 y en el libro “Designing with Geosynthetics” del Dr. Koerner.
- 2.3. Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista técnico.
- 2.4. Analizar la viabilidad del uso del geotextil del punto de vista económico.
- 2.5. Realizar especificaciones técnicas del material para la aplicación.

Actividades 3: Emplear métodos de diseño con geomalla, analizar viabilidad técnica y económica y proponer especificaciones técnicas para la función de refuerzo aplicado entre la subrasante y la subbase en pavimentos flexibles.

- 3.1. Diseñar por especificación empleando la norma AASHTO R-50.
- 3.2. Diseñar mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.
- 3.3. Analizar la viabilidad del uso de geomalla del punto de vista técnico.
- 3.4. Analizar la viabilidad del uso de geomalla del punto de vista económico.
- 3.5. Realizar especificaciones técnicas del material para la aplicación.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

El presente capítulo tiene como objetivo exponer los conceptos principales manejados para el diseño. En primer lugar, se comentó acerca de los geosintéticos en estudio y de sus características principales. Luego, se presentaron las funciones de los geosintéticos aplicados en el proyecto y de los mecanismos que buscan mitigar. Por último, se explicó acerca de los tipos de ensayo realizados en laboratorio para estas funciones y las principales metodologías de diseño empleadas.

2.1. Tipos y características de geosintéticos a emplear

Los geosintéticos, según ASTM D4439, son un producto planar hecho a base de material polimérico. Estos materiales están en contacto con suelo, roca, tierra u otro material relacionado a la ingeniería geotécnica que pueda integrarse en proyectos, estructuras o sistema. Pueden cumplir 5 funciones principales: separación, filtración, refuerzo, drenaje e impermeabilización o barrera hidráulica (Koerner, 2012). Además, se pueden clasificar principalmente en los siguientes tipos: geotextiles, geomallas, geonets, geomembranas, GCL, geoespuma, geocompuestos, geo-otros. Cada uno de estos geosintéticos posee funciones distintas como se muestra en la tabla 2.1 a continuación.

Tabla 2.1: Identificación de función primaria de algunos geosintéticos (Koerner, 2012).

Type of Geosynthetic (GS)	Primary Function				
	Separation	Reinforcement	Filtration	Drainage	Containment
Geotextile (GT)	√	√	√	√	
Geogrid (GG)		√			
Geonet (GN)				√	
Geomembrane (GM)					√
Geosynthetic Clay Liner (GCL)					√
Geofoam (GF)	√				
Geocomposite (GC)	√	√	√	√	√

En este estudio nos enfocaremos en la utilización de los siguientes geosintéticos:

- Geotextil para la función de separación entre la base y subrasante
- Geotextil para la función de filtración como envolvente de drenes
- Geomalla para la función de refuerzo entre la base y la subrasante

A continuación, se definirán los geosintéticos en estudio, se presentarán su forma de clasificación y características que poseen.

2.1.1. Geotextil

Los geotextiles son un tipo de geosintético permeable compuesto por textiles. Son usados usualmente en rocas, tierra u otros (Koerner, 2012). Se pueden clasificar por su proceso de fabricación. Entre ellos se encuentran: El tipo de polímetro empleado, el tipo de fibra empleada y el estilo de tela fabricado (Koerner, 2012). En cuanto al tipo de polímero empleado, se puede comentar que la mayoría de geotextiles son manufacturados de polipropileno (en 95% de los casos aproximadamente). También existen geotextiles de poliéster (2% aprox.), polietileno (2%aprox.) y nylon (1%aprox.) (Koerner, 2012). Por otro lado, se puede definir un geotextil por el tipo de fibra. Entre ellos se encuentran los siguientes (Figura 2.1): monofilamento, multifilamento, Fibra cortada, película de hendidura monofilamento y hendidura-película multifilamento (Koerner, 2012).

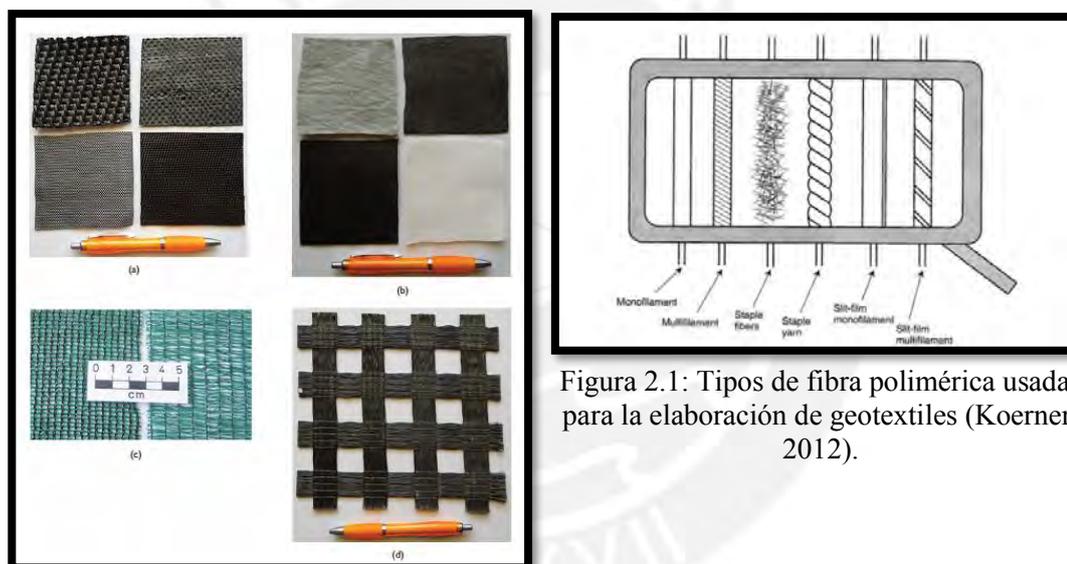


Figura 2.1: Tipos de fibra polimérica usadas para la elaboración de geotextiles (Koerner, 2012).

Figura 2.2: Geotextiles típicos: tejido, no tejido, tricotado y cosido (Shukla, 2016).

Otra forma de clasificar los geotextiles es por el estilo de tela usado. Entre ellos se encuentra el geotextil tejido y no tejido. El geotextil tejido posee una estructura plana y regular y contiene uno o varios juegos de hilos en dos direcciones usualmente formando ángulos rectos como se puede ver en la figura Fig. 2.2 (a) (Shukla, 2016). El geotextil no tejido posee fibras orientadas aleatoriamente en una banda suelta unida por fundición parcial, punzonado o agentes químicos como gomas, látex, celulosa entre otros como se puede ver en la figura Fig. 2.2 (b) (Shukla, 2016). El geotextil tricotado es producido por entrelazado de uno o varios hilos (u otros elementos) junto

con una máquina tricotosa, en lugar de un telar como se puede ver en la figura 2.2 (c) (Shukla, 2016). El geotextil cosido posee fibras (o los hilos o ambos) entrelazadas por costura como se puede ver en la figura Fig. 2.2 (d) (Shukla, 2016). Adicionalmente, la figura 2.3 muestra la composición de distintos tipos de geotextiles a una escala microscópica. De esta forma se puede apreciar este material en 2 escalas distintas.

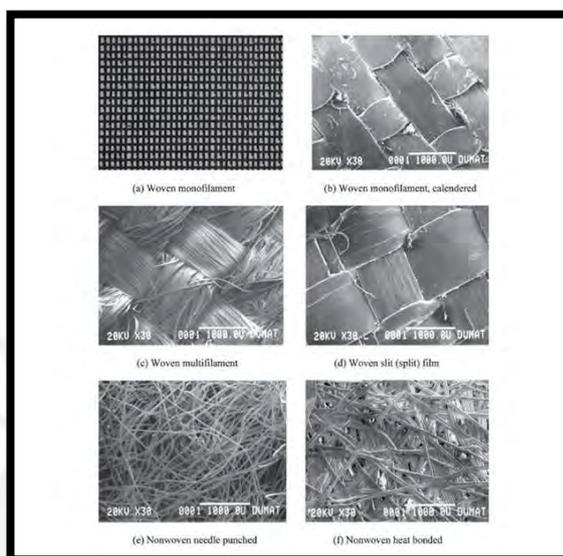


Figura 2.3: Fotomicrograma de varios tipos de geotextiles. (a) magnificada 5 veces y las otras por 30 veces (Koerner, 2012).

2.1.2. Geomalla

La geomalla es conocida como el geosintético de refuerzo por excelencia. Está compuesta por costillas paralelas conectadas entre sí. El espacio entre estas costillas permite generar un efecto de trabazón del suelo, piedra u otro material geotécnico (Koerner, 2012). Las costillas pueden ser unidas mediante extrusión, unión o entrelazados (Shukla, 2016).

Las geomallas extruidas se clasifican de la siguiente manera:

- Geomalla uniaxial: Producida mediante el estiramiento longitudinal de una hoja de polímero perforado de forma regular como se aprecia en la figura 2.4 (i).
- Geomalla biaxial: Producida mediante el estiramiento longitudinal en 2 direcciones de una hoja de polímero perforado de forma regular. Por esto, posee resistencia a la tracción igual en ambas direcciones como muestra la figura 2.4 (ii).
- Geomalla triaxial: Producida para tener resistencia a la tracción en distintas direcciones como puede observarse en la figura 2.4 (iii) (Shukla, 2016).

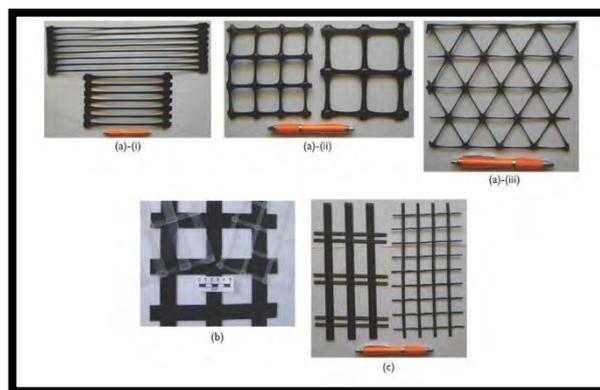


Figura 2.4: Geomallas típicas: (a) extruida, (i) uniaxial, (ii) biaxial, (iii) triaxial, (b) soldada, (c) tejida (Scukla, 2016).

2.2. Funciones en estudio

Esta sección tiene como propósito describir las funciones básicas y los beneficios que aporta el uso de geosintéticos en pavimentos flexibles. Entre las funciones principales empleadas en carreteras se encuentra la función de separación, filtración, refuerzo, y drenaje (Shukla, 2002). Las primeras tres funciones mencionadas serán descritas a continuación ya que forman parte del alcance de la tesis. Vale mencionar que la identificación de estas funciones ayudará posteriormente para el diseño por función.

2.2.1. Separación

El concepto de separación se puede ilustrar mediante la siguiente oración: “10 kg de piedra sobre 10kg de barro conllevan a 20 kg de barro”. Con esto se puede entender la importancia de evitar la mezcla de materiales adyacentes para que estos mantengan sus propiedades y con ello su correcto funcionamiento. El uso de un geosintético de separación busca evitar aquellos mecanismos que suelen generar este tipo de fenómeno (Koerner, 2012).

La figura 2.5 ilustra el concepto de separación mencionado anteriormente. El caso (a) emplea un geosintético de separación, el cual evita la mezcla entre el agregado grueso de la base y el suelo fino de la subrasante. Se puede apreciar que el espesor de diseño se mantiene intacto y que el esfuerzo soportado por la base es el mismo en todo su espesor. En cambio, en el caso (b) se aprecia una mezcla parcial entre ambos materiales

al no contar con un material de separación. Esto conlleva a una reducción de espesor efectivo de la base del pavimento flexible, reduciendo su capacidad portante.

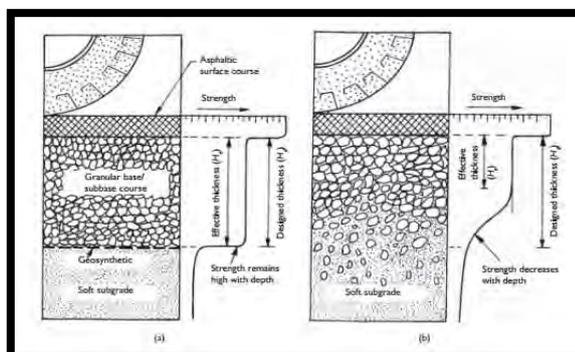


Figura 2.5: Concepto de geosintético de separación en pavimento flexible: (a) pavimento con geosintético de separación; (b) pavimento sin geosintético de separación (Schukla, 2016).

La mezcla de este material se debe principalmente a dos mecanismos de falla. Por un lado, el fenómeno de bombeo consiste en la mezcla del material de la subrasante respecto al material granular adyacente causado principalmente por el agua. Esto reduce la capacidad de bombeo de la base. Por otro lado, la mezcla de estos dos materiales se puede llevar a cabo debido a la intrusión del agregado grueso en la subrasante. Este fenómeno conlleva a la reducción de la capacidad portante de la base (Koerner, 2012). En la figura 2.6 los dos mecanismos son ilustrados mediante un esquema y un caso real.

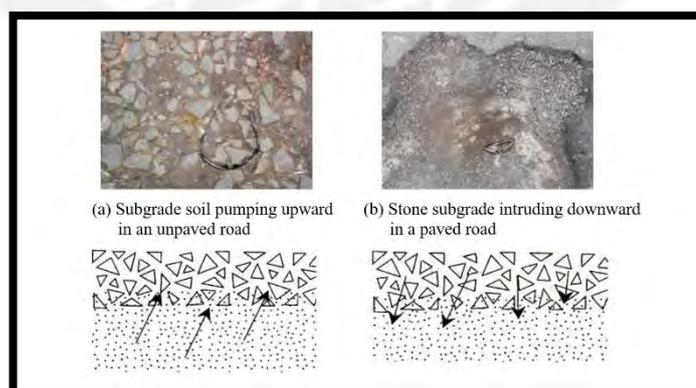


Figura 2.6: (a) Mecanismo de bombeo del material fino en el agregado grueso. (b) Intrusión de la piedra en el suelo de la subrasante. En ambos casos no se emplea geotextil de separación (Koerner, 2014).

En cuanto a la aplicación de geotextiles en pavimentos, se puede comentar que su uso podría reemplazar espesores de sacrificio. Estos corresponden a un aumento del

espesor de diseño de la base (o subbase) con el fin de mantener un espesor efectivo que pueda soportar correctamente las solicitaciones demandadas (Koerner, 2012).

2.2.2. Filtración

El uso de un geosintético para la función de filtración tiene como finalidad permitir un correcto flujo de agua perpendicular a su plano reteniendo el material fino. Para esto, se requiere una abertura lo suficientemente grande para dejar pasar el agua y lo suficientemente pequeña para retener las partículas sólidas. Además, el geosintético debe tener cierta compatibilidad con el suelo adyacente para evitar su excesiva colmatación durante el tiempo de vida del sistema (Koerner, 2012). La figura 2.7 muestra el concepto de filtración el cual puede llevarse a cabo bajo distintos tipos de suelo.

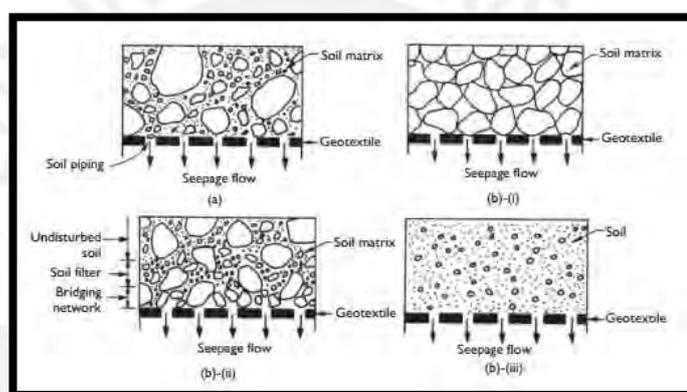


Figura 2.7: Función de filtración de geotextil bajo distintos tipos de suelo (Schukla, 2016).

El diseño de un geotextil con un tamaño de apertura que satisfaga el flujo de agua y retenga las partículas sólidas puede resultar contradictorio. Pero, puede efectuarse debido a que la cantidad de flujo de agua que pasa por el suelo está relacionada al tamaño sus partículas (Koerner, 2012). En la siguiente ecuación empírica podemos observar la relación entre el coeficiente de permeabilidad y el tamaño de la partícula del suelo:

$$k = Cd_{10}^2$$

Donde:

- k: Coeficiente de permeabilidad del suelo
- C: Constante específica del lugar
- d_{10} : Tamaño de la partícula para el cual el 10% del suelo es más fino

En cuanto a la aplicación de geosintéticos para la función de filtración en carreteras, esta tesis se enfoca en el uso de geotextiles como envolvente de subdrenes. Estos pueden colocarse alrededor de distintos elementos de drenaje como en la figura 2.8 (a) donde la conducción del agua se efectúa a través de una tubería y de grava. Se puede también emplear solo grava como muestra la figura 2.8 (c) y (d) o reemplazar todo filtro granular alrededor de la tubería perforada de drenaje por un geotextil (Figura 2.8 (b)). En todos los casos, el geosintético busca evitar la colmatación de los elementos de drenaje y asegurar que el agua fluya correctamente.

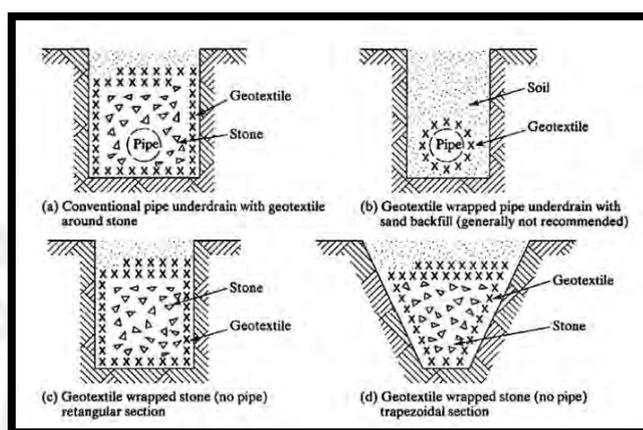


Figura 2.8: Sección típica de subdrenes con geotextil de filtración. (a) y (b) incluyen tubería de drenaje; (c) y (d) solo contiene piedra chancada (Koerner, 2012).

2.2.3. Refuerzo

Otra función que puede cumplir un geosintético en pavimentos es la de refuerzo. El objetivo principal consiste en mejorar la capacidad portante del suelo. Se puede aplicar en el refuerzo de taludes, por ejemplo, para mejorar su estabilidad o volverlos más empinados (Koerner, 2012). La figura 2.9 ilustra el efecto generado por las cargas de tránsito. Estas generan esfuerzos en el plano de la geomalla provocando deformaciones en esta.

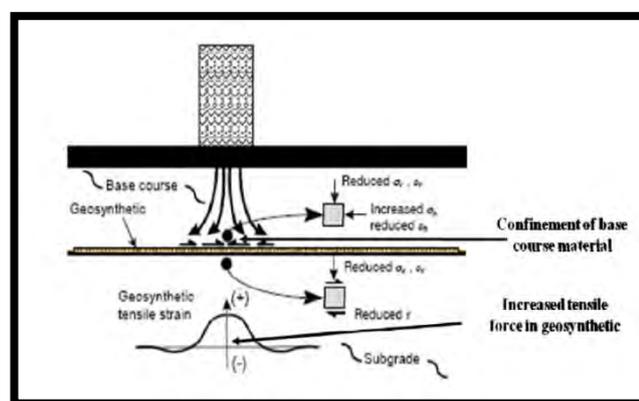


Figura 2.9: Mecanismo efectuado debido a la interacción entre el suelo y el geosintético de refuerzo en pavimentos representado mediante ensayos de laboratorio (Perkins, 1999).

Entre los beneficios que puede aportar el uso de geomalla entre la base y la subrasante es la disminución de asentamientos (Hao Wu, et al., 2015). Existen diversas investigaciones que llegan a esta conclusión mediante ensayos en laboratorio. Por ejemplo, la figura 2.10 muestra este efecto. La parte (c) compara el efecto de las cargas en un caso no reforzado representado con una línea negra respecto a un caso reforzado.

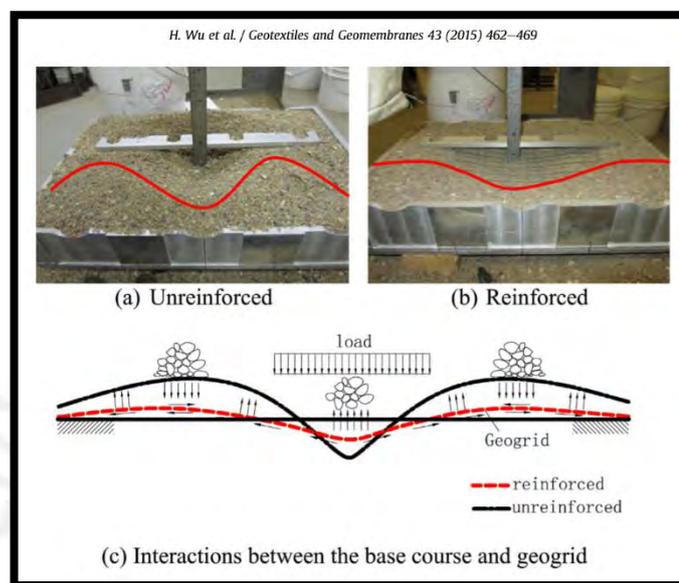


Figura 2.10: Arena de río no reforzada y reforzada luego de ensayo (Wu, et al., 2015).

2.3. Métodos de diseño

En cuanto al diseño con geosintéticos, existen distintas metodologías que pueden ser consideradas para la elección del material. Entre ellas se encuentran las siguientes: El diseño por costo y disponibilidad, el diseño por especificación y por el diseño por función. Es importante resaltar que las normas para geotextiles emplean el diseño por especificación.

2.3.1. Diseño por costo y disponibilidad

Este tipo de diseño es el más antiguo. En este caso, el geotextil se selecciona por su gramaje ya que su costo depende directamente de este parámetro. El precio unitario del material se determina dividiendo el dinero a invertir disponible por el área a cubrir con el geosintético. A partir de esto, se selecciona el geotextil con mejor calidad dentro del límite de precio unitario calculado y de su disponibilidad. Este tipo de “diseño” no es la mejor manera de sección de material ya que no toman en cuenta parámetro que influyen directamente en el comportamiento del material (Shukla, 2016).

2.3.2. Diseño por especificación

Este diseño es el más usado por entidades como AASHTO o DOT que se dedican a normalizar el uso de estos materiales.

Consiste en determinar el material que cumpla las propiedades mínimas y a veces máximas según la aplicación del material. Generalmente estas propiedades se basan en la experiencia local para aplicaciones de rutina (Shukla, 2016). El manual de carretera vigente en el Perú indica que las especificaciones de la norma AASHTO M288-96 deben ser empleadas para el diseño con geotextiles en carreteras. En cuanto al diseño con geomallas en carreteras, no se hace referencia a ninguna norma en particular por lo que se aplicó para el presente proyecto las especificaciones AASHTO R-50.

Los valores presentados en la normas usualmente no se refieren a valores promedios de producción. En general hacen mención a valores llamados MARV. Estos están basados en un porcentaje de confiabilidad (usualmente de 97.5%). Es decir, que la probabilidad que las propiedades del geosintético sean igual o mayor es muy alta. El valor MARV se estima de la siguiente forma:

$$\text{MARV} = X - 2S$$

Donde:

- X: Valor promedio de un cierto número de ensayos
- S: Desviación estándar

Este valor depende de la calidad del productor y son usualmente colocados en las tablas de cada fabricante. Si bien los valores MARV suelen ser aplicados para casi todas las propiedades, existen casos en el que se usan valores maxMARV. Este valor indica que la producción no lo excede más que en un pequeño porcentaje. El único valor en estudio que toma en cuenta valores maxMARV es el tamaño aparente de la partícula (AOS). En la figura 2.11 se puede apreciar la relación que existe entre los distintos valores estadísticos empleados por las normas y por los fabricantes. Se muestra gráficamente lo que representan los valores MARV y maxMARV, entre otros.

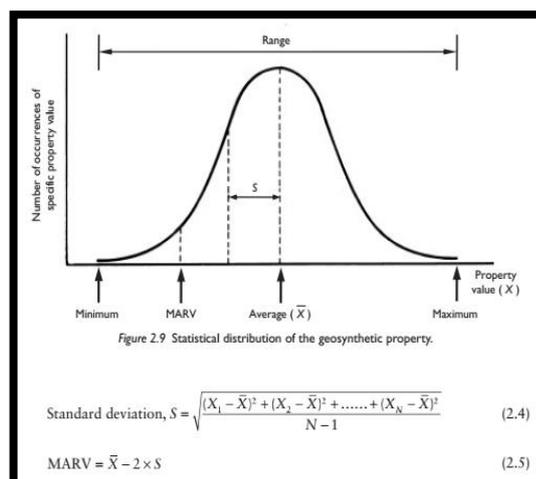


Figura 2.11 Se muestra gráficamente los siguientes valores: MARV, promedio, y desviación estándar (Shukla, 2016).

En cuanto al diseño con geotextil, las siguientes tablas (tabla 2.2, tabla 2.3, y tabla 2.4) muestran las propiedades a tener en cuenta para su elección según las especificaciones AASHTO M288-96. Las tablas presentadas están relacionadas a los requerimientos de separación y filtración. Estas tablas serán empleadas en el diseño del caso de estudio posteriormente.

Tabla 2.2: Propiedades de resistencia y requerimientos de geotextil según AASHTO M288-96 (AASHTO, 1997).

Property	Test Methods	Units	Geotextile Classification					
			Class 1		Class 2		Class 3	
			Elongation < 50 % i.e., woven	Elongation ≥ 50 % i.e., nonwoven	Elongation < 50 % i.e., woven	Elongation ≥ 50 % i.e., nonwoven	Elongation < 50 % i.e., woven	Elongation ≥ 50 % i.e., nonwoven
Grab Strength	ASTM D4632	N	1400	900	1100	700	800	500
Sewn Seam Strength	ASTM D4632	N	1260	810	990	630	720	450
Tear Strength	ASTM D4533	N	500	350	400	250	300	180
Puncture Strength	ASTM D4833	N	500	350	400	250	300	180
Permittivity	ASTM D4491	sec ⁻¹	Minimum property requirements for permittivity, AOS and UV stability are based on geotextile application. Refer to Table 2.2b for subsurface filtration, Table 2.2c for separation, Table 2.2d for stabilization, or Table 2.2e for permanent erosion control.					
Apparent Opening Size	ASTM D4751	mm						
Ultraviolet Stability	ASTM D4355	%						

Tabla 2.3: Requerimientos para las propiedades de geotextil de separación según AASHTO M288-96 (AASHTO, 1997).

Property	Test Methods	Units	Requirements
Geotextile Class			Class 2 from Table 2.2a
Permittivity	ASTM D4491	sec ⁻¹	0.02
Apparent Opening Size	ASTM D4751	mm	0.60 max. avg. roll value
Ultraviolet Stability (Retained Strength)	ASTM D4355	%	50% after 500 hrs. of exposure

Tabla 2.4: Requerimientos para geotextil de drenaje subsuperficial según AASHTO M288-96 (AASHTO, 1997).

Property	Test Methods	Units	Requirements		
			Percent In-Situ Soil Passing 0.075 mm		
			< 15	15 to 50	> 50
Geotextile Class			Class 2 from Table 2.2a		
Permittivity	ASTM D4491	sec ⁻¹	0.5	0.2	0.1
Apparent Opening Size	ASTM D4751	mm	0.43	0.25	0.22
			max. avg. roll value	max. avg. roll value	max. avg. roll value
Ultraviolet Stability (Retained Strength)	ASTM D4355	%	50% after 500 hrs. of exposure		

2.3.3. Diseño por función

El objetivo de este procedimiento de diseño consiste en definir algunas de las propiedades principales que debe contar el material para una función en particular. Estos parámetros dependen de las condiciones de campo donde se desee colocar el geosintético. Esta forma de diseño ayuda a determinar el geosintético de forma más técnica que los dos procedimientos presentados anteriormente (Koerner, 2012).

Para esto, primero se debe determinar la función principal para la cual se va a emplear el geosintético como por ejemplo, para la función de separación, filtración, refuerzo, drenaje, impermeabilización entre otros. Luego, es necesario calcular la propiedad requerida para la función primaria elegida. Después, debe obtenerse un valor permisible para poder obtener un factor de seguridad mediante el cociente de los dos valores determinados. El factor de seguridad óptimo dependerá de cuán crítica sea la situación y de las consecuencias que pueda presentar la falla de la estructura. En caso existan varias posibilidades de elección del material, la decisión final dependerá del costo y la disponibilidad de este (Koerner, 2012). Las fórmulas presentadas a continuación son la base de esta metodología para cualquiera de las funciones a elegir.

$$FS = \frac{\text{Propiedad permisible}}{\text{Propiedad requerida}}$$

$$\text{Propiedad admisible} = \frac{\text{Propiedad última}}{\text{PIFR}}$$

Donde:

- **Propiedad última:** Valor numérico determinado a partir de ensayos en laboratorio.
- **Propiedad permisible:** Valor numérico determinado a partir de ensayo en laboratorio ajustado por los distintos factores de reducción según las condiciones de campo.
- **Propiedad requerida:** Valor numérico determinado a partir de metodologías de diseño que modelan las condiciones de campo.
- **Factor de seguridad:** Relación entre las propiedades del material a colocar y las propiedades que este debe cumplir en campo.
- **PIFR:** Productoria de factores de reducción. Corresponde a la multiplicación de los diversos factores que pueden afectar la durabilidad del material. Por ejemplo, los daños de instalación, el flujo plástico (creep), la degradación química y biológica, entre otros.

2.3.3.1. Geotextil como separación entre base y subrasante

En cuanto al diseño para la función de separación se deben analizar 4 aspectos: La resistencia al reventado, al punzonamiento, al reventado y al impacto. Además, se deben tener en cuenta que existen factores de reducción sugeridos para esta función presentada en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Factores de reducción recomendados relacionados a propiedades mecánicas (Koerner, 2012).

Area	Range of Reduction Factors		
	Installation Damage	Creep*	Chemical/Biological Degradation**
Separation	1.1 to 2.5	1.5 to 2.5	1.0 to 1.5
Cushioning	1.1 to 2.0	1.2 to 1.5	1.0 to 2.0
Unpaved roads	1.1 to 2.0	1.5 to 2.5	1.0 to 1.5
Walls	1.1 to 2.0	2.0 to 4.0	1.0 to 1.5
Embankments	1.1 to 2.0	2.0 to 3.5	1.0 to 1.5
Bearing and foundations	1.1 to 2.0	2.0 to 4.0	1.0 to 1.5
Slope stabilization	1.1 to 1.5	2.0 to 3.0	1.0 to 1.5
Pavement overlays	1.1 to 1.5	1.0 to 2.0	1.0 to 1.5
Railroads (filter/sep.)	1.5 to 3.0	1.0 to 1.5	1.5 to 2.0
Flexible forms	1.1 to 1.5	1.5 to 3.0	1.0 to 1.5
Silt fences	1.1 to 1.5	1.5 to 2.5	1.0 to 1.5

*The low end of the range refers to applications which have relatively short service lifetimes and/or situations where creep deformations are not critical to the overall system performance.
 **Previous editions of this book have listed biological degradation as a separate reduction factor. As described in Section 2.3.6, however, there is no evidence of such degradation for the polymers used to manufacture geotextiles.

Resistencia al reventado

Es necesario efectuar un diseño que asegure la resistencia del geotextil al reventado generado por la presión ejercida por agregado de la base. Esta presión, está directamente relacionada a las cargas de tráfico las cuales son transmitidas a la piedra. Este fenómeno se puede explicar teóricamente de la siguiente forma: Si consideramos que las partículas de agregado sobre el geotextil tienen un diámetro medio (d_a) como se muestra en la figura 2.12, habría vacíos en su interior por donde el geotextil podría entrar. Por lo tanto, las cargas de tráfico provocarían que el suelo de la subrasante empuje el geosintético hacia arriba (entre los vacíos mencionados).

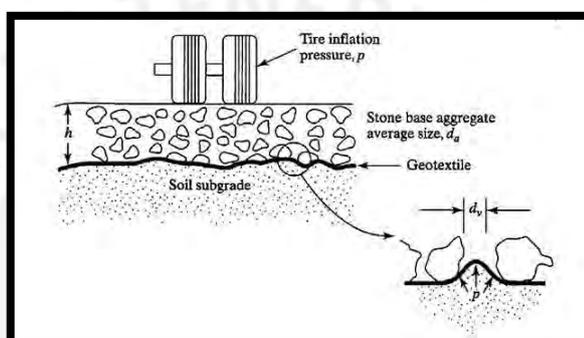


Figura 2.12: Efecto de reventado en el geotextil generado por el agregado de la base (Koerner, 2012).

La tensión requerida por el geotextil para esta aplicación es traducida por la siguiente fórmula (Giroud, 1998):

$$T_{reqd} = \frac{1}{2} p' d_v [f(\epsilon)]$$

Donde:

- T_{reqd} : Resistencia requerida del geotextil
- p' : Esfuerzo en el geotextil el cual es un poco menor al ejercido por la presión de las llantas al pavimento
- d_v : Diámetro máximo de vacío de la piedra (aprox. $0.33d_a$)
- $f(\epsilon)$: Función de deformación del geotextil deformado
- $f(\epsilon) = \frac{1}{4} \left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y} \right)$
- b : Ancho de apertura (o vacío)
- y : Deformación en la apertura (o vacío)

Para el cálculo de la resistencia última se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$T_{ult} = \frac{1}{2} p_{test} d_{test} [f(\epsilon)]$$

Donde:

- T_{ult} : Resistencia última del geotextil
- p_{test} : Presión de reventado del geotextil a la falla
- d_{test} : Diámetro de ensayo de reventado (=30mm)

A partir de estas dos fórmulas y de los factores de reducción empleados para esta aplicación se puede determinar el factor de seguridad correspondiente a la resistencia al reventado.

Resistencia a la tensión

Un geotextil como separación entre base (o subbase) y subrasante está expuesto a diversos fenómenos que se realizan simultáneamente. Uno de ellos es la tensión ejercida por el agregado de la base sobre el geotextil. Este fenómeno se produce debido a que el geotextil se encuentra entre las piedras de la base que ejercen presión sobre este y las que están debajo del geotextil. Estas últimas, tienden a desplazarse lateralmente generando esfuerzos de tensión en el plano del geotextil y por consecuencia ejerce deformaciones en este como muestra la figura 2.13(a). Los ensayos de tracción en laboratorio figura 2.13 (b) buscan simular este efecto para determinar la tensión última del material. De esta forma, se puede identificar la resistencia a la tensión que debe tener el geotextil para trabajar correctamente bajo estas sollicitaciones (Koerner, 2012).

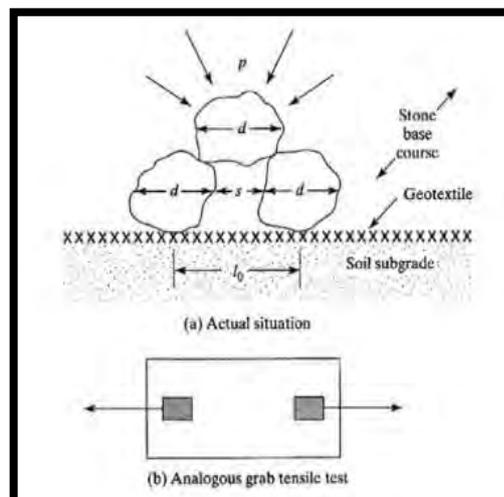


Figura 2.13: (a) Geotextil sujeto a esfuerzos de tensión aplicado por las piedras que buscan desplazarse lateralmente; (b) simplificación del mecanismo en (a) aplicando esfuerzos de tensión en geotextil en ensayos de laboratorio (Koerner, 2012).

La fuerza de tracción que se moviliza está relacionada con la presión que ejerce sobre la piedra. Mediante la siguiente ecuación se puede estimar esta fuerza (Giroud, 1998):

$$T_{reqd} = p'(d_v)^2[f(\epsilon)]$$

Donde:

- T_{reqd} : Resistencia requerida del geotextil
- p' : Esfuerzo en el geotextil el cual es un poco menor al ejercido por la presión de las llantas al pavimento
- d_v : Diámetro máximo de vacío de la piedra (aprox. $0.33d_a$)
- $f(\epsilon)$: Función de deformación del geotextil deformado
- $f(\epsilon) = \frac{1}{4}\left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y}\right)$
- b : Ancho de apertura (o vacío)
- y : Deformación en la apertura (o vacío)

Mediante el cálculo de la tensión requerida, de la tensión última y de los factores de reducción correspondiente se puede determinar el factor de seguridad para esta aplicación.

Resistencia al punzonamiento

La importancia de determinar la resistencia al punzonamiento se debe principalmente al daño de instalación que puede presentar el geotextil. Una falla de este tipo conllevaría a un mal funcionamiento del material sin importar el diseño efectuado. La figura 2.14 muestra este fenómeno realizado en laboratorio.

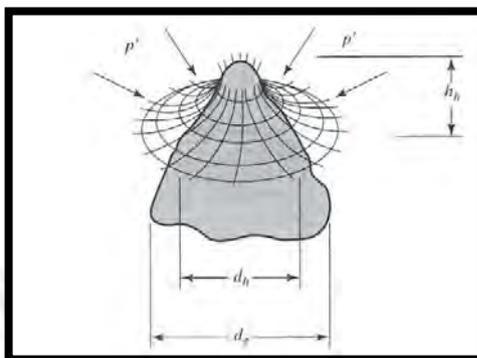


Figura 2.14: Efecto de punzonamiento en geotextil causado por una roca. La presión es aplicada por debajo del material en este ejemplo (Koerner, 2012).

La fórmula aplicada presentada a continuación, refleja este efecto empleando factores que puedan simular el fenómeno real.

$$F_{reqd} = p'(d_a)^2 S_1 S_2 S_3$$

Donde:

- F_{reqd} : Resistencia requerida de punzonamiento del geotextil
- p' : Esfuerzo en el geotextil el cual es un poco menor al ejercido por la presión de las llantas al pavimento
- d_a : Diámetro promedio del agregado punzante
- S_1 : Factor de protusión del objeto de punción
- S_2 : Factor de escala para ajustar el valor de prueba de punción ASTM D4833 que utiliza una sonda de punción de 8,0 mm de diámetro al objeto de punción real
- S_3 : Factor de forma para ajustar la sonda de punción plana ASTM D4833 a la forma real del objeto de punción

La tabla 2.6 facilita la determinación de estos factores según la forma y el tamaño del agregado en contacto con el geotextil.

Tabla 2.6: Valores recomendados para el análisis de punzonamiento (Koerner, 2012).

Puncturing Object	S ₁	S ₂	S ₃
angular & relatively large	0.9	0.8	0.9
angular & relatively small	0.6	0.6	0.7
subrounded & relatively large	0.7	0.6	0.6
subrounded & relatively small	0.4	0.4	0.5
rounded & relatively large	0.5	0.4	0.4
rounded & relatively small	0.2	0.2	0.3

Resistencia al impacto

Otro de los posibles daños por instalación que se puede generar en el geotextil se debe al impacto causado por la roca al caer sobre este. Se puede analizar este efecto como un problema de caída libre teniendo en cuenta el peso del elemento y de su altura de caída. En cuanto al diseño se deben asumir ciertos parámetros. Por un lado, la energía a considerar sería gravitacional ya que normalmente no se impulsa objetos intencionalmente sobre el geotextil. Además, se asume una roca de gravedad específica de 2.6 y un diámetro que varía entre 25 a 600 milímetros. También, se considera una altura de caída que puede variar entre 0.5 a 5 m. Para estas condiciones se puede emplear la figura 2.15 para el diseño (Koerner, 2012).

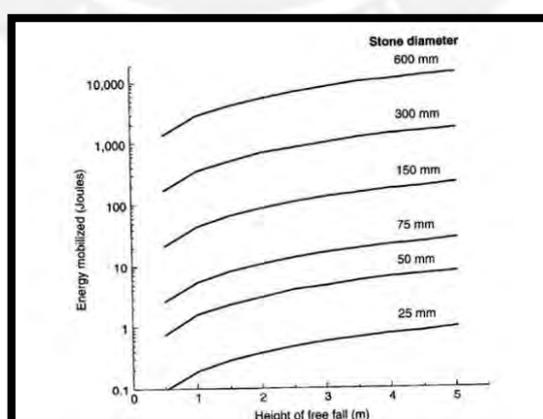


Figura 2.15: Movilización de energía por una roca que cae libremente sobre un geotextil con un apoyo inflexible (Koerner, 2012).

Adicionalmente, se puede emplear la siguiente fórmula para el cálculo de energía potencial:

$$E = [V * (\rho_w G_s)]gh$$

Donde:

- E: Energía desarrollada (joules)
- M: Masa del objeto en caída libre (kg)
- g: Aceleración de la gravedad (m/sec²)
- h: Altura de caída (m)
- V: Volumen del objeto (m³)
- ρ_w : Densidad del agua (kg/m³)
- G_s : Gravedad específica del objeto (adimensional)

Es importante mencionar que la energía calculada debe ser afectada por factores de modificación como muestra la figura 2.16. Ya que se analiza el peor escenario posible. Debe tenerse en cuenta que a medida que el suelo de apoyo se deforma, el geotextil tendría mayor capacidad para absorber la energía de impacto.

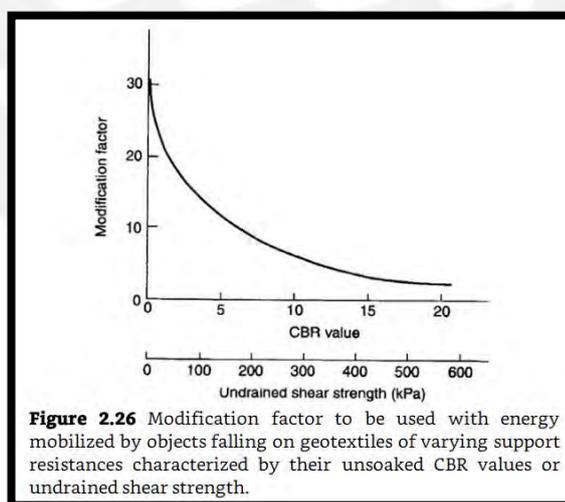


Figura 2.16: Factores de modificación recomendados para relacionados con propiedades mecánicas (Koerner, 2012).

Una vez calculada la energía requerida, se debe determinar la relación entre esta y la resistencia de impacto admisible para obtener el factor de seguridad correspondiente.

Es importante resaltar que la resistencia al impacto no será calculada para el diseño realizado en esta tesis.

2.3.3.2. Geotextil de filtración para envoltante de subdrenes

Al diseñar un geotextil para la función de filtración es fundamental verificar 3 aspectos para asegurar su correcto funcionamiento durante su vida útil.

Por un lado, la estructura debe estar lo suficientemente abierta para que pase el flujo de agua. Esto consiste en verificar la permeabilidad del material (criterio de permeabilidad/ permisividad). Por otro lado, es importante determinar el tamaño máximo de apertura de la estructura. Así, se puede asegurar que la estructura sea lo suficientemente cerrada para que no pasen los suelos finos (criterio de retención). Por último, es importante verificar que el geotextil no se colmate completamente a largo plazo (resistencia a la colmatación a largo plazo). Es decir, que debe asegurarse su compatibilidad a largo plazo (Koerner, 2012).

La determinación de estos criterios dependerá del impacto que generaría una falla del proyecto y de las condiciones a las que estaría expuesto. A continuación, la tabla 2.7 presenta los distintos criterios a considerar para determinar los parámetros iniciales de diseño.

Tabla 2.7: Guía para evaluar la naturaleza del Proyecto y las condiciones de exposición para la aplicación de drenaje (Carroll, 1983).

A. Critical Nature of the Project		
Item	Critical	Less Critical
1. Risk of loss of life and/or structural damage due to drain failure:	High	None
2. Repair costs versus installation costs of drain:	>>>	= or <
3. Evidence of drain clogging before potential catastrophic failure:	None	Yes
B. Severity of the Conditions		
Item	Severe	Less Severe
1. Soil to be drained:	Gap-graded, pipable, or dispersible	Well-graded or uniform
2. Hydraulic gradient:	High	Low
3. Flow conditions:	Dynamic, cyclic, or Pulsating	Steady state

Además, debe tenerse en cuenta que para esta aplicación también se emplean factores de reducción. En la tabla 2.8 se ha enmarcado en rojo aquellos correspondientes a

geotextiles para la función de filtración aplicado en subdrenes. Para el caso de estudio se emplearán los valores de esta tabla, pero es importante mencionar que algunos proveedores cuentan con sus propios factores de reducción (obtenidos de ensayos propios).

Tabla 2.8: Factores de reducción recomendados relacionados a propiedades hidráulicas en flujos estáticos (Koerner, 2012).

Application	Range of Reduction Factors				
	Soil Clogging and Blinding*	Creep Reduction of Voids	Intrusion into Voids	Chemical Clogging**	Biological Clogging***
Retaining wall filters	2.0 to 4.0	1.5 to 2.0	1.0 to 1.2	1.0 to 1.2	1.0 to 1.3
Underdrain filters	2.0 to 10	1.0 to 1.5	1.0 to 1.2	1.2 to 1.5	2.0 to 4.0***
Erosion control filters	2.0 to 10	1.0 to 1.5	1.0 to 1.2	1.0 to 1.2	2.0 to 4.0
Landfill filters	2.0 to 10	1.5 to 2.0	1.0 to 1.2	1.2 to 1.5	2.0 to 5.0***
Gravity drainage	2.0 to 4.0	2.0 to 3.0	1.0 to 1.2	1.2 to 1.5	1.2 to 1.5
Pressure drainage	2.0 to 3.0	2.0 to 3.0	1.0 to 1.2	1.1 to 1.3	1.1 to 1.3

*If stone rip-rap or concrete blocks cover the surface of the geotextile use either the upper values, or include an additional reduction factor.
 **Values can be higher particularly for high alkalinity groundwater.
 ***Values can be higher for extremely high microorganism content and/or growth of organisms and plant/vegetation roots.

Criterio de permeabilidad y permitividad

El criterio de permeabilidad del geotextil depende de la aplicación y las condiciones a las cuales estará sometido el material (Holtz et al., 2008). Para aplicación y condiciones menos severas se empleará el siguiente criterio:

$$k_{geotextil} \geq k_{suelo}$$

Para aplicación y condiciones severas deberá emplearse el siguiente criterio:

$$k_{geotextil} \geq 10 k_{suelo}$$

Por otro lado, el concepto de permitividad está relacionado a la cantidad de agua que el geotextil deja pasar a través de su plano. Para calcular la permitividad requerida es necesario estimar un caudal correspondiente al caso de estudio. Luego, mediante el uso de la ley de Darcy y la ecuación de permitividad se obtiene la siguiente relación (Koerner, 2012):

$$\Psi_{reqd} = \frac{q}{\Delta h A}$$

Donde:

- Ψ_{reqd} : Permitividad requerida (s-1)

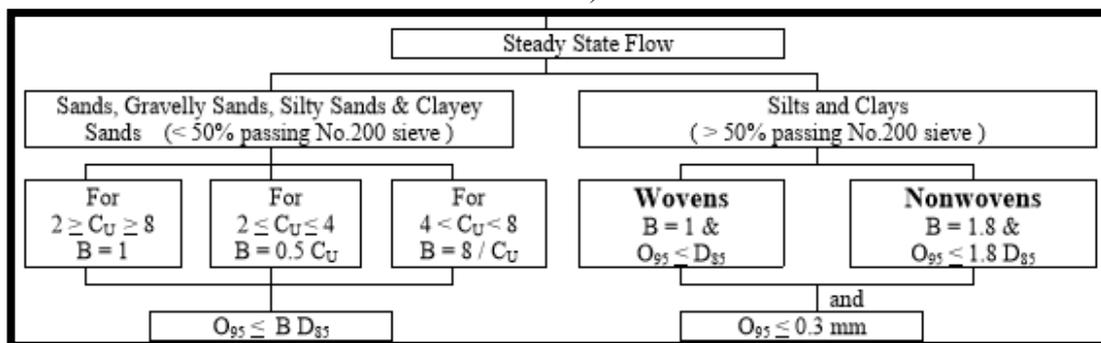
- q : Caudal (m³/s)
- Δh : Altura total de pérdida (m)
- A : Área total del geotextil en contacto (m²)

La permitividad última es determinada a través de ensayos en laboratorio y presentado por el fabricante. Los factores de reducción a emplear pueden ser los mencionados anteriormente para esta función o podrían emplearse aquellos especificados por el fabricante. Con estos valores se puede calcular el factor de seguridad correspondiente.

Criterio de retención de suelo

El criterio de retención busca determinar el tamaño de partícula que puede ser retenido por el geotextil. Para esto, se maneja un concepto llamado tamaño de abertura aparente (TAA) o AOS por su nombre en inglés. Este concepto se define como el tamaño de abertura para el cual 95% del suelo es menor (en milímetros). Este valor es equivalente al O₉₅ del suelo (Holtz et al, 2008). Se debe tener presente que los valores de TAA normalmente representan valores maxMARV. En cuanto al diseño se debe mencionar que existen relaciones propuestas por distintos autores para su cálculo. En la tabla 2.9 se presenta unas de las relaciones propuestas en la guía de diseño de la FHWA para el caso de flujo estático. Estas fueron utilizadas para el diseño por filtración del caso de estudio. Una vez obtenido este valor, se puede comparar con los valores presentados por los fabricantes. Si el valor es menor al calculado significa que cumple con este parámetro de diseño. Por el contrario, si el valor presentado por el fabricante es mayor al calculado se debería emplear otro geotextil con menor TAA.

Tabla 2.9: TAA máximo según condiciones de campo para flujo permanente (Holtz et al, 2008).



Criterio compatibilidad a largo plazo

Este mecanismo está orientado a verificar si el geotextil va a poder trabajar correctamente a lo largo de la vida útil del proyecto. Para esto, deben realizarse ensayos que muestren cuánto puede llegar a colmatarse el material. En la figura 2.17 se presenta el comportamiento a largo plazo de distintos tipos de geotextiles en contacto con suelo arcilloso.

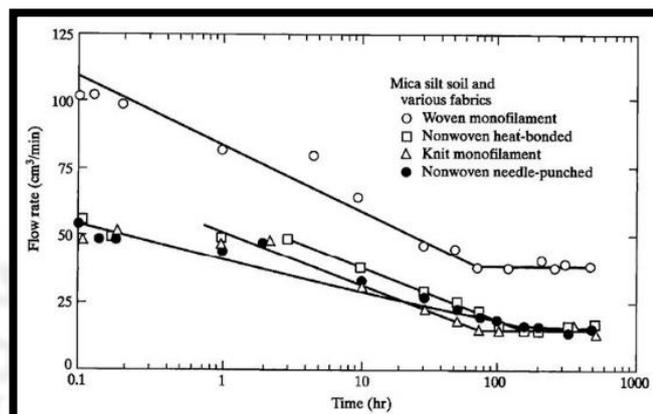


Figura 2.17: Ensayo a largo plazo de flujo en geotextiles en contacto con suelo (Koerner y Ko, 1982).

Para el diseño del caso de estudio, se emplearán los criterios de la FHWA para subdrenaje. En caso que la aplicación y condiciones sean denominadas “menos severas” deberá aplicarse el siguiente criterio en caso el coeficiente de uniformidad sea mayor a 3 ($C_u > 3$):

$$AOS_{(geotextil)} \geq 3D_{15}(suelo)$$

Si la aplicación y condiciones se mantienen como “menos severas” pero el C_u es menor o igual a 3 ($C_u \leq 3$) la selección del geotextil deberá basarse en el mayor AOS de la tabla 2.9. Por último, en caso la aplicación y las condiciones sean denominadas “severas” se sugiere realizar ensayos de filtración con suelo y condiciones hidráulicas de la zona de estudio.

2.3.3.3. Geomalla de refuerzo entre base y subrasante

El uso de geomalla como refuerzo de pavimentos tiene dos objetivos principales. El primero consiste en extender el tiempo de vida del pavimento. El segundo, busca

reducir el espesor de la base del pavimento sin reducir su desempeño respecto a un diseño preliminar sin geomalla (Zornberg y Gupta, 2010). Para entender el procedimiento de diseño es necesario introducir los términos TBR y BCR.

El TBR (Traffic Benefit Ratio), puede definirse como la relación en el número de ciclos para el cual un pavimento alcance un estado de falla determinado (ahuellamiento) respecto a un pavimento sin refuerzo. Este valor varía entre 1.5 a 70 para geomallas (Shukla, 2002). La figura 2.18 presenta este concepto gráficamente en la cual se muestra el ahuellamiento de un pavimento respecto al número de pasadas de ejes equivalentes sobre el mismo.

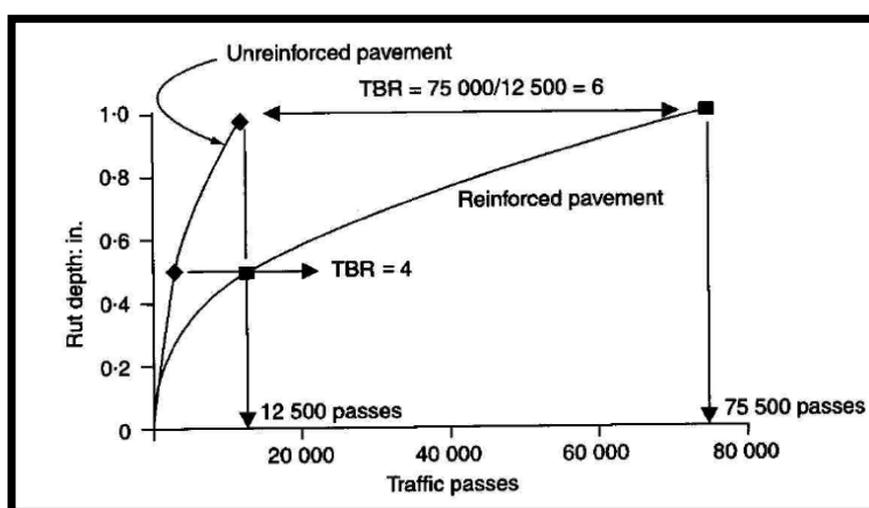


Figura 2.18: Valores típico de TBR para un pavimento reforzado y no reforzado para llegar a un ahuellamiento dado (Shukla, 2002).

El BCR (Benefit Course Ratio) puede definirse como la relación que existe entre el espesor de base del pavimento sin refuerzo respecto a un pavimento reforzado (Zornberg y Gupta, 2010). El procedimiento de diseño planteado en esta tesis se basa en el método AASHTO, versión 1993, el cual describe el procedimiento de diseño estructural de pavimentos flexibles convencionales en carreteras. Además, se emplea la metodología propuesta en la norma AASHTO 50-09 la cual incluye el uso de geomallas para el diseño estructural del pavimento. Esta es compatible con la norma AASHTO de 1993. A continuación, se presentó el procedimiento de diseño comentado para la optimización de pavimentos mediante la aplicación de una geomalla de refuerzo de base.

En primer lugar, se debe realizar un diseño del pavimento no reforzado. Para esto, se debe contar con las distintas secciones, coeficientes estructurales y de drenaje y espesores de diseño. Con estos valores, se debe calcular el número estructural del

pavimento no reforzado que soporte el nivel de cargas requeridas según el estudio de tráfico realizado previamente. La ecuación a emplear es la siguiente:

$$SN_{no\ reforzado} = a_1 * D_1 + a_2 * m_2 * D_2 + a_3 * m_3 * D_3$$

Luego, debe calcularse el W18 (ESAL'S) gráficamente o mediante el uso de la fórmula presentada a continuación:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{P_i - P_t}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Para este cálculo es necesario contar con los siguientes parámetros:

- El parámetro de confiabilidad (R)
- La desviación estándar global (So)
- El módulo de resiliencia efectivo (Mr) del material usado para la subrasante
- El índice de serviciabilidad inicial (Pi)
- El índice de serviciabilidad final (Pt)

Como el objetivo del diseño consiste, en este caso, en la reducción del espesor de la capa de agregados de base (D_{2R}), se deberá ajustar este espesor de manera que se obtenga el número estructural calculado para el caso no reforzado. Para esto, es necesario emplear los coeficientes estructurales, de drenaje y espesores de la estructura no reforzada. Por ejemplo, si se requiere determinar el nuevo espesor de base se debe emplear la siguiente ecuación:

$$D_{2R} = \frac{SN_{no\ reforzado} - a_1 * D_1 - a_3 * m_3 * D_3}{BCR * a_2 * m_2}$$

3. CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO: PROYECTO KISHUARA

Este capítulo tiene como objetivo presentar los distintos parámetros necesarios del proyecto en estudio para el diseño por separación de base y subrasante, filtración en subdrenos y refuerzo de base en un pavimento flexible. Este proyecto, consiste en el diseño de un tramo de la carretera Ayacucho-Abancay ubicado entre Andahuaylas (Km. 256+500) y el Desvío Kishuara (Km. 309+802.50).

3.1.Generalidades del proyecto

Esta carretera se encuentra ubicada en el departamento de Apurímac, Provincia de Andahuaylas, Distritos de San Jerónimo y Kishuara. Este tramo de la carretera tiene una longitud total de 53.20 Km. En la figura 3.1 se puede apreciar la ubicación de la carretera Ayacucho-Abancay y en un rectángulo rojo el tramo en estudio mencionado.



Figura 3.1: Mapa de ubicación del tramo de la carretera en estudio.

Las características técnicas generales del tramo en estudio de la carretera son las siguientes:

Las bermas empleadas son de 0.50 metros a ambos lados de la carretera. Además, cuenta con cunetas triangulares de 0.75x0.50 metros en zona rurales y rectangulares de 0.40x0.40 metros en zonas urbanas. El ancho de la superficie de rodadura es de 6

metros teniendo 2 carriles (uno en cada sentido). Por ende, el ancho de cada carril es de 3 metros. La velocidad directriz empleada para el diseño fue de 40 km/h y el radio mínimo es de 25 metros. En cuanto a la pendiente de la carretera, osciló entre 0.50% y 7.00% y excepcionalmente llegó hasta 9.00%.

3.2. Estudio de mecánica de suelos

De acuerdo a los perfiles estratigráficos de los suelos y del punto de vista de la capacidad de soporte del suelo (CBR), la empresa a cargo dividió la vía en seis sectores los cuales se indican en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Sectorización de la carretera Andahuaylas - Desvío Kishuara.

SECTOR	UBICACIÓN		LONGITUD Km
	INICIO	TÉRMINO	
I	Km. 256+500	Km. 261+500	5.00
II	Km. 261+500	Km. 268+500	7.00
III	Km. 268+500	Km. 277+500	9.00
IV	Km. 277+500	Km. 295+500	18.00
V	Km. 295+500	Km. 303+500	8.00
VI	Km. 303+500	Km. 310+750	7.25

El análisis de estos sectores fue descrito por la empresa a cargo. A continuación, se presenta las características del suelo de cada uno de los sectores para distintas profundidades.

Sector I: Km. 256+500 – Km. 261+500

Para una profundidad comprendida entre 0.00 y 0.20 metros, los suelos observados fueron principalmente suelos granulares transportados de canteras de talud existentes en la vía. Estas gravas presentaron una gradación pobre, de mediana a baja plasticidad, con contenido de humedad bajo, bien compacta. Además, presentaron suelos arenosos de baja plasticidad y de buena densificación. Estos suelos representaron el 95.2 % del tramo. Por otro lado, en el mismo sector, existieron tramos con finos de mediana plasticidad, representando el 4.8 % de la longitud de la vía. En general, estos suelos no

cumplieron con los requisitos mínimos para ser utilizados como una subbase granular y/o base granular. Esto se debió a que las canteras utilizadas no cumplieron con la abrasión mínima solicitada. Además, presentaron contenidos de finos mayores a lo indicado en el huso granulométrico a utilizar para altura mayores de 3000 msnm.

Para una profundidad entre 0.20 y 0.70 metros los suelos predominantes fueron limos arcillosos, con una densificación media a baja. Su contenido de humedad varió entre 2 % a 27.5 %, el límite líquido entre 19 % a 50 % y su índice de plasticidad entre 1 % a 30 %. El CBR promedio en este sector fue del orden de 5.6 %, siendo el CBR mínimo de 3.0 y el CBR máximo de 7.5 %. Del análisis de los resultados se llegó a la conclusión que los suelos finos representaron el 66.7 % y los suelos granulares el 33 %.

Para una profundidad entre 0.70 a 1.50 metros los suelos predominantes fueron limos arcillosos de baja plasticidad, con una densificación media a baja. Del análisis de los resultados, se llegó a la conclusión que los suelos predominantes fueron suelos finos que representaron el 60.0 % y suelos granulares en un 40.0 %.

Sector II: Km. 261+500 – Km. 268+500

Para una profundidad comprendida entre 0.00 a 0.20 metros, los suelos predominantes fueron arcillas de mediana y alta plasticidad, así como limos de mediana plasticidad. El grado de compactación de los suelos fue de mediana a alta densidad, con contenido de humedad baja a media. Estos suelos representaron el 55.2 % de la longitud de la vía y el 44.8% restante estuvo constituido por arenas limosas de baja a media plasticidad.

Entre 0.20 a 0.70 metros los suelos predominantes fueron limos de media a alta plasticidad, así como de arcillas de mediana a alta plasticidad. Su contenido de humedad osciló entre 5.4 % a 53.9 %, su límite líquido entre 19 % a 66 % y su índice de plasticidad varió entre 1 % a 38 %. El grado de compactación en el sector varió entre medio a denso. Además, el CBR promedio en este sector fue del orden de 3.4 %, con un CBR mínimo de 2.6 y un CBR máximo de 4.5 % siendo un sector de pobre capacidad portante. De los resultados obtenidos se llegó a la conclusión que los suelos predominantes fueron suelos finos en un 75.9 % y suelos granulares en un 24.1 %.

Para una profundidad entre 0.70 a 1.50 metros los suelos predominantes fueron limos arcillosos de media a alta plasticidad, con una densidad media a baja. De los resultados obtenidos, se pudo concluir que los suelos predominantes fueron suelos finos representando el 79.0 % y suelos granulares en un 21.0 %.

Sector III: Km. 268+500 – Km. 277+500

Para una profundidad entre 0.00 a 0.20 metros los suelos presentes fueron principalmente arenas limosas de baja a media plasticidad, así como gravas limosas y arcillosas de baja a media plasticidad. Su contenido de humedad fue bajo y su grado de compactación se pudo clasificar como medianamente compacta. Del análisis de los resultados, se pudo concluir que los suelos predominantes para esta profundidad fueron suelos granulares en un 94.6 % y suelos finos en un 5.4 %.

Para una profundidad entre 0.20 a 0.70 m los suelos predominantes fueron limos de media a alta plasticidad, así como arcillas de media a alta plasticidad. El contenido de humedad de estos suelos se encontró entre de 3.6 % a 48.5 %. Su límite líquido varió entre 18 % a 50 % y su índice de plasticidad entre 1 % a 24 %. El CBR promedio en este sector fue del orden de 10.1 %, con un CBR mínimo de 7.2 y un CBR máximo de 12.6 % caracterizándolo como un sector de regular capacidad portante. Del análisis de los resultados, se pudo concluir que los suelos predominantes fueron suelos finos representando el 59.5 % y suelos gruesos en un 40.5 %.

Para una profundidad entre 0.70 a 1.50 metros los suelos predominantes fueron limos arcillosos de media a alta plasticidad, con una densificación media a baja. Estos suelos finos representaron el 68.0 % y el 32.0 % estuvo constituido por suelos granulares.

Sector IV: Km. 277+500 – Km. 295+500

Para profundidades entre 0.00 a 0.20 metros los suelos predominantes fueron gravas y arenas limosas de baja a media plasticidad, con densidad media y con bajo contenido de humedad.

Para una profundidad entre 0.20 a 0.70 metros los suelos predominantes fueron suelos finos, siendo arcillas de mediana a alta plasticidad, con presencia de suelos muy blandos y medianamente densos. Su contenido de humedad varió entre 3.6 % a 48.5 %, su límite líquido entre 18 % a 50 % e índice de plasticidad entre 1 % a 24 %. El CBR promedio fue del orden de 3.8 %, con un CBR mínimo de 3.0 y un CBR máximo de 5.7 %, siendo un sector de pobre capacidad portante. Del análisis de los resultados, se pudo concluir que los suelos predominantes fueron suelos finos en un 63.0 % y suelos gruesos en un 37.0 %.

Para una profundidad entre 0.70 a 1.50 metros los suelos predominantes fueron limos arcillosos de media a alta plasticidad, con una densificación media a baja. Estos suelos finos representaron el 67.0 % del material y el 33.0% restantes estuvo constituido principalmente por suelos granulares.

Sector V: Km. 295+500 – Km. 303+500

Para una profundidad entre 0.00 a 0.20 metros los suelos hallados fueron principalmente arenas limosas con gravas limosas de media a baja plasticidad, con densidades in-situ media y contenido de humedad bajos. Llegando a la conclusión que los suelos predominantes fueron suelos granulares en un 66.7% y suelos finos en un 33.3 %.

Para una profundidad entre 0.20 a 0.70 metros los suelos predominantes fueron arenas limosas y gravas limosas de baja y mediana plasticidad, con presencia de suelos duros y medianamente densos. Estos presentaron un contenido de humedad entre 5.0 % a 41.1 %, límite líquido de 18 % a 50.8 % e índice de plasticidad de 2 % a 12 %. El CBR promedio en este sector fue del orden de 10.2 %, teniendo un CBR mínimo de 6.6 y un CBR máximo de 13.9 %, siendo este un sector de regular capacidad portante. Del análisis de los resultados, se llegó a la conclusión que los suelos predominantes fueron suelos finos en un 60.6 % y suelos gruesos en un 39.4 %.

Para una profundidad entre 0.70 a 1.50 metros los suelos encontrado fueron principalmente arenas limosas y gravas limosas, así como limos de mediana a alta

plasticidad, medianamente densos. Los suelos predominantes fueron suelos finos en un 50.0 % y el otro 50.0 % estuvo constituido por suelos granulares.

Sector VI: Km. 303+500 – Km. 310+750

Para una profundidad comprendida entre 0.00 y 0.20 metros los materiales encontrados fueron gravas limosas de baja plasticidad, con contenidos de humedad bajos y medianamente densos. Además, se encontraron limos de baja plasticidad. Del análisis realizado por la empresa correspondiente, se obtuvo que los suelos predominantes fueron suelos granulares en un 60.0 % y suelos finos en un 40.0 %.

Para una profundidad entre 0.20 a 0.70 metros los suelos predominantes fueron suelos finos, siendo limos de baja plasticidad y arcillas de mediana a alta plasticidad, medianamente densos. Su contenido de humedad osciló entre 2.0 % a 35.0 %, su límite líquido entre 22 % a 45.0 % y su índice de plasticidad entre 1 % a 16 %. El CBR promedio en este sector fue de 13.4 %, contando con un CBR mínimo de 4.3 y un CBR máximo de 18.3 %, siendo un sector de buena capacidad portante. Del análisis de los resultados realizados, por la empresa se concluyó que los suelos predominantes fueron suelos finos en un 56.7 % y suelos gruesos en un 43.3 %.

Para una profundidad entre 0.70 a 1.50 metros se presentaron arenas limosas y gravas limosas, así como limos de mediana a alta plasticidad, medianamente densos. Del análisis de los resultados realizado por la empresa, los suelos predominantes fueron suelos finos en un 53.0 % y suelos granulares en un 47.0 %.

A partir de estos estudios, se determinaron las curvas granulométricas más representativas para cada sector. Estas curvas, serán necesarias para el diseño por función, principalmente para el de filtración. La tabla 3.2 a continuación presenta el análisis granulométrico comentado para los seis sectores.

Tabla 3.2: Análisis granulométrico de los seis sectores de la carretera en estudio.

mallas		Porcentaje que pasa					
Malla	Abertura (mm)	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6
3"	75	-	-	-	-	-	-
2 1/2"	62.5	-	-	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-	-	100
1 1/2"	37.5	-	-	-	-	-	98
1"	25	-	-	-	-	-	94
3/4"	19	-	-	100	-	100	93
1/2"	12.5	-	100	99	100	93	88
3/8"	9.5	-	99	99	99	90	85
1/4"	6.25	100	97	98	99	83	79
N4	4.75	99	96	97	99	82	77
N6	3.35	99	95	95	98	80	75
N8	2.36	98	94	93	98	78	73
N10	2	97	93	92	98	76	72
N16	1.18	93	91	87	96	72	69
N20	0.85	90	89	83	94	69	68
N30	0.6	86	86	78	91	65	67
N40	0.425	82	82	73	87	61	66
N50	0.3	78	78	67	80	57	64
N80	0.177	72	76	61	70	49	62
N100	0.15	69	76	60	68	46	61
N200	0.075	60	76	59	63	35	56

Cálculo de CBR y módulo de resiliencia (Mr):

La capacidad de soporte de la subrasante está representada por los valores de CBR determinados mediante ensayos de laboratorio realizados con muestras de suelos obtenidas en el campo. El método de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), versión 1993 requiere el uso del módulo de resiliencia (Mr). Las fórmulas empleadas para relacionar los CBR y Mr de los distintos sectores fueron las siguientes:

Cuando $CBR < 7.2\%$:

$$M_R = 1500 * CBR \text{ (PSI)}$$

Cuando $7.2\% < CBR < 20\%$:

$$M_R = 3000 * CBR^{0.65} \text{ (PSI)}$$

Cuando CBR >20%:

$$M_R = 4326 * \ln CBR + 241 \text{ (PSI)}$$

La tabla 3.3 presenta el CBR correspondiente a las distintas progresivas de cada sector. Se puede observar que se calculó un valor de CBR promedio para cada uno de los 6 sectores. Además, se identificaron las zonas con CBR bajos (aquellas con fondo amarillo) para las cuales se realizó un mejoramiento de subrasante con geomalla. De esta forma el CBR promedio aumentó y a partir de este valor calculado se determinó el valor del módulo de resiliencia para cada tramo. El diseño relacionado al mejoramiento de subrasante no forma parte del alcance de la tesis.

Tabla 3.3: CBR sin mejoramiento de subrasante, con mejoramiento y cálculo de Mr para cada tramo.

N°	Progresiva	Clasificación		CBR (0.1")		CBR (0.1")		Mr Psi
		SUCS	AASTHO	Sin mejoramiento de Sub-rasante		Con mejoramiento de Sub-rasante		
				al 95 % MDS	Promedio	al 95 % MDS	Promedio	
4	257+250	SM-SC	A-4 (0)	7.5		7.5		
11	259+000	CH	A-7-6-(23)	3.0				
19	261+000	ML	A-4 (8)	6.3	5.6	6.3	6.9	10,350.00
25	262+500	CL	A-6 (11)	3.5				
33	264+500	MH	A-7-5 (19)	3.0				
40	266+250	CL	A-6 (5)	4.5				
46	267+750	MH	A-7-5 (33)	2.6	3.4		11.1	14,341.06
54	269+750	SM	A-2-4 (0)	12.6		12.6		
64	272+250	CL	A-6 (9)	10.4		10.4		
70	273+750	ML	A-4 (0)	7.2		7.2		
82	276+750	SM	A-4 (0)	10.2	10.1	10.2	10.1	13,487.46
89	278+500	MH	A-7-5 (18)	3.0				
97	280+500	ML	A-7-5 (17)	3.2				
106	282+750	ML	A-4 (9)	4.1				
113	284+500	ML	A-5 (0)	4.5				
121	286+500	ML	A-4 (0)	5.7				
129	288+500	SM	A-5 (0)	4.0				
137	290+500	MH	A-5 (0)	3.1				
145	292+500	MH	A-5 (7)	3.7				
153	294+500	MH	A-5 (0)	3.3	3.8		12.8	15,752.86
161	296+500	SM	A-2-4 (0)	11.6		11.6		
169	298+500	ML	A-4 (0)	8.8		8.8		
177	300+500	SM	A-4 (0)	13.9		13.9		
185	302+500	ML	A-4 (0)	6.6	10.2	6.6	10.2	13,574.11
193	304+500	GM	A-2-5 (0)	17.7		17.7		
201	306+500	ML	A-4 (6)	4.3				
209	308+500	GC	A-4 (0)	18.3		18.3		
218	310+750	GC	A-2-6 (0)		13.4		18.0	19,635.79
219								

Nota

 Zonas de mejoramiento

El reemplazo de material en las zonas de mejoramiento, será con materiales de canteras de talud que tengan los CBRs mínimos indicados en los diseños.

3.3. Parámetros de diseño

Confiabilidad (R%)

La confiabilidad es la probabilidad de que una sección del pavimento, se comporte satisfactoriamente durante el periodo de diseño bajo las condiciones de tráfico determinadas. Según la tabla 3.4 los valores para este caso en particular corresponden

a una vía interestatal rural cuya confiabilidad varía entre 80 y 99.9, el valor adoptado fue $R=90\%$.

Tabla 3.4: Estimación del nivel de confiabilidad según la clasificación de la carretera (AASHTO, 1993).

Confiabilidad		
Clasificación funcional	Nivel de confiabilidad	
	Urbana	Rural
Autopista	85 - 99.9	80 - 99.9
Arteria primaria	80 - 99	75 - 95
Secundaria o colectora	80 - 95	75 - 95
Local o vecinal	50 - 80	50 - 80

Desviación Standard Normal

Para el nivel de confiabilidad adoptado, la desviación standard normal corresponde al valor de $Z_r = -1.282$ para la confiabilidad de 90% de acuerdo a la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Valores de desviación standard normal según el nivel de confiabilidad (AASHTO, 1993).

Reliability R (percent)	Standard Normal Deviate, ZR
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Desviación Standard Total

El valor de Desviación Standard Total varía entre 0.40 y 0.50 para pavimento flexible. Se adoptó el valor promedio de $S_o = 0.45$.

Serviciabilidad

La serviciabilidad de un pavimento se define como la capacidad de servir al tipo de tráfico que requiera la vía (ligero y pesado). Este se mide mediante el índice de

serviciabilidad presente (PSI) que varía entre 0 (carretera intransitable) y 5 (carretera en perfectas condiciones). Dadas las características del proyecto y su importancia, se adoptó como índice de serviciabilidad inicial $po=4.2$ y como índice de serviciabilidad final $pt=2.0$. La pérdida de índice de serviciabilidad en este caso fue $\Delta p = 2.2$.

Tráfico de Diseño

De acuerdo al estudio de tráfico realizado para el tramo Andahuaylas – Dv. Kishuara, la tabla 3.6 presenta el número total de ejes equivalentes a 18 kips del carril más cargado de la carretera:

Tabla 3.6: Valores de ejes estándar de ejes equivalentes.

SECTOR	PROGRESIVA		PERIODO DE DISEÑO		
	INICIO	TÉRMINO	10 AÑOS	10-20 AÑOS	20 AÑOS
I	256+500	261+500	1.91E+06	2.51E+06	4.42E+06
II	261+500	268+500	1.91E+06	2.51E+06	4.42E+06
III	268+500	277+500	1.34E+06	1.75E+06	3.09E+06
IV	277+500	295+500	1.34E+06	1.75E+06	3.09E+06
V	295+500	303+500	1.34E+06	1.75E+06	3.09E+06
VI	303+500	309+840	1.34E+06	1.75E+06	3.09E+06

Si bien se ha efectuado un estudio de tráfico de hasta 20 años, el diseño final adoptado se realizó para un periodo de diseño de 10 años.

Factores Hidro-meteorológicos

La vía se encuentra en la cordillera de los andes, desde los 2 968 msnm (San Jerónimo- Km 256+500), subiendo hasta llegar a los 4 147 msnm (Km 291+240), para luego bajar hasta los 3 753 msnm (Kishuara- Km 309+840). El clima donde se desarrolló la vía es templado, moderadamente lluvioso y con amplitud térmica moderada. La media anual de temperatura máxima y mínima es de 20.0 °C y 6.3 °C, respectivamente, siendo los meses de mayo a agosto los más fríos del año (de 18h a 6h del día siguiente). La precipitación media anual es mayor de 608.9 mm, siendo en los meses de octubre a abril los de mayores intensidades. Por haberse considerado materiales granulares limpios para la capa de base y subbase los factores de drenaje empleados fueron igual a $m=1.0$ para la capa de base y $m=1.0$ para la capa de subbase. El material granular deberá cumplir con las especificaciones técnicas generales EG2000.

Presión de contacto de las llantas

La presión de contacto de las ruedas es de 5.60 Kg/cm². Este valor servirá principalmente para diseño por separación.

Calidad de los Materiales a Emplearse

Para el diseño del pavimento, se consideró el uso de los siguientes materiales:

- Concreto asfáltico convencional, con un coeficiente estructural (a_1) igual a 0.44/pulgada.
- Concreto asfáltico modificado con polímeros SBS, con un coeficiente estructural igual a 1.30 de a_1 , por lo que se empleó para el diseño un coeficiente estructural de 0.57/pulgada, El uso de este tipo de asfalto fue empleado con el objetivo de reducir el espesor de la carpeta asfáltica.

$$H_{\text{carpeta con polímeros SBS}} = \frac{H_{\text{carpeta convencional}}}{1.30}$$

- Base granular, con un coeficiente estructural igual a 0.14/pulgada, un coeficiente de drenaje de 1.0 y un Módulo Resiliente igual a 30 ksi.
- Subbase granular, con un coeficiente estructural igual a 0.11/pulgada, un coeficiente de drenaje de 1.0 y un Módulo Resiliente de 15 ksi.

3.4. Estructura final adoptada

Para la presente vía, el diseño del pavimento adoptado se realizó de acuerdo a la metodología AASTHO-1993. Además, se efectuó un mejoramiento de subrasante en las zonas con CBR menores a 6%. Para la carpeta asfáltica, se empleó una mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS al igual que para la berma. El diseño de pavimentos contempló 6 secciones y se diseñó para un tiempo de vida de 10 años. El proceso de colocación se efectuó en los sectores siguiendo las siguientes actividades:

Sector 1 (Km 256+500 al Km 261+500)

- Mejoramiento de la subrasante en los sectores en donde los CBR de la subrasante sean menores a los CBR de diseño, en suelos expansivos, suelos sobresaturados,

en suelos blandos y en suelos medianamente densos; esto se realizará con la colocación de material granular de cantera, en espesores de 50 a 80 cm.

- Escarificado, perfilado y compactación de subrasante.
- Colocación de subbase granular de 20 cm (8 pulg) de espesor.
- Colocación de base granular de 20 cm (8 pulg) de espesor.
- Imprimación asfáltica.
- Colocación de carpeta asfáltica modificada con polímeros SBS de 6.0 cm (2.4 pulg) de espesor.

Sector 2 (Km 261+500 al Km 268+500)

- Mejoramiento de la subrasante en los sectores en donde los CBR de la subrasante sean menores a los CBR de diseño, en suelos expansivos, suelos sobresaturados, en suelos blandos y en suelos medianamente densos; esto se realizará con la colocación de material granular de cantera, en espesores de 50 a 80 cm.
- Escarificado, perfilado y compactación de sub-rasante.
- Colocación de subbase granular de 17.5 cm (7 pulg) de espesor.
- Colocación de base granular de 15 cm (6 pulg) de espesor.
- Imprimación asfáltica.
- Colocación de carpeta asfáltica modificada con polímeros SBS de 6.0 cm (2.4 pulg) de espesor.

Sectores 3, 4 y 5 (Km 268+500 al Km 303+500)

- Mejoramiento de la subrasante en los sectores en donde los CBR de la subrasante sean menores a los CBR de diseño, en suelos expansivos, suelos sobresaturados, en suelos blandos y en suelos medianamente densos; esto se realizará con la colocación de material granular de cantera, en espesores de 50 a 80 cm.
- Escarificado, perfilado y compactación de subrasante.
- Colocación de subbase granular de 15 cm (6 pulg) de espesor.

- Colocación de base granular de 15 cm (6 pulg) de espesor.
- Imprimación asfáltica.
- Colocación de carpeta asfáltica modificada con polímeros SBS de 6 cm (2.4 pulg) de espesor.

Sector 6 (Km 303+500 al Km 309+840)

- Mejoramiento de la subrasante en los sectores en donde los CBR de la subrasante sean menores a los CBR de diseño, en suelos expansivos, suelos sobre-saturados, en suelos blandos y en suelos medianamente densos; esto se realizará con la colocación de material granular de cantera, en espesores de 50 a 80 cm.
- Escarificado, perfilado y compactación de sub-rasante.
- Colocación de subbase granular de 15 cm (6 pulg) de espesor.
- Colocación de base granular de 15 cm (6 pulg) de espesor.

La tabla 3.7 presenta el diseño estructural del pavimento flexible adoptado para los sectores mencionados anteriormente.

Tabla 3.7: Diseño estructural adoptado para un tiempo de vida de diseño de 10 años.

Sector I: KM256+500-KM261+500				Sector IV: KM277+500-KM295+500			
ai	Di(pulg)	mi	SNi	ai	Di(pulg)	mi	SNi
0.57	2.40	-	1.37	0.57	2.40	-	1.37
0.14	8.00	1.00	1.12	0.14	6.00	1.00	0.84
0.11	8.00	1.00	0.88	0.11	7.00	1.00	0.66
			SN				SN
			3.37				2.87
Sector II: KM261+500-KM268+500				Sector V: KM295+500-KM303+500			
ai	Di(pulg)	mi	SNi	ai	Di(pulg)	mi	SNi
0.57	2.40	-	1.37	0.57	2.40	-	1.37
0.14	6.00	1.00	0.84	0.14	6.00	1.00	0.84
0.11	6.00	1.00	0.77	0.11	7.00	1.00	0.66
			SN				SN
			2.98				2.87
Sector III: KM268+500-KM277+500				Sector VI: KM303+500-KM308+840			
ai	Di(pulg)	mi	SNi	ai	Di(pulg)	mi	SNi
0.57	2.40	-	1.37	0.57	2.00	-	1.14
0.14	6.00	1.00	0.84	0.14	6.00	1.00	0.84
0.11	7.00	1.00	0.66	0.11	7.00	1.00	0.66
			SN				SN
			2.87				2.64

4. CAPÍTULO IV: DISEÑO CON GEOSINTÉTICOS APLICADO PARA CASO DE ESTUDIO

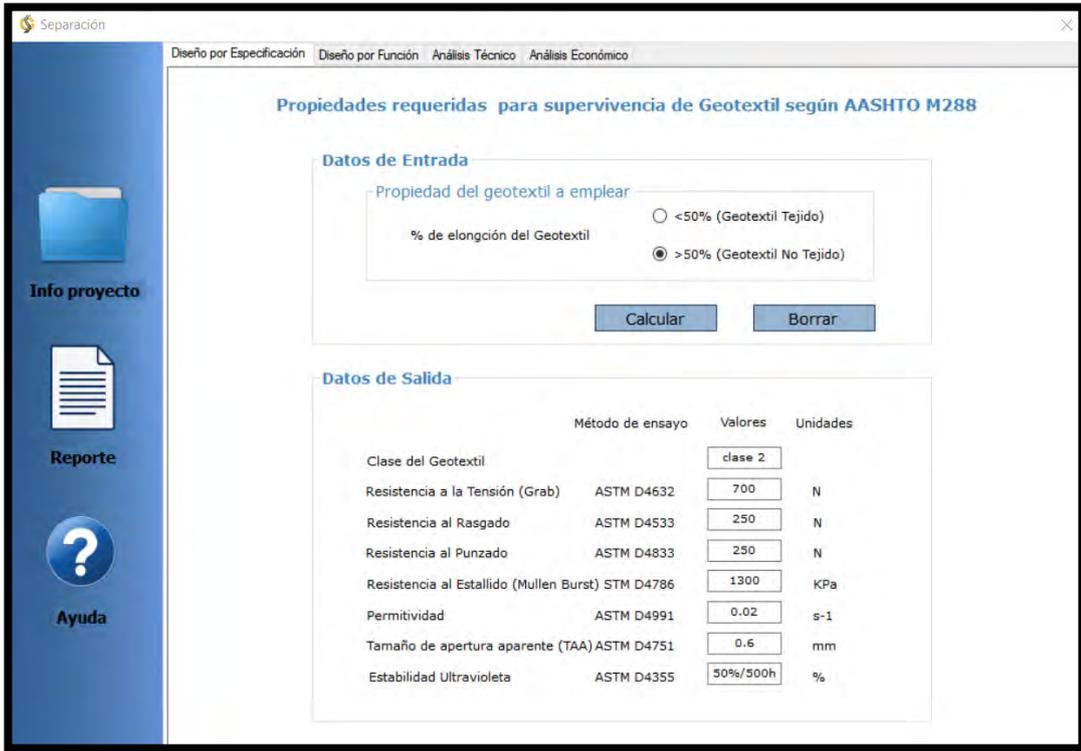
Este capítulo tiene como objetivo desarrollar el diseño correspondiente para el caso de estudio presentado. Primero, se realizó el diseño con geotextil para la función de separación entre la base y la subrasante. Luego, se presentó el diseño correspondiente a un geotextil empleado para la función de filtración aplicado como envolvente de un sistema de subdrenaje longitudinal. Por último, se realizó un diseño relacionado a la optimización de espesores del pavimento mediante el uso de una geomalla triaxial (TX160). Para los tres casos se llevó a cabo un análisis técnico y económico para evaluar la viabilidad del uso de geosintéticos para estas aplicaciones. El alcance del análisis económico sólo incluyó el costo de los materiales mas no de la mano de obra requerida, transporte, entre otros.

4.1. Diseño con geotextil para la función de separación

Para el caso de estudio, se realizó un diseño con un geotextil de separación entre la subrasante y el material granular adyacente. Los criterios de diseño fueron tomados de la norma AASHTO M288-96 y del libro “Designing with Geosynthetics” del Dr. Koerner. A continuación, se efectuó el diseño por especificación y por función para un geotextil de separación. Luego, se emplearon los datos obtenidos para efectuar el análisis técnico y económico del uso del geotextil para esta aplicación.

4.1.1. Diseño por especificación

El diseño por especificación consistió en emplear la norma AASHTO M288-96 para la función de separación. Es importante tener en cuenta que esta norma tiene como objetivo asegurar la supervivencia del geotextil de forma que mantenga sus propiedades luego de su instalación. Para geotextiles no tejidos los requerimientos son aquellos que se muestra en la figura 4.1.



	Método de ensayo	Valores	Unidades
Clase del Geotextil		clase 2	
Resistencia a la Tensión (Grab)	ASTM D4632	700	N
Resistencia al Rasgado	ASTM D4533	250	N
Resistencia al Punzado	ASTM D4833	250	N
Resistencia al Estallido (Mullen Burst)	STM D4786	1300	KPa
Permitividad	ASTM D4991	0.02	s-1
Tamaño de apertura aparente (TAA)	ASTM D4751	0.6	mm
Estabilidad Ultravioleta	ASTM D4355	50%/500h	%

Figura 4.1: Especificaciones para asegurar supervivencia de geotextil no tejido como separador de capas según AASHTO 288-96 desarrollado en Visual Studio.

4.1.2. Diseño por función

En cuanto a la función de separación, esta metodología de diseño consistió en determinar ciertas propiedades mínimas que debe poseer un geotextil comercial para su correcto funcionamiento. Entre ellas se encuentran la resistencia a la tensión, al estallido y al punzonamiento. Los parámetros empleados para el diseño por separación para el caso de estudio fueron los siguientes:

- Presión de inflado: Según el informe del proyecto la presión de contacto de las ruedas empleada fue de 5.60 kg/cm² lo cual es equivalente a 550 KPa o a 80 psi.
- Diámetro máximo del agregado: 25mm.
- Forma y tamaño de objeto punzante: Subredondeada/Relativamente pequeña.

Los factores usados para la resistencia al punzonamiento se obtuvieron de la tabla 2.6:

- S1(Factor de protusión): 0.4
- S2(Factor de escala): 0.4
- S3(Factor de forma): 0.5

Los factores de reducción adoptados para el diseño se obtuvieron de la tabla 2.5:

- Factor de reducción por daños de instalación: 2.5
- Factor de reducción por flujo plástico: 2.5
- Factor de reducción por degradación química y biológica: 1.5

Los factores de seguridad empleados fueron:

- FS tensión: 2
- FS estallido: 2
- FS punzonado: 2

Los cálculos realizados para el diseño por función fueron los siguientes:

Resistencia a la tensión (Grab):

$$d_v = 0.33d_a = 0.33 * 25 = 8.25 \text{ mm}$$

$$T_{req} = p'(d_v)^2[f(\epsilon)] = (80 * 6.89476) * (8.25/1000)^2 * 0.525 * 1000 = 19.71 \text{ N}$$

$$T_{perm} = T_{req} * FS = 19.71 * 2 = 39.42 \text{ N}$$

$$T_{ult} = T_{perm} * \Pi FR = 39.42 * (2.5 * 2.5 * 1.5) = 369.55 \text{ N}$$

Resistencia al reventado o estallido (Mullen burst)

$$d_v = 0.33d_a = 0.33 * 25 = 8.25 \text{ mm}$$

$$T_{req} = \frac{1}{2} p' d_v [f(\epsilon)] = \frac{1}{2} * (80 * 6.89476) * (8.25/1000) * 0.525 * 1000 = 1194.52 \text{ N/m}$$

$$T_{ult} = T_{perm} * \Pi FR = 2389.03 * (2.5 * 2.5 * 1.5) = 22397.2 \text{ N/m}$$

$$T_{perm} = T_{req} * FS = 1194.52 * 2 = 2389.03 \text{ N/m}$$

$$P_{test} = \frac{2 * T_{ult}}{d_{test} * [f(\epsilon)]} = \frac{2 * 22397.2}{0.03 * 0.525 * 1000} = 2844.09 \text{ Kpa}$$

Resistencia al punzonamiento

$$F_{req} = p'(d_a)^2 S_1 S_2 S_3 = (80 * 6.89476) * (25/1000)^2 * 0.4 * 0.4 * 0.5 * 1000 = 27.58 \text{ N}$$

$$F_{perm} = F_{req} * FS = 27.58 * 2 = 55.16 \text{ N}$$

$$F_{ult} = F_{perm} * IFR = 55.16 * (2.5 * 2.5 * 1.5) = 517.11 \text{ N}$$

La figura 4.2 presenta el formato realizado para el diseño por función del geotextil separador. Se puede observar las tres propiedades mecánicas que debe presentar el material con un esquema correspondiente a cada uno de los ensayos.

The screenshot shows the 'Separación' software interface with the following data:

Datos de Entrada		Factores de Reducción		Factores de Seguridad	
Presión de Inflado (p')	80 psi	Daños de Instalación	2.5	FS Tensión	2
Diámetro prom. de agregado (da)	25 mm	Flujo Plástico (Creep)	2.5	FS Estallido	2
Función de deformación del geotextil F(ε)	0.525	Degradación Química/Biológica	1.5	FS Punzado	2
Forma y Tamaño de Objeto Punzante	Subredondeada/Relativamente pequeña				

Datos de Salida		Fórmula empleada		Esquema: Geotextil sometido a tensión en campo y en laboratorio	
Tensión Requerida (Treq)	19.71 N	$T_{reqd} = p'(d_v)^2[f(\epsilon)]$		Problema en campo	Ensayo en laboratorio
Tensión Permisidad (Tperm)	39.42 N				
Tensión Última (Tult)	369.55 N				
Resistencia al Estallido (Mullen Burst)		Fórmula empleada		Esquema: Geotextil sometido a estallido en campo y en laboratorio	
Resistencia Requerida (Treq)	1194.52 N/m	$T_{reqd} = \frac{1}{2} p' d_v [f(\epsilon)]$		Problema en campo	Ensayo en laboratorio
Resistencia Permisidad (Tperm)	2389.03 N/m				
Resistencia Última (Tult)	22397.2 N/m				
Presión del ensayo al reventado	2844.09 Kpa				
Resistencia al Punzonado		Fórmula empleada		Esquema: Geotextil sometido a punzonado en campo y en laboratorio	
Fuerza Requerida (Treq)	27.58 N	$F_{reqd} = p'(d_a)^2 S_1 S_2 S_3$		Problema en campo	Ensayo en laboratorio
Fuerza Permisidad (Tperm)	55.16 N				
Fuerza Última (Tult)	517.11 N				

Figura 4.2: Diseño de geotextil de separación desarrollado en Visual Studio.

Vale mencionar que el material granular a emplear a lo largo de carretera tendría el mismo tamaño máximo de piedra, por lo tanto, el diseño del geotextil de separación realizado puede ser aplicado para todo el tramo de estudio.

4.1.3. Análisis técnico

El análisis técnico realizado consistió en comparar de forma porcentual la disminución del número total de ejes equivalentes W18 de pavimento flexible. Para esto, se disminuyó el espesor de la capa granular en contacto con la subrasante simulando un pavimento sin geotextil de separación con un espesor contaminado en el tiempo. Este análisis se basó en el supuesto que el espesor contaminado con material fino de la subrasante no aportaría en el número estructural del pavimento. Los parámetros necesarios para este análisis son los siguientes:

- Parámetros de diseño de la carretera:
 - Nivel de confiabilidad (R): 90%
 - Desviación estándar normal (Zr): -1.282
 - Desviación estándar global (So): 0.45
 - Índices de serviciabilidad inicial: 4.2
 - Índices de serviciabilidad final: 2

Cálculo del número estructural (SN) y W18 del pavimento con geotextil

$$SN1 = a1 * D1 = 0.57 * 2.4 = 1.37$$

$$SN2 = a2 * m2 * D1 = 0.14 * 1 * 8 = 1.12$$

$$SN3 = a3 * m3 * D3 = 0.11 * 1 * 8 = 0.88$$

$$SN = SN1 + SN2 + SN3 = 1.37 + 1.12 + 0.88 = 3.37$$

Reemplazando en la fórmula AASHTO-1993 se calculó el valor de W18:

$$\log_{10}(W_{18c}) = -1.282 * 0.45 + 9.36 * \log_{10}(3.37 + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{4.2 - 2}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(3.37 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(10350) - 8.07$$

El valor de W18 obtenido para el pavimento con geotextil fue: $W_{18c} = 2312732$ ESAL's

Cálculo del número estructural (SN) y W18 del pavimento sin geotextil

$$SN1 = a1 * D1 = 0.57 * 2.4 = 1.37$$

$$SN2 = a2 * m2 * D2 = 0.14 * 1 * 8 = 1.12$$

$$SN3 = a3 * m3 * D3 = 0.11 * 1 * 6 = 0.66$$

$$SN = SN1 + SN2 + SN3 = 1.37 + 1.12 + 0.66 = 3.15$$

Reemplazando en la fórmula AASHTO-1993 se calculó el valor de W18:

$$\log_{10}(W_{18s}) = -1.282 * 0.45 + 9.36 * \log_{10}(3.15 + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{4.2 - 2}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(3.15 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(10350) - 8.07$$

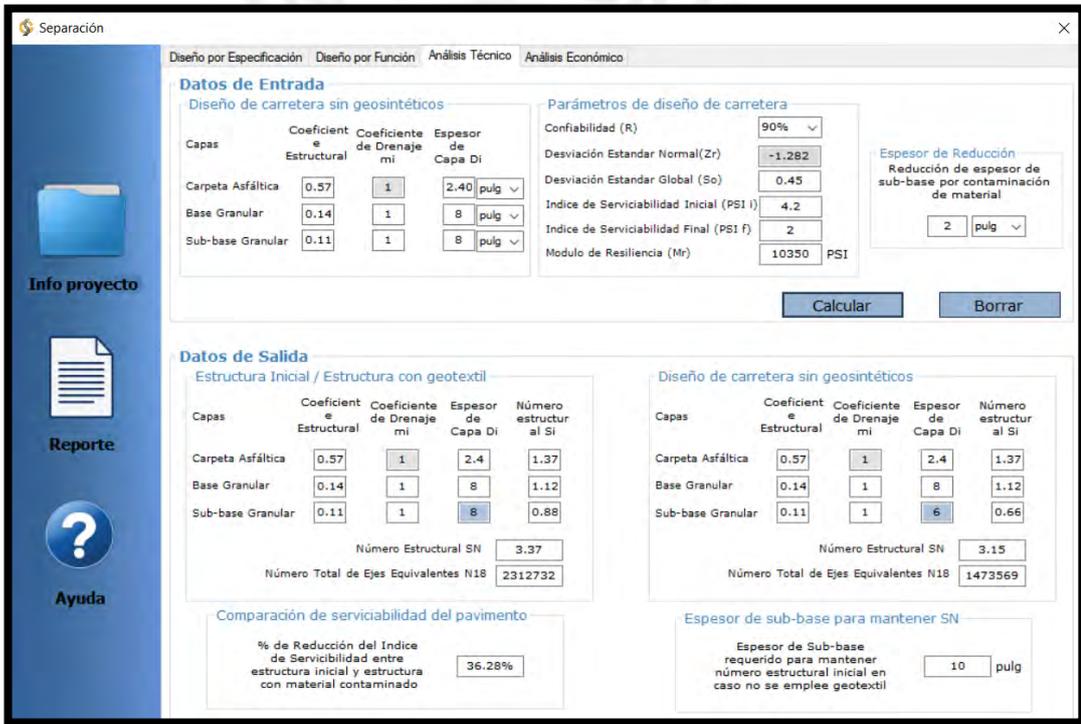
El valor de W18 obtenido para el pavimento sin geotextil fue: $W_{18s} = 1473567$ ESAL's

Comparación de serviciabilidad del pavimento

En este caso se calculó el porcentaje de reducción de serviciabilidad de la estructura sin geotextil respecto a estructura con geotextil:

$$\text{Reducción de serviciabilidad: } \frac{W_{18c} - W_{18s}}{W_{18c}} * 100 = \frac{2312732 - 1473567}{2312732} * 100 = 36.3\%$$

La figura 4.3 muestra el análisis mencionado para una reducción de la subbase en 2 pulgadas. Se puede apreciar que el porcentaje de reducción del índice de serviciabilidad se reduce en un 36.3% generando un impacto negativo en el tiempo de vida del pavimento.



The screenshot shows the 'Separación' software interface with the following data:

Datos de Entrada			
Capas	Coefficiente Estructural	Coefficiente de Drenaje	Espesor de Capa Di
Carpeta Asfáltica	0.57	1	2.40 pulg
Base Granular	0.14	1	8 pulg
Sub-base Granular	0.11	1	8 pulg

Datos de Salida			
Capas	Coefficiente Estructural	Coefficiente de Drenaje	Espesor de Capa Di
Carpeta Asfáltica	0.57	1	2.4
Base Granular	0.14	1	8
Sub-base Granular	0.11	1	8

Número Estructural SN: 3.37
 Número Total de Ejes Equivalentes N18: 2312732

Diseño de carretera sin geosintéticos			
Capas	Coefficiente Estructural	Coefficiente de Drenaje	Espesor de Capa Di
Carpeta Asfáltica	0.57	1	2.4
Base Granular	0.14	1	8
Sub-base Granular	0.11	1	6

Número Estructural SN: 3.15
 Número Total de Ejes Equivalentes N18: 1473569

Comparación de serviciabilidad del pavimento	
% de Reducción del Índice de Serviciabilidad entre estructura inicial y estructura con material contaminado	36.28%

Espesor de sub-base para mantener SN	
Espesor de Sub-base requerido para mantener número estructural inicial en caso no se emplee geotextil	10 pulg

Figura 4.3: Análisis técnico para la función de separación desarrollado en Visual Studio.

El análisis técnico se realizó teniendo en cuenta el diseño estructural de cada sección. La tabla 4.1 presenta este análisis en el cual se asumieron distintos espesores de subbase contaminada para identificar el porcentaje de reducción de serviciabilidad del pavimento. Los valores presentados muestran el aumento de serviciabilidad de forma porcentual del pavimento con geotextil respecto a un pavimento que no lo emplea.

Tabla 4.1: Análisis técnico respecto al uso de geotextil de separación entre subbase y subrasante.

Tramo	Espesores analizados									
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
1	5.4	10.4	15.3	19.9	24.3	28.5	32.5	36.3	39.9	43.3
2	5.9	11.5	16.8	21.9	26.6	31.1	35.4	39.4	43.2	46.8
3	6.1	11.9	17.3	22.5	27.4	32	36.3	40.4	44.3	48
4	6.1	11.9	17.3	22.5	27.4	32	36.3	40.4	44.3	48
5	6.1	11.9	17.3	22.5	27.4	32	36.3	40.4	44.3	48
6	6.5	12.7	18.5	23.9	29.1	33.9	38.4	42.7	46.7	50.5

4.1.4. Análisis económico

El análisis económico consistió en comparar el costo de un pavimento con un espesor de sacrificio en la capa granular adyacente a la subrasante respecto a uno que mantenga los espesores de diseño iniciales, pero incluyendo un geotextil de separación. Este espesor adicional correspondería al mismo espesor del material contaminado, de manera que aporte estructuralmente al pavimento para un tiempo de vida determinado. Así, podría asegurarse que el número estructural del pavimento no se vea afectado. Para este análisis, fue necesario contar con precios referenciales de los materiales. Además, el gramaje del geotextil empleado fue obtenido mediante el procedimiento de diseño descrito anteriormente. Los datos empleados para el análisis fueron los siguientes:

- Espesores de capa de la sección 1 con geotextil:
 - D1: 2.4 pulgadas
 - D2: 8 pulgadas
 - D3: 8 pulgadas
- Espesores de capa de la sección 1 con espesor de sacrificio:
 - D1: 2.4 pulgadas
 - D2: 8 pulgadas
 - D3: 10 pulgadas
- Precio de los materiales:

- Carpeta asfáltica: 190 dólares/m³
- Base granular: 40 dólares/m³
- Sub-base granular: 32 dólares/m³
- Geotextil: 1 dólares/m²

Cálculo del precio por metro cuadrado del pavimento con geotextil

$$\text{Precio carpeta asfáltica} = D1 * P1 = 0.061 * 190 = 11.58 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio base granular} = D2 * P2 = 0.203 * 40 = 8.13 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio subbase granular} = D3 * P3 = 0.203 * 32 = 6.50 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio total del pavimento} = 11.58 + 8.13 + 6.5 + 1 = 27.21 \text{ \$/m}^2$$

Cálculo del precio por metro cuadrado del pavimento sin geotextil

$$\text{Precio carpeta asfáltica} = D1 * P1 = 0.061 * 190 = 11.58 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio base granular} = D2 * P2 = 0.203 * 40 = 8.13 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio subbase granular} = D3 * P3 = 0.254 * 32 = 8.13 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio total del pavimento} = 11.58 + 8.13 + 8.13 = 27.84 \text{ \$/m}^2$$

Comparación del costo de materiales del pavimento

Se buscó determinar el porcentaje de ahorro en materiales entre la estructura con geotextil de separación y la estructura sin geotextil, pero con espesor de sacrificio de 2 pulgadas adicionales.

$$\text{Ahorro en materiales: } \frac{\text{Precio}_{\text{sin gt}} - \text{Precio}_{\text{con gt}}}{W_{\text{sin gt}}} * 100 = \frac{27.84 - 27.21}{27.84} * 100 = 2.25\%$$

La figura 4.4 presenta el análisis económico realizado donde se comparó el pavimento con espesor de sacrificio y aquel que mantiene los espesores de diseño que incluye un geotextil de separación. El formato mostrado forma parte de análisis desarrollado en Visual Studio.

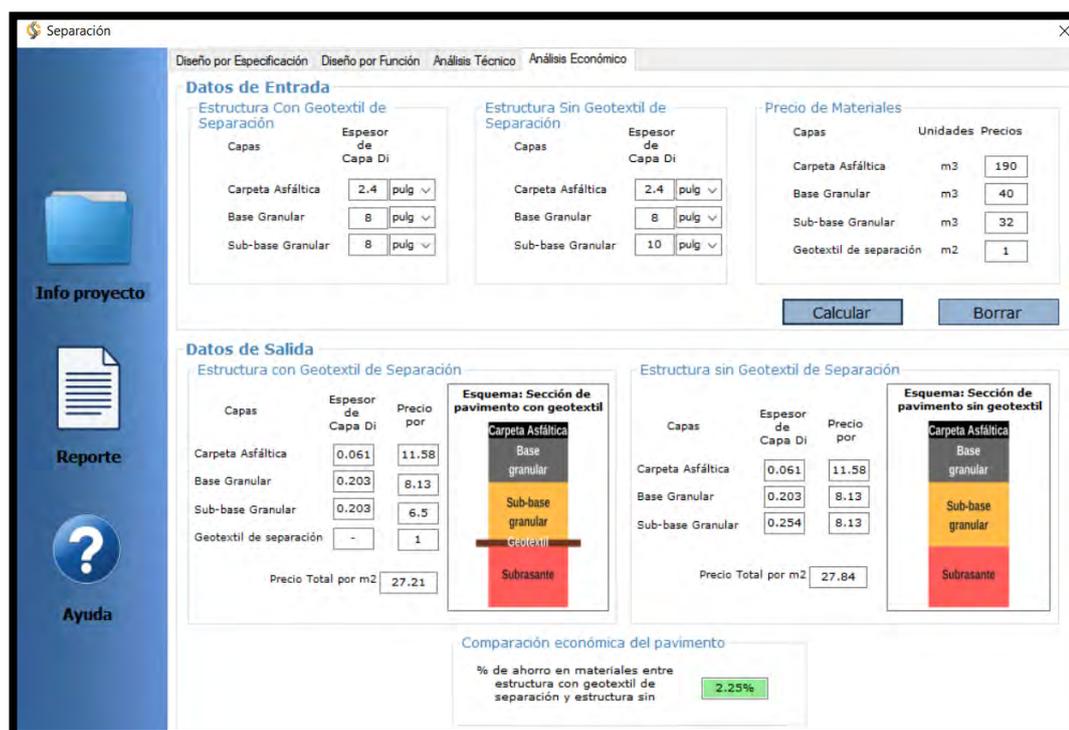


Figura 4.4: Análisis económico entre pavimento con espesor de sacrificio y pavimento sin espesor adicional, pero con geotextil de separación desarrollado en Visual Studio.

El análisis económico se realizó teniendo en cuenta el diseño estructural de cada sección y en base a precios referenciales de los materiales empleados. La tabla 4.2 presenta el análisis económico correspondiente a dos pavimentos. Por un lado, un pavimento que incluye un espesor adicional de subbase llamado espesor de sacrificio. Por otro lado, un pavimento que mantiene los espesores de sus capas, pero que emplea un geotextil de separación. Los valores presentados en la tabla 4.2 muestran el ahorro de forma porcentual del pavimento con geotextil respecto al pavimento que emplea espesor de sacrificio.

Tabla 4.2: Análisis económico comparando pavimento con geotextil de separación respecto a pavimento con espesor de sacrificio de subbase.

Tramo	Espesores analizados									
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
1	-3.02	-2.23	-1.46	-0.69	0.06	0.8	1.53	2.25	2.96	3.65
2	-3.38	-2.5	-1.63	-0.77	0.07	0.89	1.7	2.5	3.29	4.06
3	-3.5	-2.59	-1.69	-0.8	0.07	0.92	1.76	2.59	3.4	4.2
4	-3.5	-2.59	-1.69	-0.8	0.07	0.92	1.76	2.59	3.4	4.2
5	-3.5	-2.59	-1.69	-0.8	0.07	0.92	1.76	2.59	3.4	4.2
6	-3.83	-2.82	-1.84	-0.87	0.07	1	1.92	2.81	3.69	4.55

4.1.5. Especificaciones técnicas

La siguiente especificación presenta los requisitos necesarios para el uso de geotextil como separación entre material granular y subrasante en pavimentos. De esta forma se busca asegurar el correcto funcionamiento del sistema, evitando la reducción de espesores efectivos. Esta especificación incluye la ficha técnica del geotextil especificado para el proyecto, el proceso de almacenaje e instalación y la forma de medición y pago están incluidos.

Descripción

Este trabajo consiste en la provisión y colocación de un geotextil no tejido como un separador permeable para evitar la contaminación entre el material granular y la fundación. Este geotextil debe permitir el paso del agua reteniendo el paso de los finos del suelo. De esta forma se podrá mantener la integridad de los espesores de las capas granulares asegurando el correcto funcionamiento del pavimento durante su tiempo de vida útil.

Materiales

Geotextil separador: El geotextil debe estar fabricado por fibras sintéticas las cuales deben estar constituidas por un mínimo de 85% en peso de poliolefinos o poliéster. El geotextil debe estar libre de defectos o imperfecciones que puedan afectar sus propiedades físicas. Las propiedades del material deben permitirle resistir ataques químicos y biológicos, daños por instalación y flujo plástico. La tabla 4.3 presenta la ficha técnica del geotextil especificado.

Tabla 4.3: Ficha técnica del geotextil no tejido punzonado empleado para la función de separación.

PROPIEDADES	ENSAYO	UND	VALOR MARV
Método Grab			
Resistencia a la Tracción	ASTM D 4632	N	1200
Elongación		%	>50
Método Tira Ancha			
Sentido Longitudinal	ASTM D 4595	kN/m	18
Elongación		%	>50
Sentido Transversal	ASTM D 4595	kN/m	18
Elongación		%	>50
Resistencia al desgarre trapezoidal	ASTM D 4533	N	450
Resistencia al punzonado	ASTM D 4833	N	690
Resistencia al punzonado CBR	ASTM D 6241	kN	3.20
Resistencia al estallido	ASTM D 3786	kPa	2950
Permisividad	ASTM D 4491	s ⁻¹	1.40
Permeabilidad	ASTM D 4491	cm/s	0.35
Tamaño de abertura aparente(TAA)	ASTM D 4751	mm	0.15
Tasa de flujo	ASTM D 4491	l/min/m ²	3700
Estabilidad a rayos ultravioleta ⁽¹⁾	ASTM D 4355	%	>70

Notas (correspondientes a las descritas por el fabricante):

Valor MARV: valor mínimo promedio de rollo. Es un valor estadístico igual al valor promedio menos dos veces la desviación estándar.

⁽¹⁾ Después de 500 horas de exposición

Almacenamiento

Los rollos de geotextil deben contar con una envoltura como protección contra la humedad y la exposición a los rayos ultravioleta antes de su colocación. Su almacenamiento debe protegerlos de estas condiciones igualmente. En caso sean almacenados a la intemperie, debe evitarse el contacto de los rollos con la superficie del suelo y deben protegerse con una cobertura impermeabilizante. El geotextil no debe estar expuesto más de 14 días a rayos ultravioleta para evitar una reducción de cualquiera de sus propiedades.

Método de construcción

Antes de colocar el geotextil sobre la subrasante, debe prepararse el área de instalación retirando todos los restos de rocas u objetos punzantes que puedan dañar el geotextil.

Luego, debe desenrollarse el geotextil cuidadosamente en la dirección del tráfico de construcción sobre la superficie preparada. Los rollos del geotextil deben contar con un traslape de 30 centímetros en la dirección de la colocación del material.

En caso se requiera, el geotextil puede ser fijado con pines, sacos de arena o rocas antes de la colocación de la geomalla y el relleno. En las curvas de la carretera, el geotextil puede ser doblado o cortado. El doblado o traslape debe ser hecho en la dirección de la construcción y también puede ser fijado como se describió anteriormente. El geotextil no debe ser arrastrado sobre la subrasante bajo ninguna circunstancia.

Aquellos geotextiles dañados deben ser reparados inmediatamente. El área dañada más 90 centímetros alrededor de dicha área, debe ser limpiada de todo material de relleno. Luego, debe realizarse un parche de 90 centímetros más allá del perímetro del área dañada.

El agregado debe colocarse vaciando desde el extremo más cercano al geotextil o sobre el agregado colocado previamente. El agregado deberá ser esparcido desde una pila usando un tractor empujador. No debe permitirse el tráfico directamente sobre el geotextil. Debe evitarse las paradas bruscas y los giros intempestivos del equipo sobre el agregado que se encuentre sobre el geotextil.

Método de medición

El geotextil debe ser medido en metros cuadrados considerando las secciones indicadas en los planos y/o de las indicadas por escrito por la supervisión.

Bases de pago

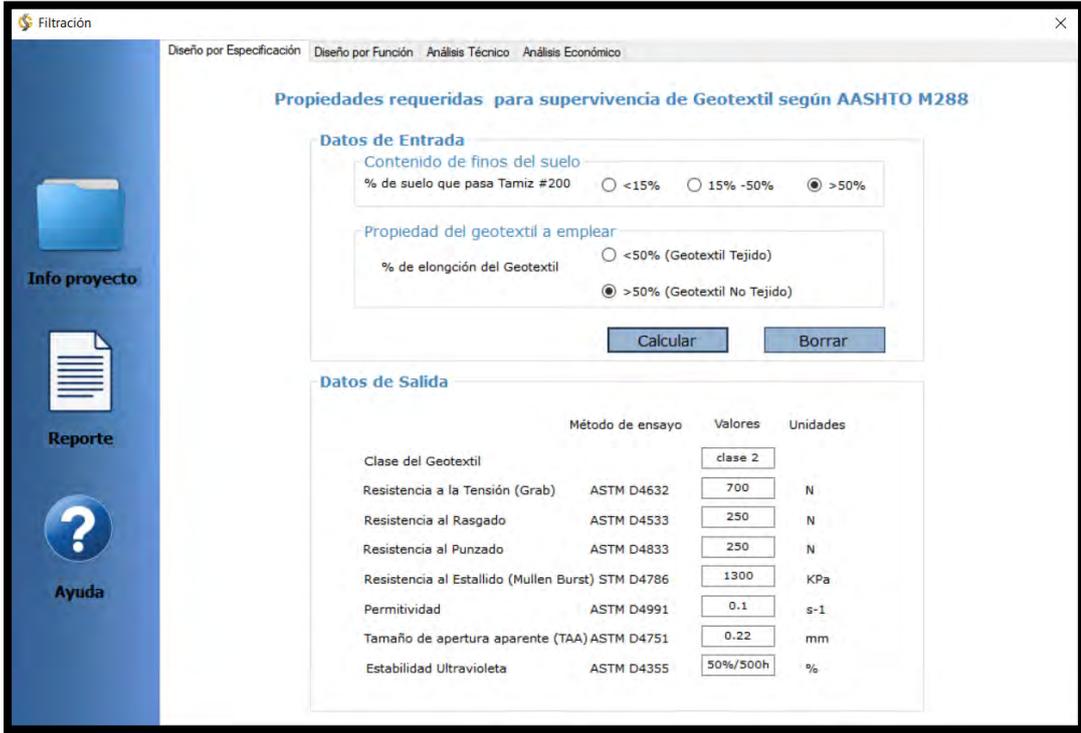
Las cantidades aceptadas de geotextil deben ser pagadas al precio unitario por metro cuadrado indicado en el contrato.

4.2. Diseño con geotextil para la función de filtración

Para el presente caso de estudio, se realizó el diseño con un geotextil de filtración aplicado en un sistema de subdrenaje longitudinal a los lados de la carretera. Los criterios de diseño fueron tomados de la norma AASHTO M288-96, del manual de la FHWA, del manual de hidrología de la MTC y del libro “Designing with Geosynthetics” del Dr. Koerner. A continuación, se efectuó el diseño por especificación y por función correspondientes a un geotextil de filtración. Luego, se emplearon los datos obtenidos para efectuar el análisis técnico y económico del uso del geotextil especificado para esta aplicación.

4.2.1. Diseño por especificación

En cuanto al diseño por especificación, se verificó que el material cumpla con las propiedades presentadas en la norma M288-96. Estas propiedades son las mínimas requeridas para asegurar la durabilidad del geotextil. La figura 4.5 presenta los requisitos mínimos que debe presentar un geotextil no tejido (>50% de elongación) en contacto con un suelo con alto contenido de finos (>50% de suelo que pasa tamiz 200).



Propiedades requeridas para supervivencia de Geotextil según AASHTO M288

Datos de Entrada

Contenido de finos del suelo
 % de suelo que pasa Tamiz #200 <15% 15% -50% >50%

Propiedad del geotextil a emplear
 % de elongación del Geotextil <50% (Geotextil Tejido) >50% (Geotextil No Tejido)

Datos de Salida

Clase del Geotextil	Método de ensayo	Valores	Unidades
Clase del Geotextil		clase 2	
Resistencia a la Tensión (Grab)	ASTM D4632	700	N
Resistencia al Rasgado	ASTM D4533	250	N
Resistencia al Punzado	ASTM D4833	250	N
Resistencia al Estallido (Mullen Burst)	STM D4786	1300	KPa
Permitividad	ASTM D4991	0.1	s-1
Tamaño de apertura aparente (TAA)	ASTM D4751	0.22	mm
Estabilidad Ultravioleta	ASTM D4355	50%/500h	%

Figura 4.5: Propiedades del geotextil a aplicar como filtro en sistema de subdrenaje según AASHTO M288-96.

4.2.2. Diseño por función

Como se comentó anteriormente, el objetivo del diseño por función consiste en determinar el valor mínimo de las propiedades esenciales que aseguren el correcto comportamiento del material durante el tiempo de vida de la obra. Para el caso de un geotextil de filtración, es importante asegurar que el agua infiltrada atraviese el material reteniendo el material fino. Además, debe asegurarse el correcto desempeño del geotextil a largo plazo, es decir, evitar la posible colmatación de este. Para cuantificar las propiedades últimas de material, se empleó la metodología de diseño desarrollada por el Dr. Holtz propuesta por la FHWA y algunos conceptos del MTC y del libro “Designing with geosynthetics”. Los criterios para la estimación de los parámetros previos al diseño del geotextil también fueron descritos a continuación.

Estimación del caudal

La estimación del caudal total está dada por el aporte del caudal de infiltración y el de abatimiento del nivel freático. Para este proyecto, el nivel freático no fue muy elevado por lo cual no influyó en la determinación del caudal total a drenar. Para la estimación del caudal por infiltración, se empleó la fórmula propuesta en el manual de

la empresa PAVCO. Para la aplicación de esta fórmula, fue necesario contar con los siguientes parámetros:

- Precipitación máxima horaria de frecuencia anual registrada en la zona del proyecto: No se contó con esta información del proyecto, pero se aplicó un valor referencial de la zona en estudio. Es importante recalcar que este valor debería extraerse de una curva de intensidad-duración-frecuencia para tiempos entre 60 y 120 minutos y para una curva de 2 años (PAVCO, 2012). El valor empleado para este caso fue de 60 mm/h.
- Semibanca de la vía (B): 3 metros.
- Longitud del tramo de drenaje (L): Según el manual de hidrología del Perú se debe colocar cajas de registro y buzones cada cierto tramo en drenes longitudinales. De esta forma, se buscaría asegurar una adecuada colección del agua drenada logrando un buen funcionamiento del sistema. La distancia entre estos dispositivos debería variar entre 80 y 100 metros de distancia (MTC, 2011). Para este diseño se asumió una distancia de 100 metros.
- Factor de infiltración elegido (F_i): Carpeta asfáltica normalmente conservadas (0.40).
- Factor de retención de base (F_R): Base bien gradada, en servicio 5 años o más (1/4).

Los cálculos realizados fueron los siguientes:

$$Q_{\text{infiltración}} = I_R * B * L * F_i * F_R = 60 * 3 * 100 * 0.4 * \frac{1}{4} * \left(\frac{1}{3600 * 1000}\right) = 5.00 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{infiltración}} + Q_{\text{abatimiento de NF}} = 5.00 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Cabe resaltar que se empleó esta fórmula ya que, para emplear otros métodos para el cálculo de caudal, debería disponerse de mayor información sobre el estudio hidrológico del proyecto.

Estimación del diámetro de la tubería

La estimación del diámetro de la tubería se calculó a partir de la ecuación de Manning presentada en el libro “Hidráulica de canales abiertos” del Dr. Ven Te Chow (Te Chow, 1959). Los parámetros empleados para el cálculo son los siguientes:

- Caudal total (Q_{tot}): $5.00 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

- Número de Manning (n): 0.012
- Pendiente (s): 1.5%
- Profundidad relativa (Y/D): 0.75

Las fórmulas empleadas para la estimación del diámetro de la tubería fueron las siguientes:

$$\text{Ángulo de área mojada } (\theta) = 2 * \cos^{-1}\left(1 - \frac{2Y}{D}\right)$$

$$\text{Área mojada (A)} = \frac{1}{8} * D^2 * (\theta - \sin \theta)$$

$$\text{Perímetro mojado (P)} = \frac{1}{2} * D * \theta$$

$$\text{Fórmula de manning: } Q_{\text{tot}} = \frac{A^{\frac{5}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{2}{3}} * n} = \frac{\left(\frac{1}{8} * D^2 * (\theta - \sin \theta)\right)^{\frac{5}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{2} * D * \theta\right)^{\frac{2}{3}} * n}$$

Mediante iteraciones, realizadas internamente en el programa, se determinó el diámetro de la tubería. Los valores obtenidos se muestran en la figura 4.6.

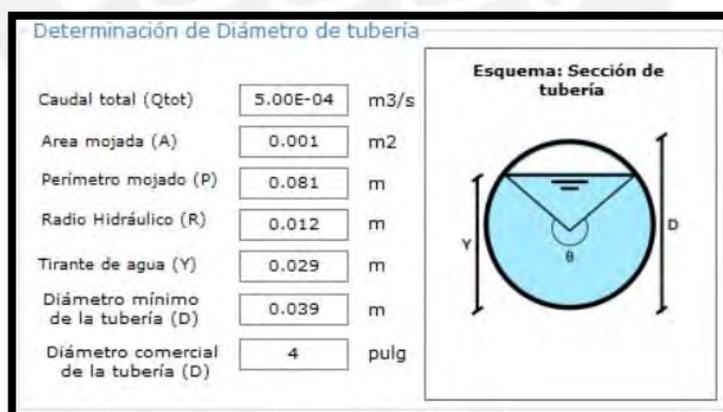


Figura 4.6: Resultados de cálculo de diámetro de tubería realizado en Visual Studio.

Estimación de la sección del subdrén

Para la estimación de la sección del subdrén se empleó la metodología presentada en el manual de hidrología del Perú. Este manual explica un procedimiento para calcular estas dimensiones utilizando agregado uniforme en el subdrén. El procedimiento

consistió en determinar la velocidad de flujo del agua que atraviesa el agregado de gradación uniforme. Para esto, se debió establecer el diámetro del agregado y la pendiente del subdrén para obtener gráficamente la velocidad de flujo. Se determinaron las ecuaciones de las curvas que corresponden a este gráfico para poder determinar este valor de manera más exacta y rápida. El gráfico comentado es presentado en la figura 4.7.

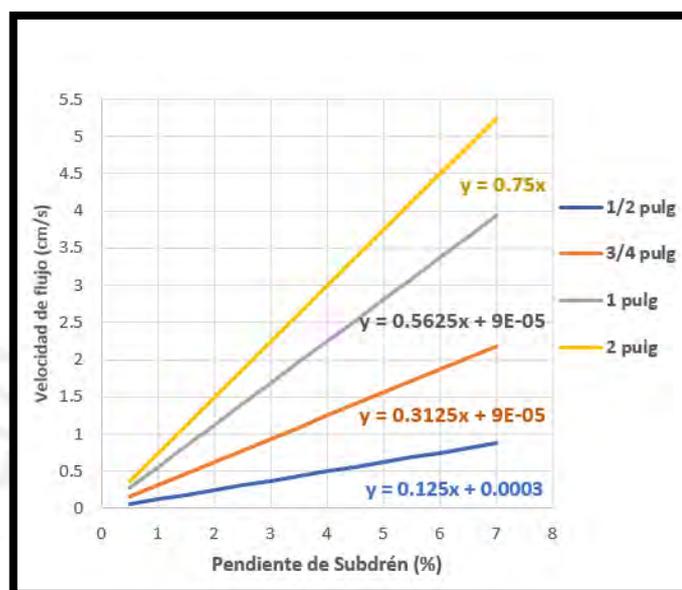


Figura 4.7: Velocidad de flujo vs. Pendiente de subdrén según manual del MTC (MTC, 2011).

Para este diseño se empleó una pendiente de 1.5% y un tamaño de piedra de ½". Por lo tanto, la ecuación aplicada para la determinación de la velocidad de flujo fue la siguiente:

$$\text{Velocidad de flujo (V)} = 0.125 * 1.5 + 0.0003 = 0.188 \text{ cm/s}$$

Una vez calculada esta velocidad se procedió a determinar la altura del subdrén. Fue necesario fijar un valor para el ancho del subdrén. Según las especificaciones de los fabricantes de tuberías de HDPE, para una de 4 pulgadas de diámetro es recomendable emplear un ancho mínimo de 0.52m. Por lo tanto, se empleó este valor para determinar la altura mínima del subdrén aplicando la ecuación presentada en el manual de hidrología del ministerio de transportes.

$$\text{Caudal total (Q}_{\text{tot}}) = V * i * A = V * i * b * h$$

Reemplazando:

$$5.00 \times 10^{-4} = (0.188 * 10^{-2}) * 1 * 0.52 * h \Rightarrow h = 0.51 \text{m}$$

A partir de los valores obtenidos, se determinó que el subdrén debería tener 0.52m de ancho mínimo y 0.51m de altura mínima. Del punto de vista constructivo se empleó para este subdrén unas dimensiones de 60x60cm.

Diseño del geotextil de filtración

Para la determinación de los siguientes criterios se empleó el procedimiento de diseño para geotextiles de filtración de la FHWA desarrollado por el Dr. Holtz. El cálculo de la permitividad del material se realizó mediante uso de la ecuación de Darcy y de la ecuación de permitividad presentada en el libro del Dr. Koerner y en el manual de hidrología del MTC.

El diseño presentado por la FHWA indica que primero es necesario identificar la naturaleza del proyecto, así como sus condiciones. Para este caso de estudio, se identificó que no habría un alto riesgo de pérdida de vidas y que las condiciones de flujo eran estáticas. Por lo tanto, se asumió que las condiciones eran menos severas y que la aplicación era menos crítica. Partiendo de estas condiciones iniciales se pudo proceder al diseño. Este incluyó criterios de retención, de permeabilidad y permisividad y por último de resistencia a la colmatación. A continuación, se presentó el procedimiento de diseño completo para el tramo 1. Los datos empleados para este fueron los siguientes:

- Partícula de suelo para la cual el 10% son más pequeñas (D10): 0.075 mm
- Partícula de suelo para la cual el 15% son más pequeñas (D15): 0.075 mm
- Partícula de suelo para la cual el 60% son más pequeñas (D60): 0.075 mm
- Partícula de suelo para la cual el 85% son más pequeñas (D85): 0.556 mm
- Coeficiente adimensional (B): este coeficiente depende del Cu del suelo. En este caso $Cu=1$
- Dimensiones del subdrén: 60 x 60 cm
- Factores de reducción empleados:
 - Colmatación por finos: 10
 - Flujo plástico: 1.5
 - Intrusión de vacíos: 1.2

- Colmatación química: 1.5
- Colmatación Biológica: 3
- Factor de seguridad elegido: 2

Criterio de retención

Este criterio tiene como objetivo asegurar que el geotextil retenga el material fino del suelo adyacente. Para esto, fue necesario identificar el valor del coeficiente B según el tipo de suelo en contacto con el geotextil. En este caso, como se empleó un geotextil no tejido y el porcentaje de suelo que pasa la malla #200 fue mayor a 50%. Por ende, el valor del coeficiente B a emplearse sería igual a 1.8. A partir de esto, se determinó el tamaño aparente mínimo del geotextil:

$$AOS \leq B * D_{85} = 1.8 * 0.42 = 0.756 \text{ mm}$$

Pero, según el manual de la FHWA el valor de AOS para este criterio no debe ser mayor a 0.3mm. Por lo tanto, el AOS del geotextil según el criterio de retención sería:

$$AOS \leq 0.3 \text{ mm}$$

Criterio de permeabilidad

El manual de la FHWA indica que para aplicaciones “menos críticas” y “condiciones menos severas” la relación entre la permeabilidad del geotextil y del suelo es la siguiente:

$$k_{geotextil} \geq k_{suelo}$$

$$k_{geotextil} \geq 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

Criterio de permitividad

El manual de la FHWA relaciona el porcentaje de suelo que pasa la malla 200 con la permeabilidad requerida del geotextil. Para el primer tramo, el porcentaje que pasa la malla 200 es mayor al 50 %. Por lo tanto, la permitividad requerida para esta granulometría del suelo sería:

$$\Psi_{req} \geq 0.1 \text{ s}^{-1}$$

Por otro lado, tanto el manual de hidrología, hidráulica y drenaje del Perú, así como el libro del Dr. Koerner determinan que el criterio de permitividad puede ser calculado de otra forma. Su cálculo puede ser realizado mediante el uso de la fórmula de Darcy y de la relación entre la permeabilidad del geotextil y de su espesor. A continuación, se determinó este criterio mediante el uso de dichas fórmulas.

$$\Psi_{\text{req por infiltración}} = \frac{q}{\Delta h A} = \frac{5.00 \times 10^{-4}}{0.4 \times 0.6 \times 100} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$\Psi_{\text{perm}} = \Psi_{\text{req}} \times \text{FS} = 2.08 \times 10^{-5} \times 2 = 4.17 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$\Psi_{\text{ult}} = \Psi_{\text{perm}} \times \text{PFR} = 4.17 \times 10^{-5} \times 10 \times 1.5 \times 1.2 \times 1.5 \times 3 = 3.38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Como se pudo observar, el valor obtenido fue mucho menor al criterio de la FHWA. Por lo tanto, para determinar el geotextil comercial deberá usarse el valor más alto.

Criterio de colmatación

Siguiendo con los lineamientos presentados en el manual de la FHWA la resistencia a la colmatación depende de la aplicación y condiciones de campo. Como para el caso de estudio la aplicación sería “menos críticas” y las condiciones serían “menos severas” se debió evaluar el C_u del suelo. Sabiendo que $C_u = 1 < 3$, entonces debería emplearse como AOSmax aquel obtenido mediante el criterio de retención. Por lo tanto, el valor empleado fue:

$$\text{AOS} \geq 0.3 \text{ mm}$$

El procedimiento presentado fue sistematizado para facilitar el diseño. La figura 4.8 presenta el diseño realizado en este formato para el tramo 1 de la carretera.

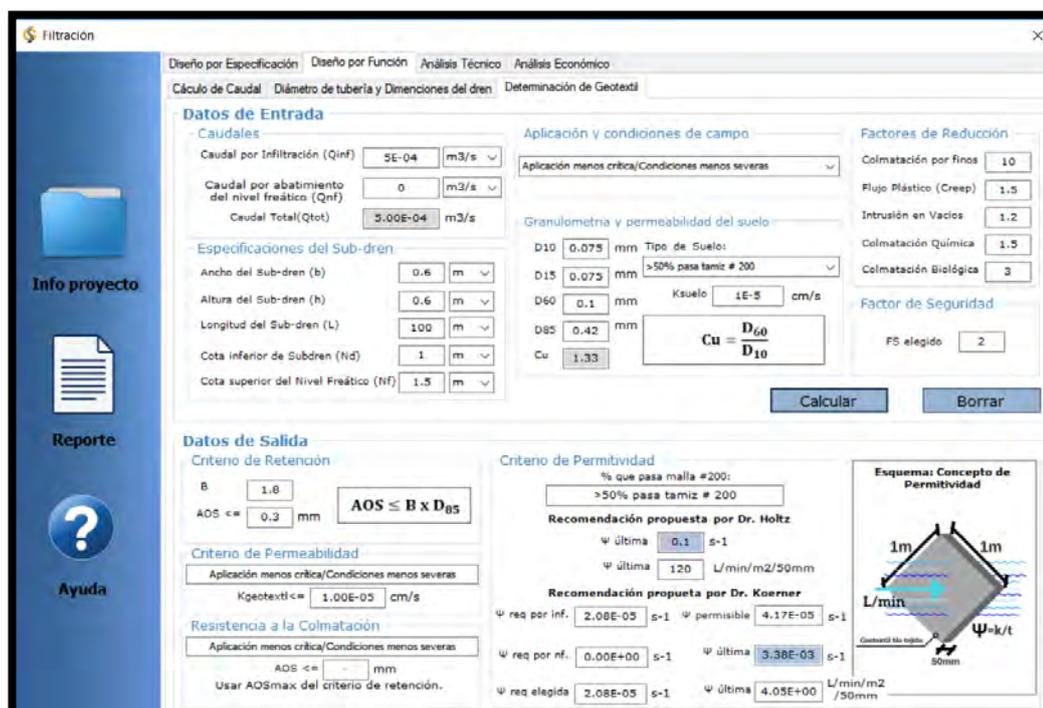


Figura 4.8: Diseño según la FHWA para sistema de subdrenaje desarrollado en Visual Studio.

Una vez presentado el procedimiento de diseño, este se aplicó para los 6 tramos. La tabla 4.4 muestra los diseños comentados.

Tabla 4.4: Diseño por función de los 6 tramos del caso de estudio.

Criterio	Tramo I	Tramo II	Tramo III	Tramo IV	Tramo V	Tramo VI
Retención: AOS (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	10.93	0.3
Permeabilidad (cm/s)	1.00E-03	2.00E-04	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-03	1.00E-03
Permitividad (s-1)	FHWA	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
	MTC	3.38E-03	3.38E-03	3.38E-03	3.38E-03	3.38E-03
Colmatación(mm)	-	-	-	-	0.225	-

A partir de este diseño se constató que sólo era necesario un solo gramaje de geotextil para las 6 secciones de la carretera. El geotextil comercial GT110 de 110gr/m² cumpliría con las propiedades últimas presentadas en la tabla 4.4. Sin embargo, considerando las propiedades mínimas requeridas de durabilidad según las AASHTO M288-96 empleadas este geotextil no sería el indicado. El geotextil comercial GT240 en cambio, sí cumplió con ambos diseños. Por lo tanto, sería el geotextil elegido para el diseño final del sistema de subdrenaje.

4.2.3. Análisis técnico

El análisis técnico para este caso consistió en identificar la reducción de la serviciabilidad del pavimento. Se buscó determinar el aporte del uso de subdrenaje en el tiempo de vida de este. Es por eso, que se asumió una reducción de los coeficientes de drenaje del pavimento luego de algunos años de funcionamiento. Para este caso, los valores reducidos asumidos fueron igual a 0.75 y a partir de estos se determinó el nuevo número de ESAL. Luego se analizó la diferencia porcentual entre ambos casos de análisis. A continuación, se presentaron los parámetros de diseño para el sector 1 y cálculos realizados.

- Diseño estructural de la sección:
 - D1: 2.4 pulgadas, a_1 : 0.57
 - D2: 8 pulgadas, a_2 : 0.14, m_2 : 1.00
 - D3: 8 pulgadas, a_3 : 0.11, m_3 : 1.00
- Parámetros de diseño de la carretera:
 - Confiabilidad (R): 90%
 - Desviación estándar nominal (Z_r): -1.282
 - Desviación estándar global (S_o): 0.45
 - Índice de serviciabilidad inicial (P_i): 4.2
 - Índice de serviciabilidad final (P_t): 2
 - Módulo de resiliencia (M_r): 10350 PSI
- Coeficientes de drenaje reducidos:
 - m_2 : 0.75
 - m_3 : 0.75

Cálculo del número estructural (SN) y W18 del pavimento con geotextil

$$SN_1 = a_1 * D_1 = 0.57 * 2.4 = 1.37$$

$$SN_2 = a_2 * m_2 * D_1 = 0.14 * 1 * 8 = 1.12$$

$$SN_3 = a_3 * m_3 * D_3 = 0.11 * 1 * 8 = 0.88$$

$$SN = SN_1 + SN_2 + SN_3 = 1.37 + 1.12 + 0.88 = 3.37$$

Reemplazando en la fórmula AASHTO-1993 se calculó el valor de W18:

$$\log_{10}(W_{18c}) = -1.282 * 0.45 + 9.36 * \log_{10}(3.37 + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{4.2 - 2}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(3.37 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(10350) - 8.07$$

El valor de W18 obtenido para el pavimento con geotextil fue: $W_{18c} = 2312732$ ESAL's

Cálculo del número estructural (SN) y W18 del pavimento sin geotextil

$$SN1 = a1 * D1 = 0.57 * 2.4 = 1.37$$

$$SN2 = a2 * m2 * D2 = 0.14 * 0.75 * 8 = 0.84$$

$$SN3 = a3 * m3 * D3 = 0.11 * 0.75 * 8 = 0.66$$

$$SN = SN1 + SN2 + SN3 = 1.37 + 0.84 + 0.66 = 2.87$$

Reemplazando en la fórmula AASHTO-1993 se calculó el valor de W18:

$$\log_{10}(W_{18s}) = -1.282 * 0.45 + 9.36 * \log_{10}(2.87 + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{4.2 - 2}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(2.87 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(10350) - 8.07$$

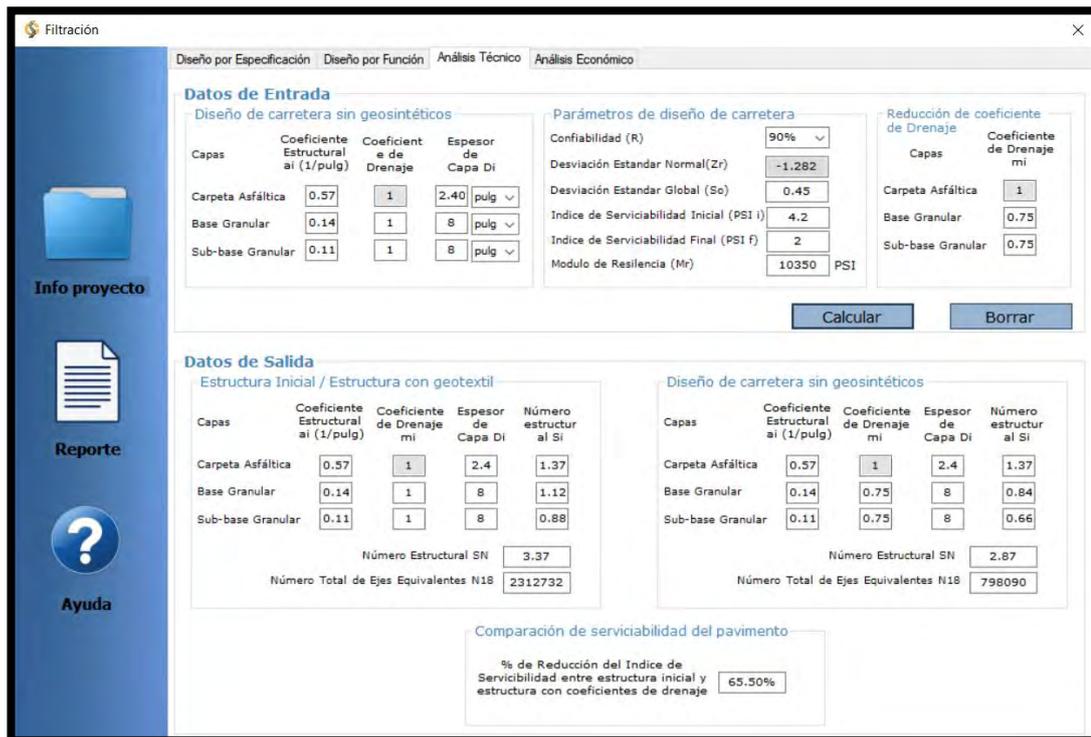
El valor de W18 obtenido para el pavimento sin geotextil fue: $W_{18s} = 798090$ ESAL's

Comparación de serviciabilidad del pavimento

En este caso, se calculó el porcentaje de reducción de serviciabilidad de la estructura sin geotextil respecto a estructura con geotextil:

$$\text{Reducción de serviciabilidad} = \frac{W_{18c} - W_{18s}}{W_{18c}} * 100 = \frac{2312732 - 798090}{2312732} * 100 = 65.5\%$$

La figura 4.9 presenta el formato realizado en Visual Studio para el análisis técnico del sistema de subdrenaje. Como se puede observar, es necesario colocar todos los parámetros para el diseño estructural del pavimento sin sistema de subdrenaje y los valores estimados de coeficientes de drenaje finales.



Datos de Entrada

Diseño de carretera sin geosintéticos

Capas	Coefficiente Estructural ai (1/pulg)	Coefficiente de Drenaje	Espesor de Capa Di
Carpeta Asfáltica	0.57	1	2.40 pulg
Base Granular	0.14	1	8 pulg
Sub-base Granular	0.11	1	8 pulg

Parámetros de diseño de carretera

Confiabilidad (R)	90%
Desviación Estandar Normal (Zr)	-1.282
Desviación Estandar Global (So)	0.45
Índice de Serviciabilidad Inicial (PSI i)	4.2
Índice de Serviciabilidad Final (PSI f)	2
Modulo de Resiliencia (Mr)	10350 PSI

Reducción de coeficiente de Drenaje

Capas	Coefficiente de Drenaje mi
Carpeta Asfáltica	1
Base Granular	0.75
Sub-base Granular	0.75

Datos de Salida

Estructura Inicial / Estructura con geotextil

Capas	Coefficiente Estructural ai (1/pulg)	Coefficiente de Drenaje mi	Espesor de Capa Di	Número estructural al Si
Carpeta Asfáltica	0.57	1	2.4	1.37
Base Granular	0.14	1	8	1.12
Sub-base Granular	0.11	1	8	0.88

Número Estructural SN: 3.37
Número Total de Ejes Equivalentes N18: 2312732

Diseño de carretera sin geosintéticos

Capas	Coefficiente Estructural ai (1/pulg)	Coefficiente de Drenaje mi	Espesor de Capa Di	Número estructural al Si
Carpeta Asfáltica	0.57	1	2.4	1.37
Base Granular	0.14	0.75	8	0.84
Sub-base Granular	0.11	0.75	8	0.66

Número Estructural SN: 2.87
Número Total de Ejes Equivalentes N18: 798090

Comparación de serviciabilidad del pavimento

% de Reducción del Índice de Serviciabilidad entre estructura inicial y estructura con coeficientes de drenaje: 65.50%

Figura 4.9: Análisis técnico para sistema de subdrenaje desarrollado en Visual Studio.

Se determinó la serviciabilidad del pavimento para los seis sectores. Además, para tener una visión más amplia de esta reducción se realizó este análisis para distintas reducciones del coeficiente de reducción. La tabla 4.5 presenta este análisis para un rango de 0.7 a 0.9 del coeficiente de drenaje.

Tabla 4.5: Análisis técnico del uso de subdrenes para los 6 tramos del caso de estudio.

Sector	Variación de coeficiente de drenaje del pavimento				
	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
I	72.6	65.5	56.8	46.3	33.5
II	68.2	61.1	52.5	42.4	30.5
III	66.7	59.6	51.1	41.2	29.5
IV	66.7	59.6	51.1	41.2	29.5
V	66.7	59.6	51.1	41.2	29.5
VI	69.4	62.3	53.7	43.4	31.3

4.2.4. Análisis económico

Este análisis consistió en comparar el pavimento inicial respecto al pavimento diseñado con un sistema de subdrenaje envuelto con geotextil. El análisis se basó en investigaciones que concluyen que un pavimento sin sistema de subdrenaje puede reducir su tiempo de vida hasta en un cincuenta por ciento (PAVCO, 2012). Por lo tanto, el objetivo fue comparar el costo de ambos pavimentos calculando el costo total de una sección dividido entre el tiempo de vida real asumido. De esta forma, se comparó el costo anual que representan. Los parámetros empleados para el análisis del tramo 1 fueron los siguientes:

- Espesor de capas de la sección:
 - D1: 2.4 pulgadas
 - D2: 8 pulgadas
 - D3: 8 pulgadas
- Tiempo de vida de los pavimentos a comparar:
 - Tiempo de vida de diseño: 10 años
 - Tiempo de vida estimado para pavimento sin sistema de subdrenaje: 5 años
- Precio de los materiales:
 - Carpeta asfáltica: 190 dólares/m³
 - Base granular: 40 dólares/m³
 - Sub-base granular: 32 dólares/m³
 - Material granular de dren: 3.5 dólares/m³
 - Geotextil de filtración: 1 dólar/m²

Cálculo del precio por metro cuadrado del pavimento con geotextil

$$\text{Precio carpeta asfáltica} = D1 * P1 = 0.061 * 190 = 11.58 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio base granular} = D2 * P2 = 0.203 * 40 = 8.13 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio subbase granular} = D3 * P3 = 0.203 * 32 = 6.5 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio total del pavimento} = 11.58 + 8.13 + 6.5 + 16.8 + 1 = 44.01 \text{ \$/m}^2$$

Cálculo del precio por metro cuadrado del pavimento sin geotextil

$$\text{Precio carpeta asfáltica} = D1 * P1 = 0.061 * 190 = 11.58 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio base granular} = D2 * P2 = 0.203 * 40 = 8.13 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio subbase granular} = D3 * P3 = 0.203 * 32 = 6.5 \text{ \$/m}^2$$

$$\text{Precio total del pavimento} = 11.58 + 8.13 + 6.5 = 26.21 \text{ \$/m}^2$$

Comparación de costo de materiales del pavimento

Se buscó determinar el porcentaje de ahorro en materiales entre una estructura con un sistema de subdrenaje y una estructura sin este sistema.

$$\text{Ahorro: } \frac{\text{Precio}_{\text{sin gt}} - \text{Precio}_{\text{con gt}}}{W_{\text{sin gt}}} * 100 = \frac{4.4 - 5.24}{4.4} * 100 = 16.05\%$$

La figura 4.10 presenta el formato realizado en Visual Studio para este análisis. Fue necesario contar con el diseño estructural del pavimento, el tiempo de vida de diseño y el estimado y los precios de los materiales.

Datos de Entrada

Estructura del pavimento

Capas	Espesor de Capa Di
Carpeta Asfáltica	2.4 pulg
Base Granular	8 pulg
Sub-base Granular	8 pulg
Altura del dren	0.6 m
Ancho del dren	0.6 m

Tiempo de vida del pavimento

Tiempo de vida de la estructura con subdrenaje: 20 Años

Tiempo de vida de la estructura sin subdrenaje: 10 Años

Precio de Materiales

Capas	Unidades	Precios
Carpeta Asfáltica	m3	190
Base Granular	m3	40
Sub-base Granular	m3	32
Material granular del dren	m3	3.5
Geotextil de filtración	m2	1

Datos de Salida

Estructura con sub-drenes

Capas	Espesor de Capa Di	Precio por
Carpeta Asfáltica	0.061	11.58
Base Granular	0.203	8.13
Sub-base Granular	0.203	6.5
Material granular del dren	-	16.8
Geotextil de filtración	-	1
Precio Total por m2		44.01
Precio Total anual por m2		2.2

Estructura sin sub-drenes

Capas	Espesor de Capa Di	Precio por
Carpeta Asfáltica	0.061	11.58
Base Granular	0.203	8.13
Sub-base Granular	0.203	6.5
Precio Total por m2		26.21
Precio Total anual por m2		2.62

Comparación de serviciabilidad del pavimento

% de ahorro en materiales entre estructura con geotextil de separación y estructura sin: 16.05%

Figura 4.10: Análisis económico para sistema de subdrenaje desarrollado en Visual Studio.

Se realizó este análisis para los seis tramos variando el tiempo de vida estimado del pavimento sin subdrenes. De esta forma, se buscó identificar la rentabilidad de su

aplicación. La tabla 4.6 presenta el porcentaje de ahorro en materiales entre las dos estructuras analizadas.

Tabla 4.6: Análisis económico del uso de subdrenes para los 6 tramos del caso de estudio.

Sector	Variación del tiempo de vida estimado sin subdrenaje				
	4	5	6	7	8
I	32.84	16.05	-0.74	-17.53	-34.32
II	33.13	16.41	-0.31	-17.03	-33.75
III	35.88	19.85	3.82	-12.21	-28.24
IV	35.88	19.85	3.82	-12.21	-28.24
V	35.88	19.85	3.82	-12.21	-28.24
VI	33.62	17.03	0.44	-16.16	-32.75

4.2.5. Especificaciones técnicas

Esta especificación está relacionada a los requisitos necesarios para el uso de geotextil en sistemas de subdrenaje longitudinales en pavimentos. De esta forma, se busca asegurar el correcto funcionamiento del sistema, facilitando la captación y evacuación del agua infiltrada a través de la base y subbase del pavimento. Así mismo, el uso material tiene como finalidad asegurar el correcto funcionamiento del subdrén para la captación y drenaje de agua de subsuelo en caso exista, filtraciones de taludes y flujos subterráneos. Esta especificación incluye la ficha técnica del geotextil especificado para el proyecto, el proceso de almacenaje y de instalación, la forma de medición y de pago.

Descripción

La presente especificación consiste en recomendaciones relacionadas a la provisión y colocación de un geotextil no tejido como envoltura de subdrén. Dicho geotextil está diseñado para soportar las condiciones de instalación y posee propiedades mecánicas e hidráulicas necesarias para el proyecto.

Materiales

El geotextil deberá ser no tejido, agujado, libre de agujas, compuesto por fibras sintéticas. Las fibras usadas en la fabricación del geotextil deberán estar compuestas por un mínimo de 85% en peso de poliolefinos, poliéster o poliamidas. El geotextil

deberá estar libre de defectos o imperfecciones que puedan afectar significativamente sus propiedades físicas. La tabla 4.7 presenta la ficha técnica del geotextil especificado.

Tabla 4.7: Ficha técnica del geotextil no tejido punzonado empleado para la función de filtración.

PROPIEDADES	ENSAYO	UND	VALOR MARV
Método Grab			
Resistencia a la Tracción	ASTM D 4632	N	700
Elongación		%	>50
Método Tira Ancha			
Sentido Longitudinal	ASTM D 4595	kN/m	12
Elongación		%	>50
Sentido Transversal	ASTM D 4595	kN/m	11
Elongación		%	>50
Resistencia al desgarre trapezoidal	ASTM D 4533	N	250
Resistencia al punzonado	ASTM D 4833	N	400
Resistencia al punzonado CBR	ASTM D 6241	kN	1.80
Resistencia al estallido	ASTM D 3786	kPa	2050
Permisividad	ASTM D 4491	s ⁻¹	1.90
Permeabilidad	ASTM D 4491	cm/s	0.30
Tamaño de abertura aparente(TAA)	ASTM D 4751	mm	0.150
Tasa de flujo	ASTM D 4491	l/min/m ²	5110
Estabilidad a rayos ultravioleta ⁽¹⁾	ASTM D 4355	%	>70

Notas (correspondientes a las descritas por el fabricante):

El MARV (valor mínimo promedio de rollo) es un valor estadístico igual al valor promedio menos dos veces la desviación estándar.

⁽¹⁾ Después de 500 horas de exposición

Almacenaje de los geotextiles

Los rollos de geotextil deben contar con una envoltura para protección contra la humedad y la exposición a los rayos ultravioleta antes de su colocación. Su almacenamiento debe protegerlos de estas condiciones igualmente. En caso sean almacenados a la intemperie, debe evitarse el contacto de los rollos con la superficie del suelo y deben protegerse con una cobertura impermeabilizante. El geotextil no debe estar expuesto más de 14 días a rayos ultravioletas para evitar una reducción de cualquiera de sus propiedades.

Proceso de instalación

El área de instalación debe ser preparada perfilándose y dejándose libre de obstrucciones que puedan dañar el geotextil. No debe permitirse la presencia de piedras, excesivo polvo o humedad en el geotextil. El contratista no debe operar ningún equipo directamente sobre el geotextil.

La colocación del geotextil se debe realizar cubriendo totalmente el perímetro de la zanja, acomodándose lo más ajustado posible a la parte inferior y a las paredes laterales de esta. Debe dejarse por encima del subdrén la cantidad de geotextil necesario para que, una vez se acomode el material filtrante, se cubra en su totalidad. Debe emplearse un traslape de treinta centímetros para envolver el material granular contenido en el subdrén.

Las franjas sucesivas de geotextil se deben traslapar longitudinalmente en 45 centímetros. Es preferible cocer el geotextil, de manera que se garantice la continuidad del elemento filtrante. No debe permitirse que el geotextil quede expuesto por un lapso mayor de dos semanas.

El material filtrante, debe colocarse dentro de la zanja en capas con el espesor autorizado por el supervisor y empleando un método que no dañe el geotextil.

Para la instalación de la tubería corrugada de 4 pulgadas debe colocarse sobre un solado de 10 centímetros de espesor. El material y tipo de tubería están sustentado técnicamente. Debe asegurarse que las partículas granulares de subdrén no produzcan algún daño en la tubería.

Los geotextiles dañados o contaminados deben ser reparados inmediatamente. Las reparaciones deben ser hechas con el mismo tipo del geotextil original. Las áreas dañadas que excedan del 10% del ancho del rollo, deben ser removidas y reemplazadas a todo lo ancho con material nuevo. Las áreas dañadas menores al 10% de ancho, deben ser parchadas. El parche de geotextil debe contar con 45 cm adicional del perímetro del área dañada en todas las direcciones. El cosido de los parches puede ser hecho manualmente o con máquina.

Método de medición

El geotextil debe ser medido en metros cuadrados desde las líneas de pago señaladas en los planos o establecidas por escrito sin considerar los traslapes.

Bases de pago

Las cantidades aceptadas de geotextil deben ser pagadas al precio unitario por metro cuadrado indicado en el contrato.

4.3. Diseño con geomallas para la función de refuerzo

Para el caso de estudio, se realizó un diseño con una geomalla triaxial TX160 para la optimización del pavimento. De esta forma, se buscó reducir el espesor de algunas capas del diseño convencional. Los criterios de diseño inicial fueron tomados de la norma AASHTO R-50 y del GMA White Paper II y desarrollados en Visual Studio. El diseño final del pavimento se realizó empleando el software Spectra Pave4-Pro proporcionado por el mismo proveedor del material. A continuación, se presentó el diseño por especificación basado en la norma AASHTO R-50 y el diseño definitivo empleando el programa de la empresa TENSAR para la optimización del pavimento. Por último, se emplearon los datos obtenidos para el análisis técnico y económico. Así, se pudo evaluar la viabilidad del uso de la geomalla para esta aplicación.

4.3.1. Diseño por especificación

El diseño desarrollado a continuación consistió en exponer los conceptos presentado en la norma AASHTO R-50 y en el GMA White Paper II (también un documento de la AASHTO). En este caso, se empleó el concepto de BCR el cual se define como la

relación entre los espesores de un pavimento reforzado con geomalla respecto a uno sin geomalla de refuerzo. Los parámetros para el diseño de la sección 1 de la carretera fueron los siguientes:

- Diseño estructural de la sección:
 - D1: 2.4 pulgadas, a1: 0.57
 - D2: 8 pulgadas, a2: 0.14, m2: 1
 - D3: 8 pulgadas, a3: 0.11, m3: 1
- Parámetros de diseño de la carretera:
 - Confiabilidad (R): 90%
 - Desviación estándar nominal (Z_r): -1.282
 - Desviación estándar global (S_o): 0.45
 - Índice de serviciabilidad inicial (P_i): 4.2
 - Índice de serviciabilidad final (P_t): 2
 - Módulo de resiliencia (M_r): 10350 PSI
- Característica de la geomalla para diseño preliminar:
 - BCR: 2 (valor referencial)

Cálculo del número estructural (SN) y W18 del pavimento con geomalla

$$SN1 = a1 * D1 = 0.57 * 2.4 = 1.37$$

$$SN2 = a2 * m2 * D1 = 0.14 * 1 * 8 = 1.12$$

$$SN3 = a3 * m3 * D3 = 0.11 * 1 * 8 = 0.88$$

$$SN = SN1 + SN2 + SN3 = 1.37 + 1.12 + 0.88 = 3.37$$

Reemplazando en la fórmula AASHTO-1993 se calculó el valor de W18:

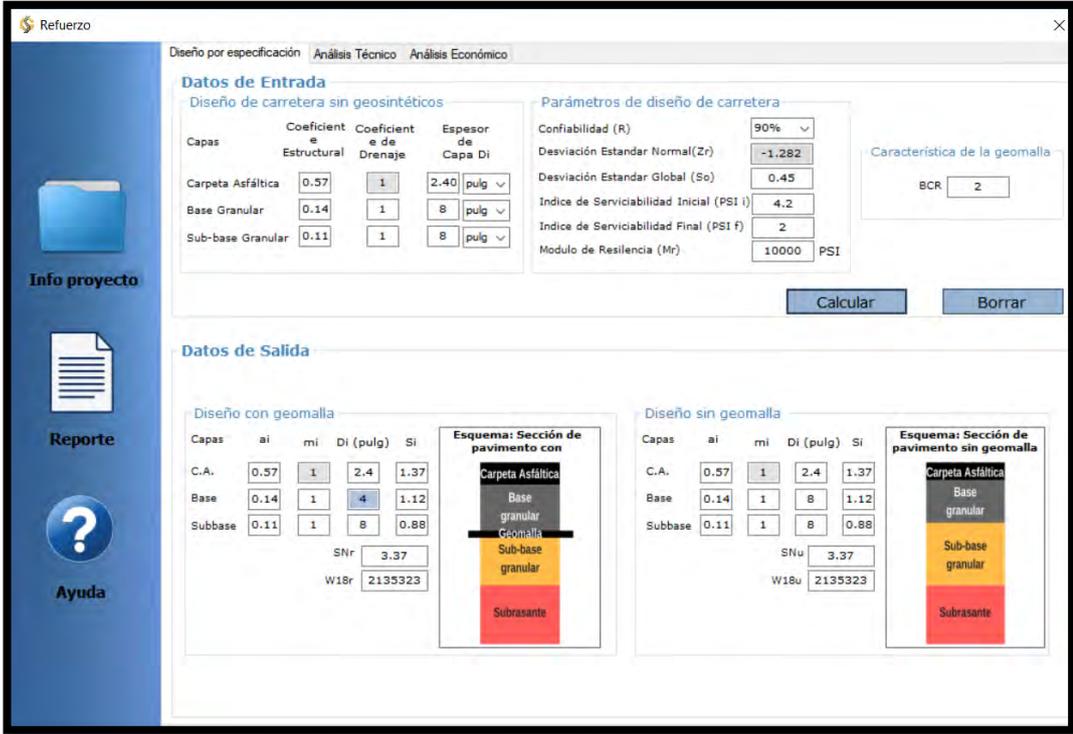
$$\log_{10}(W_{18c}) = -1.282 * 0.45 + 9.36 * \log_{10}(3.37 + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{4.2 - 2}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(3.37 + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(10350) - 8.07$$

El valor de W18 obtenido para el pavimento con geotextil fue: $W_{18c} = 2312732$ ESAL's

Cálculo de espesor de base en pavimento reforzado con geomalla

$$D_{2R} = \frac{SN_{\text{no reforzado}} - a_1 * D_1 - a_3 * m_3 * D_3}{BCR * a_2 * m_2} = \frac{3.37 - 0.57 * 3.4 - 0.11 * 1 * 8}{2 * 0.14 * 1} = 4 \text{ pulg}$$

La figura 4.11 presenta el formato desarrollado en Visual Studio relacionado al diseño descrito anteriormente. En este, es importante ingresar el diseño convencional del pavimento, los parámetros de diseño del mismo y el BCR correspondiente a la geomalla a emplear.



The screenshot shows the 'Refuerzo' software interface with the following data:

Datos de Entrada

Diseño de carretera sin geosintéticos

Capas	Coefficient e Estructural	Coefficient e de Drenaje	Espesor de Capa Di
Carpeta Asfáltica	0.57	1	2.40 pulg
Base Granular	0.14	1	8 pulg
Sub-base Granular	0.11	1	8 pulg

Parámetros de diseño de carretera

Confiabilidad (R)	90%
Desviación Estándar Normal (Zr)	-1.282
Desviación Estándar Global (So)	0.45
Índice de Serviciabilidad Inicial (PSI I)	4.2
Índice de Serviciabilidad Final (PSI f)	2
Modulo de Resiliencia (Mr)	10000 PSI

Característica de la geomalla: BCR = 2

Datos de Salida

Diseño con geomalla

Capas	ai	mi	Di (pulg)	Si
C.A.	0.57	1	2.4	1.37
Base	0.14	1	4	1.12
Subbase	0.11	1	8	0.88

SNr = 3.37
W18r = 2135323

Esquema: Sección de pavimento con geomalla

Carpeta Asfáltica
Base granular
Geomalla
Sub-base granular
Subrasante

Diseño sin geomalla

Capas	ai	mi	Di (pulg)	Si
C.A.	0.57	1	2.4	1.37
Base	0.14	1	8	1.12
Subbase	0.11	1	8	0.88

SNu = 3.37
W18u = 2135323

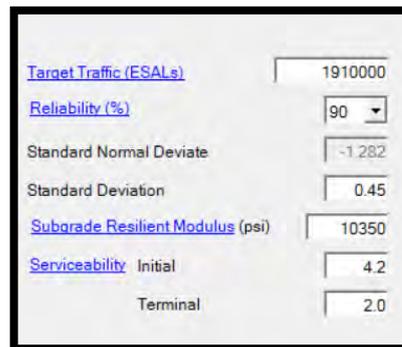
Esquema: Sección de pavimento sin geomalla

Carpeta Asfáltica
Base granular
Sub-base granular
Subrasante

Figura 4.11: Diseño empleando normal AASHTO R-50 y GMA White Paper II desarrollado en Visual Studio.

4.3.2. Diseño con programa Spectra Pave4-Pro

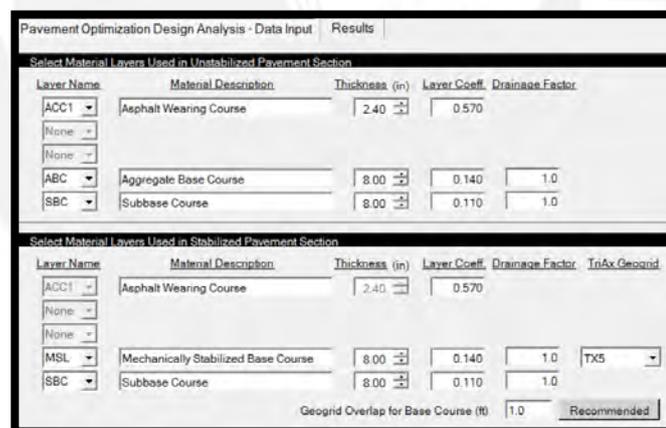
Se realizó el diseño definitivo con una geomalla triaxial TX160 empleando el programa de la empresa TENSAR. Los valores de BCR ya estaban incluidos dentro del programa por lo que no fueron ingresados manualmente. A continuación, se describió el procedimiento realizado para obtener la optimización de la primera sección del pavimento en estudio. Para el diseño del tramo 1 se tomaron en cuenta los parámetros de tráfico presentados en la figura 4.12.



Target Traffic (ESALs)	1910000
Reliability (%)	90
Standard Normal Deviate	-1.282
Standard Deviation	0.45
Subgrade Resilient Modulus (psi)	10350
Serviceability Initial	4.2
Terminal	2.0

Figura 4.12: Parámetros de tráfico ingresados en programa Spectra Pave4-Pro.

Luego de colocar los parámetros de tráfico, fue necesario ingresar los coeficientes y espesores del diseño estructural del pavimento sin refuerzo. En la figura 4.13 se puede observar que en la parte superior se piden estos parámetros y en la parte inferior se piden los parámetros del pavimento reforzado. Para empezar con el diseño, se puede colocar los mismos valores para ambas estructuras. Al realizar esto, el primer resultado obtenido sería una comparación directa entre dos pavimentos con espesores iguales, pero uno con el aporte estructural de la geomalla.



Layer Name	Material Description	Thickness (in)	Layer Coeff.	Drainage Factor	TriAx Geogrid
ACC1	Asphalt Wearing Course	2.40	0.570		
None					
None					
ABC	Aggregate Base Course	8.00	0.140	1.0	
SBC	Subbase Course	8.00	0.110	1.0	

Layer Name	Material Description	Thickness (in)	Layer Coeff.	Drainage Factor	TriAx Geogrid
ACC1	Asphalt Wearing Course	2.40	0.570		
None					
None					
MSL	Mechanically Stabilized Base Course	8.00	0.140	1.0	TX5
SBC	Subbase Course	8.00	0.110	1.0	

Geogrid Overlap for Base Course (ft) 1.0 Recommended

Figura 4.13: Parámetros ingresados en programa Spectra Pave4-Pro.

Una vez colocados los datos requeridos, la pestaña de resultados donde se presenta los cálculos para ambos pavimentos ingresados. La figura 4.14 presenta estos valores obtenidos y se puede observar que el ESAL del pavimento reforzado fue 4.8 veces mayor respecto al pavimento sin geomalla mostrando su gran aporte del punto de vista técnico.

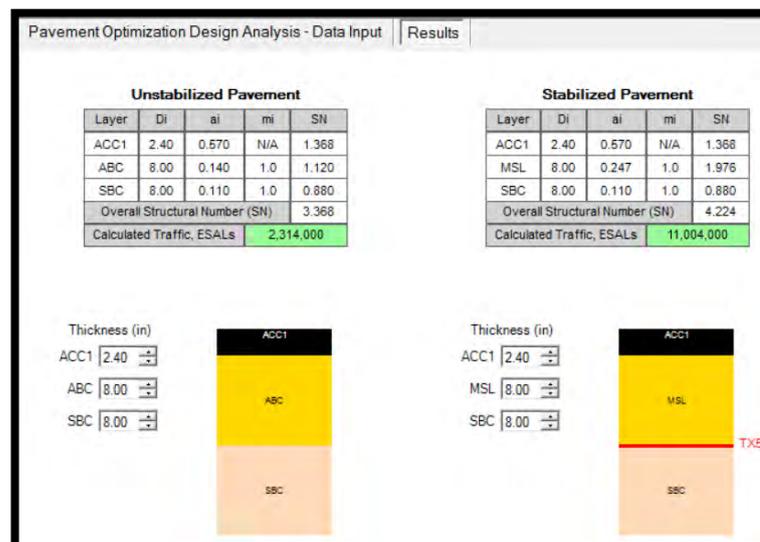


Figura 4.14: Aporte del uso de geomalla triaxial manteniendo espesores de capa en programa Spectra Pav4-Pro.

Luego, se realizó la optimización del pavimento reforzado que consistió en reducir los espesores de la base y de subbase de manera que el valor de ESAL del pavimento reforzado sea lo más cercano posible al pavimento no reforzado. La figura 4.15 presenta el procedimiento comentado.

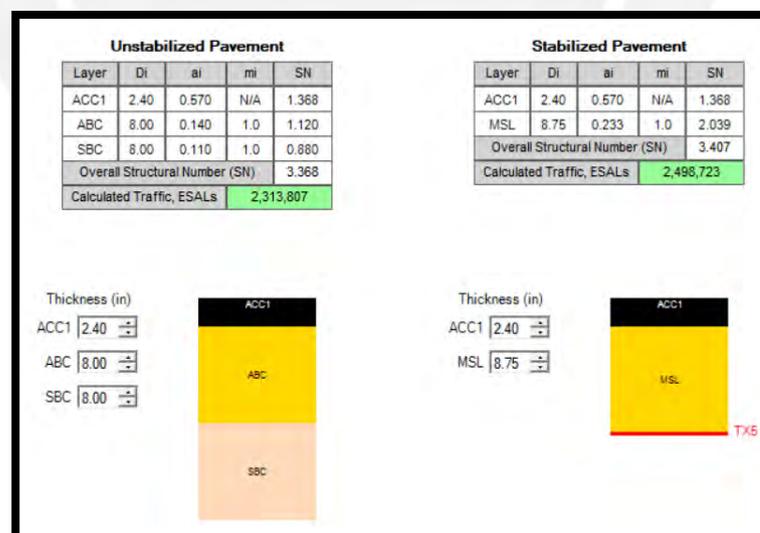


Figura 4.15: Optimización de pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pav4-Pro.

De esta forma se procedió para las 6 secciones y se obtuvieron los resultados siguientes:

Sector 1 KM 256+500-KM 261+500:

- CBR: 6.9%
- Mr: 10,350 PSI
- W18 de estudio de tráfico para 10 años: 1,910,000 ESAL's
- Diseño estructural de la sección sin refuerzo:
 - D1:2.4 pulgadas, a1: 0.57
 - D2: 8 pulgadas, a2: 0.14, m2: 1.00
 - D3: 8 pulgadas, a3: 0.11, m3: 1.00

Unstabilized Pavement					Stabilized Pavement				
Layer	Di	ai	mi	SN	Layer	Di	ai	mi	SN
ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368	ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368
ABC	8.00	0.140	1.0	1.120	MSL	8.75	0.233	1.0	2.039
SBC	8.00	0.110	1.0	0.880	Overall Structural Number (SN)				3.407
Overall Structural Number (SN)					Calculated Traffic, ESALs	2,498,723			
Calculated Traffic, ESALs	2,313,807								

Figura 4.16: Optimización de sección 1 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.

Sector 2 KM 261+500-KM 268+500:

- CBR: 11.1%
- Mr: 14,341.06 PSI
- W18 de estudio de tráfico para 10 años: 1,910,000 ESAL's
- Diseño estructural de la sección sin refuerzo:
 - D1:2.4 pulgadas, a1: 0.57
 - D2: 6 pulgadas, a2: 0.14, m2: 1.00
 - D3: 7 pulgadas, a3: 0.11, m3: 1.00

Unstabilized Pavement					Stabilized Pavement				
Layer	Di	ai	mi	SN	Layer	Di	ai	mi	SN
ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368	ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368
ABC	6.00	0.140	1.0	0.840	MSL	6.25	0.260	1.0	1.625
SBC	7.00	0.110	1.0	0.770	Overall Structural Number (SN)				2.993
Overall Structural Number (SN)					Calculated Traffic, ESALs	2,250,773			
Calculated Traffic, ESALs	2,177,624								

Figura 4.17: Optimización de sección 2 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.

Sector 3 KM 268+500-KM 277+500:

- CBR: 10.1%
- Mr: 13,487.46 PSI
- W18 de estudio de tráfico para 10 años: 1,340,000 ESAL's
- Diseño estructural de la sección sin refuerzo:
 - D1:2.4 pulgadas, a1: 0.57
 - D2: 6 pulgadas, a2: 0.14, m2: 1.00
 - D3: 6 pulgadas, a3: 0.11, m3: 1.00

Unstabilized Pavement					Stabilized Pavement					
Layer	Di	ai	mi	SN	Layer	Di	ai	mi	SN	
ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368	ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368	
ABC	6.00	0.140	1.0	0.840	MSL	6.00	0.265	1.0	1.590	
SBC	6.00	0.110	1.0	0.660						
Overall Structural Number (SN)				2.868	Overall Structural Number (SN)				2.958	
Calculated Traffic, ESALs				1,475,808	Calculated Traffic, ESALs				1,806,866	

Figura 4.18: Optimización de sección 3 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.

Sector 4 KM 277+500-KM 295+500:

- CBR: 12.8%
- Mr: 15,732.86 PSI
- W18 de estudio de tráfico para 10 años: 1,910,000 ESAL's
- Diseño estructural de la sección sin refuerzo:
 - D1:2.4 pulgadas, a1: 0.57
 - D2: 6 pulgadas, a2: 0.14, m2: 1.00
 - D3: 6 pulgadas, a3: 0.11, m3: 1.00

Unstabilized Pavement					Stabilized Pavement					
Layer	Di	ai	mi	SN	Layer	Di	ai	mi	SN	
ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368	ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368	
ABC	6.00	0.140	1.0	0.840	MSL	6.00	0.265	1.0	1.590	
SBC	6.00	0.110	1.0	0.660						
Overall Structural Number (SN)				2.868	Overall Structural Number (SN)				2.958	
Calculated Traffic, ESALs				2,109,530	Calculated Traffic, ESALs				2,582,746	

Figura 4.19: Optimización de sección 4 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.

Sector 5 KM 295+500-KM 303+500:

- CBR:10.2%
- Mr: 13,574.11 PSI
- W18 de estudio de tráfico para 10 años: 1,340,000 ESAL's
- Diseño estructural de la sección sin refuerzo:
 - D1:2.4 pulgadas, a1: 0.57
 - D2: 6 pulgadas, a2: 0.14, m2: 1
 - D3: 6 pulgadas, a3: 0.11, m3: 1

Unstabilized Pavement					Stabilized Pavement				
Layer	Di	ai	mi	SN	Layer	Di	ai	mi	SN
ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368	ACC1	2.40	0.570	N/A	1.368
ABC	6.00	0.140	1.0	0.840	MSL	6.00	0.265	1.0	1.590
SBC	6.00	0.110	1.0	0.660	Overall Structural Number (SN)		2.958		
Overall Structural Number (SN)				2.868	Calculated Traffic, ESALs		1,833,911		
Calculated Traffic, ESALs				1,497,898					

Figura 4.20: Optimización de sección 5 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.

Sector 6 KM 203+500-KM 308+840:

- CBR: 18%
- Mr: 19,635.79 PSI
- W18 de estudio de tráfico para 10 años: 1,340,000 ESAL's
- Diseño estructural de la sección sin refuerzo:
 - D1:2 pulgadas, a1: 0.57
 - D2: 6 pulgadas, a2: 0.14, m2: 1
 - D3: 6 pulgadas, a3: 0.11, m3: 1

Unstabilized Pavement					Stabilized Pavement				
Layer	Di	ai	mi	SN	Layer	Di	ai	mi	SN
ACC1	2.00	0.570	N/A	1.140	ACC1	2.00	0.570	N/A	1.140
ABC	6.00	0.140	1.0	0.840	MSL	6.00	0.265	1.0	1.590
SBC	6.00	0.110	1.0	0.660	Overall Structural Number (SN)		2.730		
Overall Structural Number (SN)				2.640	Calculated Traffic, ESALs		2,559,019		
Calculated Traffic, ESALs				2,060,388					

Figura 4.21: Optimización de sección 6 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.

4.3.3. Análisis técnico

El análisis técnico consistió en determinar el porcentaje de serviciabilidad adicional que presentó el diseño de pavimento optimizado respecto al pavimento inicial. Además, este análisis buscó identificar el porcentaje de serviciabilidad adicional que brinda el diseño con geomalla respecto al tráfico requerido de diseño. La tabla 4.8 presenta los números estructurales, así como los valores de ESAL para cada tramo requeridos según el estudio de tráfico, el diseño convencional y el diseño con geomalla triaxial.

Tabla 4.8: Optimización de sección 6 del pavimento empleando geomalla triaxial mediante el uso del programa Spectra Pave4-Pro.

Tramo	Inicio	Término	Número estructural			ESAL		
	Km	Km	SN req	SN sin GM	SN con GM	ESAL req	ESAL sin GM	ESAL con GM
1	256+500	261+500	3.28	3.37	3.41	1,910,000	2,313,807	2,498,728
2	261+500	268+500	2.91	2.98	2.99	1,910,000	2,177,624	2,250,773
3	268+500	277+500	2.82	2.87	2.96	1,340,000	1,475,808	1,806,866
4	277+500	295+500	2.68	2.87	2.96	1,340,000	2,109,530	2,582,746
5	295+500	303+500	2.82	2.87	2.96	1,340,000	1,497,898	1,833,911
6	303+500	309+840	2.47	2.64	2.73	1,340,000	2,060,388	2,559,019

A partir de estos resultados, se efectuó el análisis comparativo entre la serviciabilidad que proporciona el uso de la geomalla respecto al diseño convencional y al tráfico de diseño requerido. Además, se pudo comparar la variación de serviciabilidad entre ambos diseños. La tabla 4.9 presenta los valores mencionados.

Tabla 4.9: Análisis técnico entre valores requeridos, de diseño convencional y con geomalla.

Tramo	Inicio	Término	Comparación de ESAL		
	Km	Km	ESAL sin GM respecto al Requerido (%)	ESAL con geomalla respecto al requerido (%)	ESAL con GM respecto al Sin geomalla (%)
1	256+500	261+500	21.14	30.82	7.99
2	261+500	268+500	14.01	17.84	3.36
3	268+500	277+500	10.13	34.84	22.43
4	277+500	295+500	57.43	92.74	22.43
5	295+500	303+500	11.78	36.86	22.43
6	303+500	309+840	53.76	90.97	24.20

4.3.4. Análisis económico

Este análisis consistió en comparar el pavimento optimizado, el cual considera la reducción de espesores de capas y la geomalla, respecto al pavimento inicial. Para esto, fue necesario tener como parámetros iniciales los espesores de capa de ambos pavimentos y los precios de los materiales empleados. La figura 4.22 presenta el formato realizado en Visual Studio para este caso. Los parámetros empleados para el análisis de la sección 1 fueron los siguientes:

- Espesor de capas de la sección no reforzada:
 - D1: 2.4 pulgadas
 - D2: 8 pulgadas
 - D3: 8 pulgadas
- Espesor de capas de la sección reforzada:
 - D1: 2.4 pulgadas
 - D2: 8.75 pulgadas
 - D3: 0 pulgadas
- Precio de los materiales:
 - Carpeta asfáltica: 190 dólares/m³
 - Base granular: 40 dólares/m³
 - Subbase granular: 32 dólares/m³

- Geomalla de refuerzo: 2.4 dólar/m²

Cálculo del precio por metro cuadrado del pavimento con geotextil

$$\text{Precio carpeta asfáltica} = D1 * P1 = 0.061 * 190 = 11.58 \$/\text{m}^2$$

$$\text{Precio base granular} = D2 * P2 = 0.203 * 40 = 8.89 \$/\text{m}^2$$

$$\text{Precio subbase granular} = D3 * P3 = 0 * 32 = 0 \$/\text{m}^2$$

$$\text{Precio total del pavimento} = 11.58 + 8.89 + 0 + 2.4 = 22.87 \$/\text{m}^2$$

Cálculo del precio por metro cuadrado del pavimento sin geotextil

$$\text{Precio carpeta asfáltica} = D1 * P1 = 0.061 * 190 = 11.58 \$/\text{m}^2$$

$$\text{Precio base granular} = D2 * P2 = 0.203 * 40 = 8.13 \$/\text{m}^2$$

$$\text{Precio subbase granular} = D3 * P3 = 0.203 * 32 = 6.50 \$/\text{m}^2$$

$$\text{Precio total del pavimento} = 11.58 + 8.13 + 6.50 = 26.21 \$/\text{m}^2$$

Comparación de costo de materiales del pavimento

Se buscó determinar el porcentaje de ahorro en materiales entre el pavimento con geomalla respecto al pavimento convencional. El cálculo realizado fue el siguiente:

$$\text{Ahorro en materiales: } \frac{\text{Precio}_{\text{sin gm}} - \text{Precio}_{\text{cong gm}}}{W_{\text{sin gm}}} * 100 = \frac{26.21 - 22.87}{26.21} * 100 = 12.74\%$$

La figura 4.22 presenta el formato realizado en Visual Studio para este análisis. Fue necesario contar con el diseño estructural del pavimento convencional y con el diseño optimizado con geomalla. Una estimación de los precios de los materiales también fue requerida para el análisis.

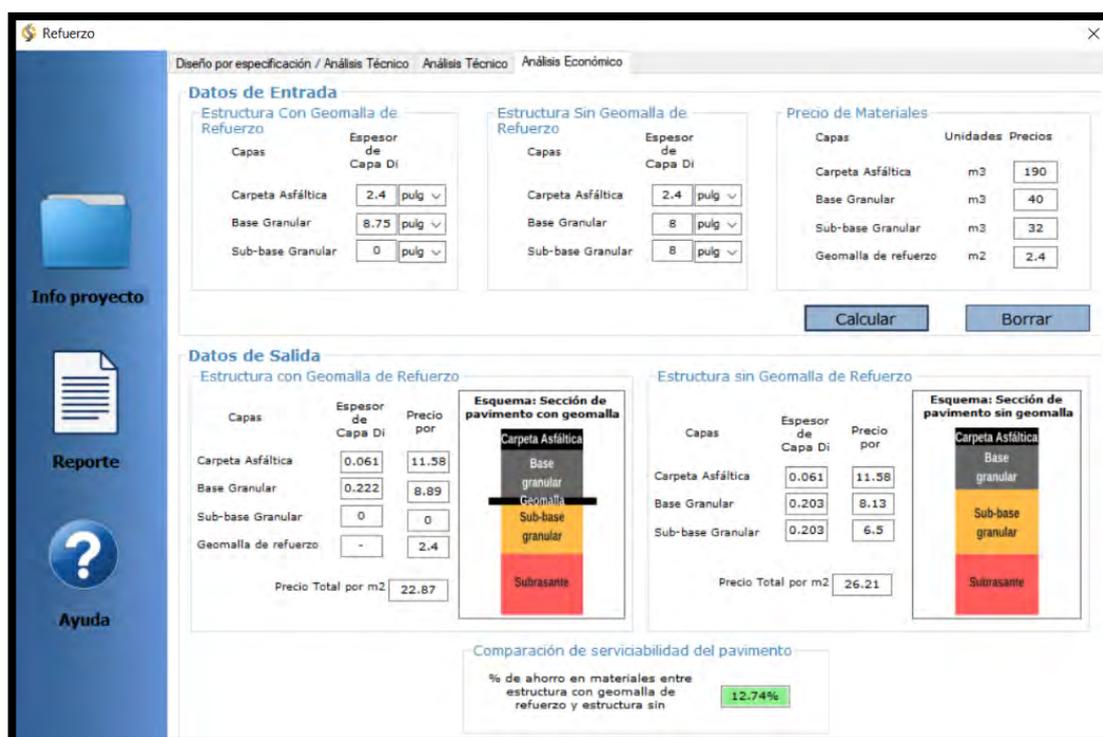


Figura 4.22: Análisis económico para la sección 1 empleando geomalla triaxial desarrollado en Visual Studio.

El análisis económico presentado se realizó para los seis sectores. La tabla 4.10 muestra el ahorro económico en forma porcentual entre el pavimento con geomalla respecto al pavimento convencional.

Tabla 4.10: Análisis económico de la optimización de pavimento.

Tramo	1	2	3	4	5	6
Porcentaje ahorrado (%)	12.74	12.99	10.98	10.98	10.98	12.01

4.3.5. Especificaciones técnicas

Esta especificación está relacionada a los requisitos necesarios para el uso de geomalla como refuerzo para la optimización de pavimentos flexibles. De esta forma se busca reducir los espesores de material granular empleado en un diseño convencional. La ficha técnica de la geomalla especificada para el proyecto, el proceso de almacenaje e instalación y la forma de medición y pago están incluidas. La información empleada a continuación está basada en indicaciones del proveedor del material.

DESCRIPCIÓN

Este trabajo consiste en la provisión e instalación de una geomalla triaxial polimérica aplicada como refuerzo debajo de la base granular. Su aplicación tiene como finalidad la reducción de los espesores convencionales de base y/o subbase granular. Este resultado puede lograrse mediante el aporte estructural de la geomalla principalmente por el confinamiento lateral de las partículas del agregado.

MATERIALES

La geomalla TX160 está manufacturada a partir de láminas de resinas de polipropileno, perforadas y estiradas en tres direcciones. De esta forma se logra formar costillas y uniones con una elevada rigidez. La configuración triangular generada brinda una alta resistencia a los daños por instalación. Además, esta configuración garantiza una alta resistencia a la deformación. La geomalla es inerte a ataques químicos y biológicos y resistente a procesos degenerativos de los suelos. Además, soportan cargas dinámicas aplicadas por el tráfico en cualquier dirección dentro de su plano.

La geomalla TX160 genera una transmisión radial de esfuerzos al suelo de fundación, mediante trabazón mecánica con suelo compactado o materiales de relleno. Además, su rigidez a la flexión facilita su colocación sobre suelos pobres o húmedos. Su rigidez torsional por su parte ayuda a soportar cualquier rotación en el plano causada por efecto de fuerzas provocadas por el tránsito vehicular. Es por ello que la geomalla es apropiada para mejorar la capacidad de soporte de un pavimento. La tabla 4.11 presenta las propiedades que debe poseer la geomalla estructural TX160 según el proveedor.

Tabla 4.11: Ficha técnica de la geomalla TX160 para la función de refuerzo.

Propiedades	Longitudinal	Diagonal	Transversal	General
Distancia entre costillas paralelas, mm (in) ⁽²⁾	40 (1.60)	40 (1.60)	-	
Profundidad al centro de la costilla, mm (in) ⁽²⁾	-	1.6 (0.06)	1.4 (0.06)	
Ancho al centro de la costilla, mm (in) ⁽²⁾	-	1.0 (0.04)	1.2 (0.05)	
Forma de la costilla				rectangular
Forma de la apertura				triangular
Integridad Estructural				
Eficiencia en las juntas ⁽³⁾ %				93
Rigidez radial a bajas deformaciones, ⁽⁴⁾ (kN/m @ 0.5% deformación)				300
Rigidez radial a bajas deformaciones, ⁽⁴⁾ (lb/ft @ 0.5% deformación)				20,580
Durabilidad				
Resistencia a la degradación química ⁽⁵⁾				100%
Resistencia a la degradación por luz ultravioleta y condiciones ambientales ⁽⁶⁾				70%

Notas (correspondientes a las descritas por el fabricante):

- (1) A menos que se indique lo contrario, estos valores corresponden a valores MARV determinados por el método de ASTM D4759-02. Estos, son iguales a los valores promedio menos dos veces la desviación estándar.
- (2) Dimensiones nominales.
- (3) Capacidad de transferencia de carga determinada de acuerdo con ASTM D6637-10 y ASTM D7737-11 y expresada como un porcentaje de la tracción última.
- (4) La rigidez radial se determina a partir de la rigidez a la tracción medida en cualquier eje en el plano de la prueba de acuerdo con ASTM D6637-10.
- (5) Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o integridad estructural cuando se lo somete a ambientes químicamente agresivos de acuerdo con la EPA 9090 prueba de inmersión.
- (6) Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o integridad estructural cuando se somete a 500 horas de luz ultravioleta y a la intemperie agresiva en conformidad con ASTM D4355-05.

Almacenamiento

Los rollos de geomalla deben contar con una envoltura para protección contra la humedad y la exposición a los rayos ultravioleta antes de su colocación. Su almacenamiento debe protegerlos de estas condiciones igualmente. En caso sean almacenados a la intemperie, debe evitarse el contacto de los rollos con la superficie del suelo y deben protegerse con una cobertura impermeabilizante. La geomalla no debe estar expuesta más de 6 meses a rayos ultravioleta para evitar una reducción de cualquiera de sus propiedades. Además, debe asegurarse que la geomalla se encuentre almacenada en una zona cuya temperatura supere los -29°C (20°F) y no debe ser manipulada a menos de -10°C (14°F). Los rollos deben colocarse de forma horizontal y pueden apilarse como máximo a una altura de 5 rollos para evitar su deformación.

Proceso constructivo

El área de instalación debe ser preparada perfilándose y dejándose libre de obstrucciones que puedan dañar la geomalla. No debe permitirse la presencia de piedras, excesivo polvo o humedad en la geomalla. Debe pasarse un rodillo liviano

sobre la subrasante para acomodar los materiales inapropiados. El contratista no debe operar ningún equipo directamente sobre la geomalla

Luego, debe desenrollarse la geomalla en la dirección del tráfico de construcción sobre la superficie preparada. Los rollos de geomalla deben contar con un traslape de 30 centímetros en la dirección de la colocación del material. El rollo debe ser fijado con pines, sacos de arena o rocas antes de la desenrollar de la geomalla.

En las curvas de la carretera, la geomalla debe ser cortada. El traslape debe ser hecho en la dirección de la construcción y también puede ser fijado como se describió anteriormente. El geotextil no debe ser arrastrado sobre la subrasante bajo ninguna circunstancia.

Aquellas geomallas dañadas deben ser reparadas empleando parches. El área dañada más 50 centímetros alrededor de dicha área, debe ser limpiada de todo material de relleno. Luego, debe realizarse un parche de 50 centímetros más allá del perímetro del área dañada.

El agregado debe colocarse vaciando desde el extremo más cercano al geotextil o sobre el agregado colocado previamente. El agregado debe ser esparcido desde una pila usando un tractor empujador. No debe permitirse el tráfico directamente sobre el geotextil. Debe evitarse las paradas bruscas y los giros intempestivos del equipo sobre el agregado que se encuentre sobre el geotextil.

Método de medición

La geomalla debe ser medida en metros cuadrados considerando las secciones indicadas en los planos y/o de las indicadas por escrito por la supervisión.

Bases de pago

La cantidad de geomalla a colocar debe pagarse al precio unitario por metro cuadrado el cual debe figurar en el contrato.

5. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN, ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMENTARIOS DE LOS DISEÑOS DESARROLADOS PARA CASO DE ESTUDIO

5.1. Diseño con geotextil para la función de separación

El diseño desarrollado facilitó la determinación de las propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas necesarias del material para que pueda soportar las condiciones de campo y el daño durante la instalación. El geotextil especificado fue un geotextil comercial GT320P y su ficha técnica se presentó en la tabla 4.3. El análisis técnico y económico se realizó teniendo en cuenta el diseño estructural de cada sección y en base a precios referenciales de los materiales empleados. La tabla 5.1 presenta el análisis desarrollado, el cual consistió en asumir distintos espesores contaminados de subbase para identificar el porcentaje de reducción de serviciabilidad del pavimento. Los valores presentados del análisis técnico muestran el aumento de serviciabilidad de forma porcentual del pavimento con geotextil respecto al pavimento que no lo emplea. Luego, se realizó el análisis económico correspondiente comparando el costo de dos pavimentos:

- pavimento que emplea un espesor adicional de subbase llamado espesor de sacrificio
- pavimento que mantiene los espesores de sus capas pero que emplea un geotextil de separación

Los valores presentados en el análisis económico muestran el ahorro de forma porcentual del pavimento con geotextil respecto al pavimento que emplea espesor de sacrificio.

Tabla 5.1: Análisis técnico y económico respecto al uso de geotextil de separación entre subbase y subrasante

Tramo	Tipo de análisis	Espesores analizados									
		0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
1	A. Técnico	5.4	10.4	15.3	19.9	24.3	28.5	32.5	36.3	39.9	43.3
	A. Económico	-3.02	-2.23	-1.46	-0.69	0.06	0.8	1.53	2.25	2.96	3.65
2	A. Técnico	5.9	11.5	16.8	21.9	26.6	31.1	35.4	39.4	43.2	46.8
	A. Económico	-3.38	-2.5	-1.63	-0.77	0.07	0.89	1.7	2.5	3.29	4.06
3	A. Técnico	6.1	11.9	17.3	22.5	27.4	32	36.3	40.4	44.3	48
	A. Económico	-3.5	-2.59	-1.69	-0.8	0.07	0.92	1.76	2.59	3.4	4.2
4	A. Técnico	6.1	11.9	17.3	22.5	27.4	32	36.3	40.4	44.3	48
	A. Económico	-3.5	-2.59	-1.69	-0.8	0.07	0.92	1.76	2.59	3.4	4.2
5	A. Técnico	6.1	11.9	17.3	22.5	27.4	32	36.3	40.4	44.3	48
	A. Económico	-3.5	-2.59	-1.69	-0.8	0.07	0.92	1.76	2.59	3.4	4.2
6	A. Técnico	6.5	12.7	18.5	23.9	29.1	33.9	38.4	42.7	46.7	50.5
	A. Económico	-3.83	-2.82	-1.84	-0.87	0.07	1	1.92	2.81	3.69	4.55

Para el análisis técnico se partió del concepto de la propia función de separación de un geotextil que consiste en evitar la mezcla de los materiales adyacentes conservando los espesores efectivos de diseño. Al comparar el desempeño de los pavimentos analizados se pudo observar que el uso del geotextil separador ayudó a evitar una pérdida considerable de serviciabilidad del pavimento. Con una reducción de subbase de sólo 0.5 pulgadas la serviciabilidad disminuyó en más de 10% en todos los tramos. Esto confirmó parcialmente la hipótesis inicial ya que la aplicación del geotextil en este caso fue beneficioso del punto de vista técnico.

En cuanto al análisis económico, la comparación se realizó entre un pavimento con un espesor de sacrificio respecto a un pavimento que incluya un geotextil de separación. Se pudo observar que para un espesor de material contaminado mayor a 1 pulgadas el uso de un geotextil resultaría más viable económicamente en lugar de emplear un espesor de sacrificio.

5.2. Diseño con geotextil para la función de filtración

El diseño realizado consistió en asegurar la supervivencia del material y determinar sus propiedades hidráulicas últimas mediante el diseño por función. En cuanto al diseño por función, se pudo observar que los valores obtenidos estuvieron muy por debajo de los criterios de supervivencia de la norma AASHTO 288-96. Por ello, el geotextil se diseñó de forma que se asegure su supervivencia a los daños de instalación. Se observó que para los tramos 1, 2, 3, 4 y 6 el valor del Cu fue inferior a 3, por lo que se empleó, según los criterios de la FHWA, los valores obtenidos de AOS del criterio de retención. EL TAA del tramo 5 se definió mediante el criterio de colmatación. Además, se observó que los criterios para la estimación de la permitividad de la FHWA corresponden a los de la norma AASHTO M288-96. En cuanto a la elección del material, el geotextil comercial GT240 fue el que cumplió con ambos diseños y su ficha técnica se presentó en la tabla 4.7.

Por otro lado, del análisis técnico se observó que una reducción de sólo 0.1 del coeficiente de permeabilidad reduce 30% la serviciabilidad del pavimento. Esto indica que un sistema de drenaje sería fundamental para asegurar la correcta recolección y drenaje del agua infiltrada para preservar la durabilidad de este.

En cuanto al análisis económico se pudo observar que en caso el tiempo de vida real de un pavimento sin subdrenaje sea mayor a 6 años sería más rentable no emplear subdrenes. En caso contrario, el uso de subdrenes sería más viable económicamente. Por lo tanto, a mayor diferencia entre el tiempo de vida real de los pavimentos analizados, el costo neto anual del pavimento con geotextil se vuelve más rentable.

5.3. Diseño con geomalla para la función de refuerzo

El diseño con geomalla de refuerzo tiende a ser complejo debido a que el comportamiento de cada geomalla depende del tipo de geomalla y de su manufactura. Según el fabricante, los valores de BCR, LCR o TBR de este material varían y por consecuencia influyen en el diseño estructural del pavimento de forma distinta. Es por ello, que para realizar el diseño definitivo se empleó una geomalla comercial TX160 de la empresa TENSAR. La tabla 5.2 presenta los valores de coeficiente estructural empleados por el programa SpectraPave4-Pro para el diseño con esta geomalla en

particular. Estos coeficientes fueron estimados de forma empírica por la misma empresa y dependen del módulo de resiliencia del pavimento y del espesor de la base.

Tabla 5.2: Valores de coeficiente estructural empleados en el programa SpectraPave4-Pro para el diseño con geomalla.

Espesor de base (pulg)	Módulo de resiliencia de la subrasante(psi)				
	5000	6500	8000	9500	11000
6	0.273	0.271	0.269	0.267	0.265
8	0.247	0.245	0.243	0.240	0.238
10	0.231	0.229	0.227	0.225	0.223
12	0.216	0.214	0.212	0.211	0.209
14	0.205	0.204	0.202	0.201	0.199
16	0.197	0.196	0.194	0.193	0.192
18	0.191	0.189	0.188	0.187	0.186

Teniendo en cuenta lo comentado, el diseño del pavimento reforzado consistió en colocar los parámetros de diseño y el diseño estructural inicial para un tiempo de vida 10 años. A partir de esto, se obtuvieron los diseños evitando emplear espesores de base menores a 15 cm ya que no son recomendables según la AASHTO-1993. La tabla 5.3 muestra enmarcado en rojo, los valores mínimos recomendados para un tráfico entre 500,001 a 2,000,000 ESAL's. Los valores obtenidos del estudio de tráfico del proyecto para el tiempo de diseño de 10 años fueron de 1,340,000 y 1,910,000 ESAL's los cuales se encuentran en el rango comentado.

Tabla 5.3: Espesores mínimos recomendables de concreto asfáltico y base según ESAL (AASHTO, 1993).

Minimum Thickness (inches)		
Traffic, ESAL's	Asphalt Concrete	Aggregate Base
Less than 50,000	1 0 (or surface treatment)	4
50,001-150,000	2 0	4
150,001-500,000	2 5	4
500,001-2,000,000	3 0	6
2,000,001-7,000,000	3 5	6
Greater than 7,000,000	4 0	6

En cuanto a los espesores de la carpeta asfáltica empleados en el proyecto, se puede comentar que fueron inferiores a los recomendados. Esto se debió a que el concreto

asfáltico fue una mezcla modificada con polímeros SBS la cual posee un coeficiente estructural 1.3 veces mayor a una mezcla convencional. Es por esto que se empleó para el proyecto un espesor de 2 y 2.4 pulgadas para los tramos.

Una vez realizada la optimización del pavimento, se obtuvieron los resultados de la tabla 5.4 los cuales corresponden al análisis técnico y económico de las estructuras diseñadas.

Tabla 5.4: Análisis técnico y económico respecto al uso de geomalla de refuerzo de base para optimización de pavimento.

Tramo	Inicio	Término	Análisis técnico		Análisis económico
	Km	Km	ESAL con geomalla respecto al requerido (%)	ESAL con GM respecto al Sin geomalla (%)	Ahorro entre pavimento con GM respecto a diseño convencional (%)
1	256+500	261+500	30.82	7.99	12.74
2	261+500	268+500	17.84	3.36	12.99
3	268+500	277+500	34.84	22.43	10.98
4	277+500	295+500	92.74	22.43	10.98
5	295+500	303+500	36.86	22.43	10.98
6	303+500	309+840	90.97	24.20	12.01

En cuanto al análisis técnico, se pudo observar que, para los dos primeros tramos, el diseño realizado con geomalla mantuvo una serviciabilidad similar respecto al diseño convencional. Esto se logró, eliminado el material de la subbase y aumentando un espesor adicional de base en el diseño. Para las otras secciones, el uso de geomalla aumentó en más de 20% la serviciabilidad del pavimento respecto al diseño inicial sólo eliminando la subbase. Por lo tanto, el uso de la geomalla redujo considerablemente la cantidad de material a emplear ya que para todos los tramos se eliminó la subbase granular que representaba entre 15 a 20 cm de espesor del pavimento.

Del punto de vista económico, se pudo observar que el uso de geomalla resulto más rentable debido a la importante reducción de espesor respecto al diseño convencional. Para los precios referenciales empleados, se obtuvo un ahorro mayor al 10% al optimizar el pavimento con geomalla para todos los sectores.

Se puede concluir entonces, que el uso de geomalla para la aplicación empleada sería viable técnica y económicamente en el proyecto.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al diseño y análisis realizado podemos concluir lo siguiente:

- El geotextil especificado para la función de separación fue el geotextil GT320P. Este cumplió tanto con el diseño por especificación y con el diseño por función. En caso se desee emplear un geotextil de otro proveedor, será necesario verificar que sus propiedades mecánicas e hidráulicas cumplan con los diseños realizados. Además, deberá evaluarse la diferencia de precios de las distintas marcas seleccionadas y la disponibilidad del material para elegir la opción más adecuada.

Desde el punto de vista técnico, se asumió que el uso de geotextil separador ayudaría a preservar el 100% los espesores de diseño del pavimento durante el tiempo de vida del proyecto. Comparando el pavimento con geotextil respecto al diseño convencional se determinó que para una contaminación de sólo media pulgada de subbase se perdía más de 10% de la serviciabilidad del pavimento. Se puede concluir entonces, que el uso del geotextil separador es fundamental para un correcto desempeño del pavimento. Sin embargo, no basta con una correcta elección del material. Para obtener buenos resultados en campo, la instalación del geotextil deberá ser realizada siguiendo ciertos lineamientos ya que influye directamente durabilidad del geotextil. Se ha demostrado que una de las principales fallas del material se debe a un inadecuado proceso de colocación (Koerner, 1997).

En cuanto al análisis económico, se concluyó, que habría mayor rentabilidad al emplear un geotextil separador en lugar de espesores de sacrificio mayores a 1 pulgada. Este análisis se realizó para un precio referencial del geotextil de 1 \$/m². El costo empleado podría incluso ser menor, para el cual, se observaría aún mayor rentabilidad al emplear un geotextil separador respecto a espesores de sacrificio.

- El geotextil especificado para la función de separación fue el geotextil GT 240. Al igual que para la función de separación, en caso se quiera emplear otro

geotextil, se deberá cumplir con las propiedades diseñadas y deberá compararse el precio y disponibilidad para su elección.

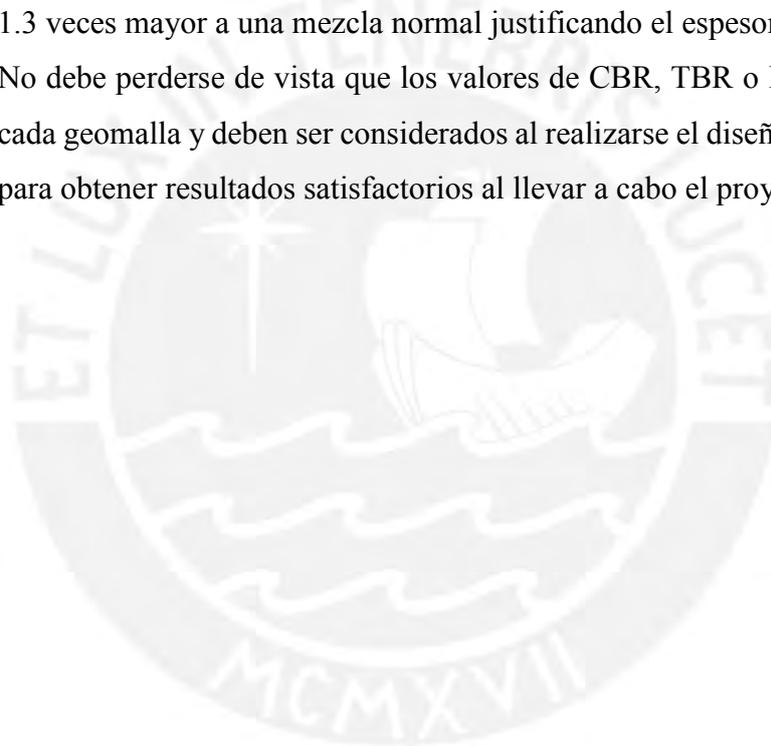
Del punto de vista técnico, se asumió que el uso de geotextil de filtración ayudaría a drenar toda el agua filtrada manteniendo el coeficiente de filtración de diseño del pavimento. A partir de esto, se determinó que al reducir sólo 0.1 de este coeficiente, el pavimento sin subdrenaje perdería más del 30% de su serviciabilidad. De esta forma, se justificaría el uso del subdrén envuelto en un geotextil. Para esta aplicación, también es de suma importancia la correcta colocación del material para la obtener resultados satisfactorios.

Por su parte, el análisis económico consistió en comparar el costo anual neto del pavimento sin subdrenaje para un tiempo de vida real respecto al pavimento con subdrenes. Se asumió que el pavimento con subdrenaje aseguraba la totalidad del tiempo de vida de este (10 años). Del análisis, se determinó que si el diseño sin subdrenaje aseguraba un tiempo de vida mayor a 6 años entonces el costo neto sería menor a otro pavimento. De lo contrario, el uso del sistema de drenaje sería más económico a largo plazo.

Vale recalcar, que el análisis económico también se podría realizar comparando el costo de distintos sistemas de subdrenaje. Por ejemplo, se podría analizar un drén francés sin geotextil respecto a uno con geotextil. En este caso, debería compararse el costo del material granular gradado del drén sin geotextil respecto al costo del otro (presentado en esta tesis). Se podría sumar a este análisis también, el uso de un geocompuesto de drenaje vertical, el cual requeriría menor ancho de zanja.

- En cuanto al diseño por refuerzo, se hizo uso de la geomalla triaxial TX160 aplicada para la optimización del pavimento. Se observó un impacto técnico positivo respecto al diseño convencional para todas las secciones. Para los tramos 3, 4, 5 y 6, se obtuvo más de 20% de serviciabilidad respecto al diseño convencional. Los tramos 1 y 2 aumentaron su espesor de base de 8.00 y 6.00 pulgadas a 8.75 y 6.25 pulgadas respectivamente ya que se eliminó la subbase del diseño. De esta forma, se logró que el pavimento supere la serviciabilidad del diseño convencional, pero no de manera significativa. El análisis económico por su parte, sustentó la optimización del pavimento realizada para todos los tramos ya que se estimó un ahorro de más del 10% en todos los casos.

Vale mencionar, que se realizó un diseño preliminar con una geomalla biaxial BX1100 y BX1200. Sin embargo, los resultados no fueron los esperados ya que se necesitaba emplear un espesor de base mucho mayor en todas las secciones al retirar la subbase. Esta última, tenía un espesor de 6 pulgadas en el diseño convencional, siendo lo mínimo recomendados por la norma AASHTO-1993. Por eso, la única opción para este diseño, fue retirar esta capa y encontrar una geomalla con un alto valor de LCR o BCR (como la TX160). La carpeta asfáltica por su parte, no cumplió con el espesor mínimo (3 pulgadas) presentado en la norma AASHTO, debido que se empleó una mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS. Esta, posee un coeficiente estructural 1.3 veces mayor a una mezcla normal justificando el espesor empleado. No debe perderse de vista que los valores de CBR, TBR o LCR dependen de cada geomalla y deben ser considerados al realizarse el diseño correspondiente para obtener resultados satisfactorios al llevar a cabo el proyecto.



7. REFERENCIAS

Abu-Farsakh, M., Hanandeh, S., Mohammad, L., & Chen, Q. (2016). *Performance of geosynthetic reinforced/stabilized paved roads built over soft soil under cyclic plate loads*. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(6), 845-853.

American Association of State Highway, & Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

American Association of State Highway, & Transportation Officials. (2009). *Standard Practice for Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base Course of Flexible Pavement Structures*. AASHTO Publication R 50-09. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

American Association of State Highway, & Transportation Officials. (2000). *GMA White Paper II*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

American Association of State Highway, & Transportation Officials. (1997). *Specification M288-96 on geotextiles*. Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.

Carroll, R.G., Jr. (1983). *Geotextile Filter Criteria, Engineering Fabrics in Transportation Construction, Transportation Research Record 916*. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Holtz, R. D., Christopher, B. R., & Berg, R. R. (2008). *Geosynthetic Design & Construction Guidelines: Reference Manual*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute.

Ministerio de transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras "Especificaciones técnicas generales para construcción"*. Ministerio de transportes y Comunicaciones.

Ministerio de transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*. Ministerio de transportes y Comunicaciones.

- Pavco, G. (2012). *Manual de diseño con geosintéticos*. Geosistemas Pavco.
- Perkins, S.W. (1999). *Mechanical Response of Geosynthetic Reinforced Flexible pavements*. Geosynthetics International, Vol. 6, No. 5.
- Koerner, G. R. (1997). *Data Base Development for Determination of Long Term Benefit/Cost of Geotextile Separators*, Vol. 2.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics*, Vol. 1. Xlibris Corporation.
- Koerner, R.M. (2014). *Geosynthetic Applications in Unpaved and Paved Roads*. 27th central PA Geotechnical conf. Hershey, PA, USA.
- Koerner, R. M. & Ko, F. K. (1982). *Laboratory Studies on Long-Term Drainage Capability of Geotextiles*. Proc. 2nd Int. Conf. Geotextiles, Aug. 1-6, IFAI Publ.
- Koerner, R. M., & Koerner, G. R. (2015). *Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions*. Geotextiles and Geomembranes, 43(3).
- Shukla, S. K. (2002). *Geosynthetics and their applications*. 1st edition, Thomas Telford Ltd.
- Shukla, S. K. (2016). *An Introduction to Geosynthetic Engineering*. CRC Press.
- Te Chow, V. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.
- Wu, H., Huang, B., Shu, X., & Zhao, S. (2015). *Evaluation of geogrid reinforcement effects on unbound granular pavement base courses using loaded wheel tester*. Geotextiles and Geomembranes.
- Zornberg, J.G., Gupta, R. (2010). *Geosynthetics in Pavements: North American Contributions*. Theme Speaker Lecture, Proceedings of the 9th Int. Conference on Geosynthetics, Guarujá, Brazil, May, Vol. 1.