

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS VENTAJAS DEL USO DEL SISTEMA DE
CONFINAMIENTO CELULAR (GEOCELDAS) EN LAS VÍAS DE ACCESO EN
PROYECTOS PETROLEROS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO,
FACTOR TIEMPO Y AMBIENTAL**

MARTIN ALFONSO CARVAJAL ZAMBRANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER
FACULTAD DE FISICOMECAÑICAS
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2013

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS VENTAJAS DEL USO DEL SISTEMA DE
CONFINAMIENTO CELULAR (GEOCELDAS) EN LAS VÍAS DE ACCESO EN
PROYECTOS PETROLEROS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO,
FACTOR TIEMPO Y AMBIENTAL**

MARTIN ALFONSO CARVAJAL ZAMBRANO

**Trabajo de grado para optar al título de
MAGISTER EN GEOTECNIA**

**Director
WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ
Ingeniero Msc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER
FACULTAD DE FISICOMECAÑICAS
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo y colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. SISTEMA DE GEOCELDAS	18
1.1 SISTEMA DE CONFINAMIENTO CELULAR (SCC)	18
1.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	31
1.2.1 Método racional para diseño de pavimentos.....	31
1.2.2 Modificación de módulos.....	34
1.2.3 Criterios de supervivencia del material	39
1.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	40
2. DESARROLLOS EN EL PAIS UTILIZANDO EL SCC.....	46
2.1 PROYECTO CAMPO PETROLERO RANCHO HERMOSO, CASANARE	46
2.2 INFRAESTRUCTURA VIAL CONCESIÓN VIAL DEVINORTE, CAJICA – ZIPAQUIRA.....	47
2.3 INFRAESTRUCTURA VIAL IDU, BOGOTÁ.....	48
3. POZO EXPLORATORIO TINKHANA – 1	50
3.1 UBICACIÓN	50
3.2 GEOLOGIA.....	51
3.3 DESCRIPCION DEL PROYECTO	54
3.4 VENTAJAS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONOMICO.....	59
3.5 VENTAJAS DESDE EL PUNTO DE VISTA TIEMPO DE EJECUCION.....	63
3.6 VENTAJAS DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL.....	66
4. CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS	76

TABLA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Distribución de esfuerzos en el sistema de geoceldas	19
Figura 2: Cohesión aparente calculada y explicada mediante el círculo de mohr .	20
Figura 3: Zona de falla en suelo sin estabilizar	21
Figura 4: Suelo estabilizado con un SCC	21
Figura 5: Transmisión de esfuerzos a la geocelda por carga aplicada	22
Figura 6: Confinamiento del material contenido en la celda	22
Figura 7: Esfuerzos de fricción en paredes de la celda	23
Figura 8: Estructura tridimensional del SCC	23
Figura 9: Comportamiento estructural de SCC en momento de flexión	24
Figura 10: Distribución de esfuerzos por efecto viga	26
Figura 11: Comportamiento de la estructura de pavimento con SCC	27
Figura 12: Esfuerzo en la interface a diferentes distancias del eje de aplicación de la carga para un SR no reforzada y una SR reforzada	28
Figura 13: Evolución de los polímeros a través del tiempo	30
Figura 14: Propiedades mecánicas de los diferentes materiales poliméricos	31
Figura 15: Estructura multicapa de un pavimento flexible	33
Figura 16: Esquema de esfuerzos y deformaciones para la estructura con y sin refuerzo	34
Figura 17: Estructura de pavimento	35
Figura 18: Abaco de módulos modificados de acuerdo con el MIF	37
Figura 19: Distribución del confinamiento en el área reforzada	38
Figura 20: Distribución del confinamiento de la zona reforzada	39
Figura 21: Sección típica a recuperar en la vía	56
Figura 22: Sección convencional propuesta	56
Figura 23: Proposed Neoweb	57
Figura 24: Section A-A P Lan Detail	58
Figura 25: Sección planteada con el SCC	59

Figura 26: Comparativo de tiempos de ejecución programados con sistema tradicional y la estructura reforzada con el SCC	65
Figura 27: Variación del módulo dinámico a lo largo de la vía	71
Figura 28: Variación de las deflexiones a lo largo de la vía	72
Figura 29: Módulos en percentil para cada uno de los sectores	73

TABLA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1: Reemplazo de material de baja capacidad portante por material competente	15
Imagen 2: Empalizadas para mejorar la capacidad portante de la subrasante	16
Imagen 3: Mejoramientos de subrasante con	
16 Imagen 4: Mejoramientos de Brasante	16
Imagen 5: Sistema basado en el panal de las abejas que es una de las estructuras más resistentes de la naturaleza.....	18
Imagen 6: Pavimento con características de fatiga.....	42
Imagen 7: Ejemplo de ahuellamiento en pavimentos.....	43
Imagen 8: Desarrollo constructivo instalación refuerzo SCC	46
Imagen 9: Instalación del SCC como refuerzo de la estructura	47
Imagen 10: Desarrollo del proceso constructivo con el SCC	49
Imagen 11: Ubicación general, sur de Colombia	50
Imagen 12: Ubicación específica en el Departamento del Putumayo	50
Imagen 13: Geología estructural de la región Amazónica de Colombia	52
Imagen 14: Detalle según mapa geológico de Colombia.....	53
Imagen 15: Esquema general del proyecto (vía de acceso y plataforma)	54
Imagen 16: características de la subrasante	55
Imagen 17: comportamiento al paso vehicular en el desarrollo del proyecto.....	55
Imagen 18: Características del terreno descapotado.....	60
Imagen 19: Presentación del SCC e instalación del Geotextil	61
Imagen 20: Proceso de instalación del SCC sobre geotextil	61
Imagen 21: Proceso de relleno de geoceldas	62
Imagen 22: Proceso de compactación de geoceldas.....	62
Imagen 23: Proceso de instalación, llenado, compactación y posterior tránsito sobre la estructura reforzada	63

Imagen 24: . Condiciones críticas que obligaron la construcción de estructuras de pavimento diferente a la inicialmente contemplada	64
Imagen 25: Aspectos de tramos de la vía terminada	66
Imagen 26: Esquema básico del equipo y funcionamiento del LWD	68
Imagen 27: Proceso de toma de mediciones en campo	69

TABLA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Condiciones iniciales	48
Tabla 2: Detalle de la estructura con el SCC	49
Tabla 3: Diferencia porcentual de los sistemas constructivos.....	60
Tabla 4: Estructuras configuradas de acuerdo a la subrasante	64
Tabla 5: valores promedio del módulo de las mediciones en cada abscisa.....	70
Tabla 6: Resultados obtenidos de las mediciones sobre la subrasante.....	71
Tabla 7: Parámetros estructurales representativos de las secciones homogéneas	72

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS VENTAJAS DEL USO DEL SISTEMA DE CONFINAMIENTO CELULAR (GEOCELDAS) EN LAS VÍAS DE ACCESO EN PROYECTOS PETROLEROS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO, FACTOR TIEMPO Y AMBIENTAL*

AUTOR: MARTIN ALFONSO CARVAJAL ZAMBRANO**

PALABRAS CLAVES: Confinamiento celular, Geoceldas, Cohesión aparente

DESCRIPCIÓN:

En proyectos de exploración y explotación petrolera se realizan actividades de movimientos de tierra en vías de acceso y explanaciones, que por su ubicación, las condiciones climáticas y la normatividad ambiental en ocasiones se tornan complejas para su ejecución, lo que ha motivado la implementación de nuevas tecnologías.

La aplicación de un sistema de confinamiento celular (SCC) nos presenta una alternativa para mejorar la capacidad portante de la subrasante y reducir los espesores de la estructura de pavimento, lo que implicaría un impacto positivo económicamente, en tiempos de ejecución y manejo de las variables ambientales.

El principal efecto que tiene un SCC, consiste en que las geoceldas retienen horizontalmente el suelo encerrado en su interior y limitan la deformación lateral para que el comportamiento del suelo mejore ante las fuerzas aplicadas. Cuando se utiliza el SCC como refuerzo, se genera una cohesión aparente que surge del confinamiento realizado por cada una de las celdas.

Como un método de construcción inherentemente y sostenible, el SCC utiliza menos materias primas durante la construcción que las técnicas convencionales, mientras que la vida útil mejorada de la nueva tecnología de geoceldas reduce significativamente el mantenimiento a largo plazo de las vías.

Se puede concluir en el desarrollo del proyecto que la aplicación del SCC como refuerzo a la estructura de la vía, desde el punto de vista económico presenta ventajas al permitir la reducción de costos, lo mismo que redujo los tiempos de ejecución del proyecto. Teniendo en cuenta la disminución de material a remover con la aplicación del SCC se determinaron beneficios desde el punto de vista ambiental. Con ensayos de deflectometría realizados, se observa que el comportamiento a lo largo del tramo presentó un mejoramiento de la subrasante entre 5 y 10 veces con respecto a su módulo inicial.

* Tesis de Grado

** Facultad de Físico-Mecánicas. Maestría en geotecnia. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS AND EVALUATION OF THE ADVANTAGES OF USING CELLULAR CONFINEMENT SYSTEM (GEOCELLS) IN ACCESS ROADS IN OIL PROJECTS FROM THE PERSPECTIVE OF ECONOMIC, ENVIRONMENTAL AND TIME FACTOR*

AUTOR: MARTIN ALFONSO CARVAJAL ZAMBRANO**

KEYWORDS: Cellular Confinement, Geocells, apparent cohesion

DESCRIPTION:

Oil and gas exploration and extraction projects are in frequent need of earthwork activities in roads and platforms which, because its location, weather conditions and environmental regulations become complex to its execution. This has motivated the implementation of new technologies.

The application of cellular confinement system (CCS) presents an alternative to improve the bearing capacity of the subgrade and reduce the thickness of the pavement structure which would imply a positive impact economical, at the time of execution and management of the environmental variables.

The main effect of a CCS consists on horizontal geocells which can retain soil locked inside and limit lateral deformation to improve soil behavior to applied forces. An apparent cohesion is generated from confinement of each one of the cells when CCS is used as reinforcement.

As a inherent and sustainable construction method, the CCS uses fewer raw materials during construction than conventional techniques while improving service life and significantly reducing long term maintenance to roads,

As a project conclusion, the implementation of CCS as reinforcement to the road structure shows economical advantages, reducing cost and shortening construction times and environmental advantages, decreasing the amount of material to be removed.

With deflectometry tests can be seen how the behavior of the subgrade increases between 5 and 10 times its initial module

* Work Degree

** School of Physics and Mechanical. Geotechnics Master. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de los proyectos de exploración y explotación petrolera se realizan actividades de movimientos de tierra en vías de acceso y explanaciones, que por su ubicación, las condiciones climáticas y las condiciones ambientales en ocasiones se tornan complejas para su ejecución.

Actualmente, el mal tiempo, la mala calidad de los materiales que se encuentran en el entorno de los proyectos, los requerimientos ambientales que cada día se tornan más exigentes y las grandes distancias que existen en la mayoría de los casos a las fuentes de material con licencias legales vigentes, afectan directamente el costo de los proyectos y los tiempos de ejecución de las obras.

En virtud a esto, se ha implementado un programa de aplicación de nuevas tecnologías en los proyectos petroleros con el ánimo de darle un mayor manejo a estas variables.

Dentro de estas nuevas tecnologías se encuentra la utilización del sistema de geoceldas para el mejoramiento de la capacidad portante la optimización de los espesores de las estructuras viales. En el país existen diferentes proyectos de infraestructura que han desarrollado planes piloto para la aplicación de esta tecnología.

En general, se recomienda que cuando se presenten sub-rasantes clasificadas como muy pobre y pobre, se proceda a eliminar el material inadecuado y a colocar un material de remplazo con CBR e IP adecuados que mejoren su capacidad de soporte y garanticen la estabilidad de la estructura de pavimento.

En el desarrollo de los proyectos viales de acceso a las plataformas petroleras, se han utilizado diferentes métodos para mejorar las capacidades portantes de las sub-rasantes que soportan las estructuras viales.

Actualmente, se usan diferentes métodos de estabilización de la sub-rasante como la compactación mecánica, el remplazo del material inadecuado por material competente, la estabilización con cemento, la estabilización con cal o con aditivos químicos para alterar las propiedades físico químicas del suelo, la generación de capas de soporte con espesores representativos, las empalizadas y el mejoramiento con geotextiles o geosintéticos.

Imagen 1: Remplazo de material de baja capacidad portante por material competente



Fuente: GEOSISTEMAS PAVCO. Soluciones para la infraestructura vial Neoweb, Sistema de Confinamiento Celular. Bogotá, 2011

Este método (Imagen 1) implica la utilización de canteras licenciadas, mayores costos por acarreo de material y autorización de los entes ambientales para la disposición del material sobrante producto de las excavaciones (ZODMES).

Imagen 2: Empalizadas para mejorar la capacidad portante de la subrasante



Fuente: ibíd.

Este sistema (Imagen 2) utiliza la madera como mejorador de capacidad portante, siendo este recurso el que más limitaciones presenta para su uso en las licencias ambientales.

Imagen 3: Mejoramientos de subrasante con geotextiles



Fuente: ibíd.

Imagen 4: Mejoramientos de Brasante con cemento, cal y químicos



Actualmente, la normatividad ambiental a nivel nacional ha tomado relevancia, lo que nos obliga a disponer de materiales mejorados solamente de canteras con licenciamiento ambiental; esto obliga en muchas ocasiones a realizar acarrees considerables de gran impacto económico que comprometen la viabilidad de los proyectos.

Desde 1970 la estabilización con geosintéticos ha sido una técnica utilizada para mejorar el comportamiento de vías pavimentadas y no pavimentadas¹

Las geoceldas son un tipo de geosintéticos, hechas de polímero en forma de celdas tridimensionales artificiales, dispuestas en forma de panel. Estas generan un gran aporte a la subrasante aumentando su capacidad portante, disminuyendo el desplazamiento vertical y minimizando su desplazamiento horizontal²

Dentro de este contexto, la aplicación del sistema de geoceldas nos presenta una alternativa para mejorar la subrasante y reducir los espesores de la estructura de pavimento a la vez, lo que implicaría un impacto positivo a los proyectos desde el punto de vista económico, tiempo de desarrollo del proyecto y ambiental.

¹ POKHAREL, S, et al. Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading. *Geotextiles and geomembranes*. 2010. p. 572.

² HAN, J., LESHCHINSKY, D., y PEARSONS, R. Behavior of Geocell-Reinforced Sand Under a Vertical Load. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008. p. 95

1. SISTEMA DE GEOCELDAS

1.1 SISTEMA DE CONFINAMIENTO CELULAR (SCC)

Los SCC fueron inventados por los Cuerpos de Ingenieros del ejército de los Estados Unidos en los años 70 con el fin de construir carreteras temporales para los vehículos militares pesados en suelos débiles. Varios años más tarde, se permitió su uso para aplicaciones civiles y se inició la producción comercial. Sin embargo, a pesar de su aplicación original, el desarrollo de las geoceldas en el mercado de la ingeniería civil se centró principalmente en el control de la erosión de suelos para la protección de canales y taludes.

Imagen 5: Sistema basado en el panal de las abejas que es una de las estructuras más resistentes de la naturaleza.



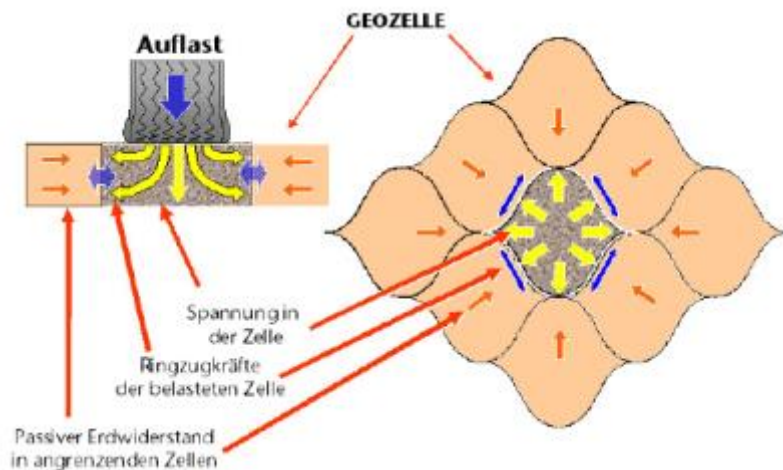
Fuente: Ibíd.

El uso de las geoceldas para el soporte de cargas se convirtió en una función secundaria y estaba limitado al refuerzo de estructuras de pavimentación temporales. Las geoceldas se usaban en las capas estructurales más inferiores, normalmente la subbase, para mejorar el soporte de carga de subsuelos débiles.

Este enfoque convencional desafortunadamente pasa por alto el gran potencial de las geoceldas en el refuerzo de otras capas de la estructura de pavimentación y que proporciona aplicaciones más permanentes a largo plazo.

El sistema de geoceldas es un sistema de confinamiento celular tridimensional, es una estructura con forma de panel; al rellenarla con material granular, se crea una nueva entidad de compuesto geosintético a partir de la compleja interacción de celdas, geometría y suelo en tres planos, ideal para soluciones de refuerzo, estabilización y confinamiento de suelos.

Figura 1: Distribución de esfuerzos en el sistema de geoceldas



Fuente: EMERSLEBEN, A. y MEYER, N. Mechanical behavior of geocell reinforced soils. Information and lectures congress of the speciality section, 2005.

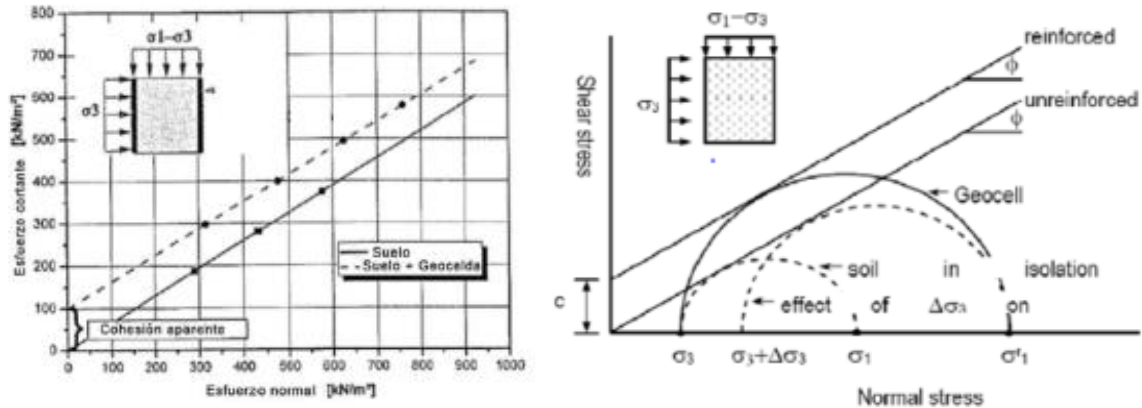
El principal efecto que tiene un SCC, consiste en que estas retienen horizontalmente el suelo encerrado en su interior, por lo tanto, limitan la deformación lateral para que el comportamiento del suelo mejore ante las fuerzas aplicadas. Cuando el suelo es estabilizado por este SCC y sometido a esfuerzos, la deformación lateral del material de relleno es restringido por las fuerzas del

anillo de tracción de la geocelda y por la resistencia pasiva de la celda adyacente, todo este sistema funciona como se muestra en la Figura 1.³

Cuando se aplica el SCC como refuerzo, se genera una cohesión aparente que surge del confinamiento realizado por cada una de las celdas, creando así un incremento del esfuerzo secundario.

Si se tiene en cuenta el artículo publicado por Jie Han⁴ se puede observar claramente esta teoría en el círculo de Mohr teniendo en cuenta los esfuerzos normales al material granular; igualmente, lo estableció Emerslen y Meyer en el 2005 determinando que el sistema de conexión de las geoceldas y el relleno presentan mayor rigidez, comparado con un sistema de suelo sin refuerzo, esto se da gracias a la cohesión aparente. (Figura 2)

Figura 2: Cohesión aparente calculada y explicada mediante el círculo de Mohr



Fuente: Professional Reinforcement Solutions. Tinkhana-1 Well Access road, Colombia, Neoweb Reinforcement System for Unpaved Road Support. (s.c.), 2010.

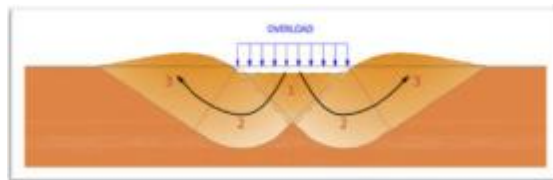
Se han realizado muchas investigaciones en las que se ha comparado el comportamiento del suelo sin estabilizar en las zonas de falla y el mismo suelo

³ EMERSLEBEN, A. y MEYER, N. Mechanical behavior of geocell reinforced soils. Information and lectures congress of the speciality section, 2005.

⁴ HAN, Op. Cit.

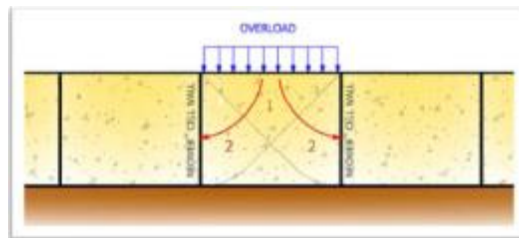
estabilizado con un SCC, concluyendo que el efecto de la sobrecarga en el suelo sin estabilizar (Figura 3) genera una pérdida de capacidad portante y hace que falle; mientras que con el SCC, el efecto de la sobrecarga por el efecto de las paredes no permite la aparición de fallas locales (Figura 4).⁵

Figura 3: Zona de falla en suelo sin estabilizar



Fuente: PRS. Published Technical Research. Disponible en: <http://www.prs-med.com/prs-neoweb-geocell/published-technical-research>

Figura 4: Suelo estabilizado con un SCC

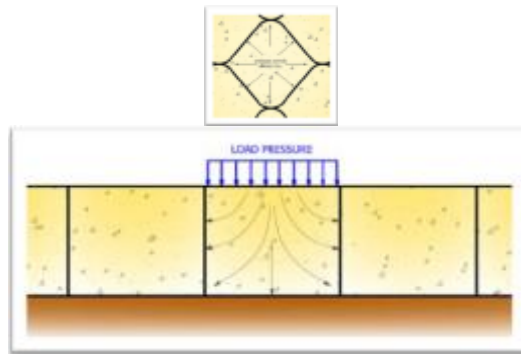


Fuente: ibíd.

Cuando el material contenido en la celda es sometido a una sobrecarga, a las paredes de la geocelda se transmiten diferentes esfuerzos.

⁵ KIEF, O. y RAJAGOPAL, K. Three dimensional cellular confinement system contribution to structural pavement reinforcement. Geosynthetics India, 2008.

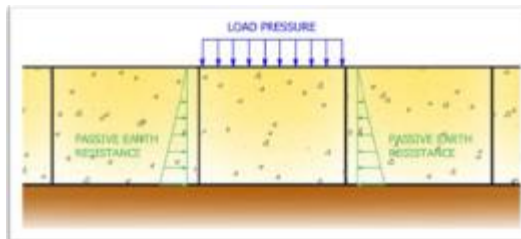
Figura 5: Transmisión de esfuerzos a la geocelda por carga aplicada



Fuente: Ibíd.

Además del confinamiento por las paredes celulares rígidas, el material contenido en las células adyacentes proporciona resistencia adicional contra la célula sobrecargada a través de la resistencia pasiva. Esto proporciona un comportamiento más rígido para una mayor capacidad de soporte de la vía. (Figura 6)

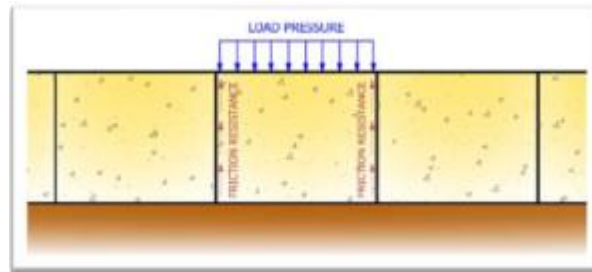
Figura 6: Confinamiento del material contenido en la celda



Fuente: ibíd.

Las tensiones horizontales aplicadas en las paredes de la celda de carga, aumentan la resistencia de fricción de interfaz entre el revestimiento de suelo y las paredes celulares perforadas y con textura, este aumento de la resistencia a la fricción vertical, ayuda a disminuir la magnitud del esfuerzo que llega a la subrasante. (Figura 7)

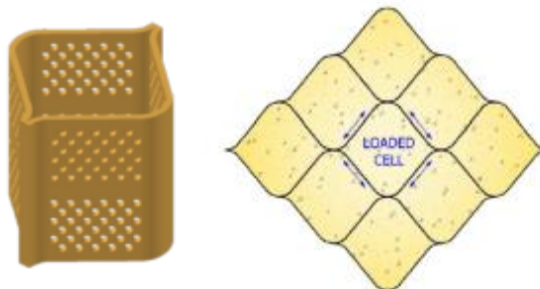
Figura 7: Esfuerzos de fricción en paredes de la celda



Fuente: Ibíd.

La estructura tridimensional del SCC (Figura 8) genera esfuerzos de confinamiento del material de relleno, lo que limita la deformación lateral; la expansión lateral del relleno está limitada por la resistencia tangencial de las células y como resultado se obtiene menor deformación y mayor durabilidad de la estructura.

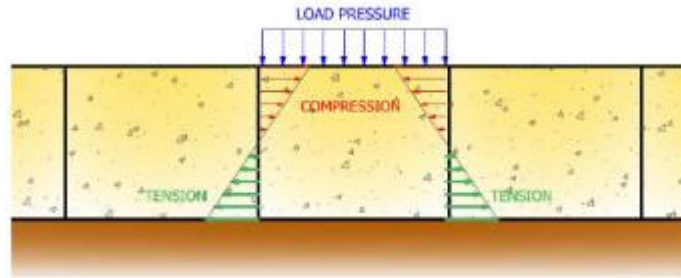
Figura 8: Estructura tridimensional del SCC



Fuente: Ibíd.

El confinar y retener la integridad del material de relleno dentro de una estructura de alta resistencia a la tracción (con volumen) proporciona una capa con una resistencia mayor al momento de la flexión (Figura 9). La resistencia estructural también aumenta proporcionando un mejor rendimiento, especialmente bajo cargas concentradas.

Figura 9: Comportamiento estructural de SCC en momento de flexión



Fuente: Ibíd

En pruebas de campo in situ del SCC se ha demostrado que se reduce la tensión vertical de la capa granular reforzada en más del 50% a la subrasante, mejorando así la capacidad de carga de la estructura. Análisis de elementos finitos de los resultados de las pruebas revelaron que la capacidad de soporte de la capa sub-base se incrementó en aproximadamente 2,5 veces.⁶

El mecanismo de refuerzo, la composición de la aleación polimérica y el sistema de su forma geométrica distribuye las cargas en una amplia zona, creando una estructura de geoceldas 3D de alta resistencia a la flexión y rigidez. Esta estructura disminuye asentamiento diferencial vertical, mejora la resistencia al corte, y mejora la capacidad de carga.

Los resultados de las pruebas explican cómo el uso del SCC para el refuerzo permite una reducción en el espesor de los elementos de soporte estructurales tanto en los substratos como el del asfalto, mientras que al mismo tiempo mejora el rendimiento de los rellenos cohesivos e inferiores, tales como suelos granulares finos y material reciclado.

Esto no sólo reduce la cantidad de actividades de excavación, acarreo y relleno con sus correspondientes beneficios económicos y ambientales, si no también se extiende la vida de servicio de las vías, lo que reduce los costos de operación y

⁶ Ibíd.

mantenimiento y permite a los profesionales de gestión de transporte trasladar más de sus limitados recursos a las construcciones de nuevas vías en lugar de la reparación, el mantenimiento y la rehabilitación.⁷

El SCC es adecuado para la construcción de nuevas carreteras, así como para la rehabilitación de carreteras en dificultades; se puede utilizar en una amplia gama de tipos de pavimentos flexibles de alto tráfico, carreteras pavimentadas y caminos de tierra de bajo volumen. Esto tiene especial importancia para países en desarrollo que buscan brindar vías en buen estado todo tiempo para el acceso y desarrollo de las zonas rurales remotas.

Como un método de construcción inherentemente y sostenible, el SCC utiliza menos materias primas durante la construcción que las técnicas convencionales, mientras que la vida útil mejorada de la nueva tecnología de geoceldas reduce significativamente el mantenimiento a largo plazo de las vías. La conclusión es que los sistemas avanzados de confinamiento celular proporcionan una gran cantidad de beneficios ecológicos, sociales y económicos en los esfuerzos de cualquier estado para mejorar la infraestructura de transporte por carretera.⁸

Comparando el comportamiento de una estructura reforzada con un SCC contra una estructura no reforzada mediante un modelo de elementos finitos, teniendo en cuenta la diferencia de rigideces de los materiales granulares es posible observar las ventajas en el comportamiento de la estructura reforzada.

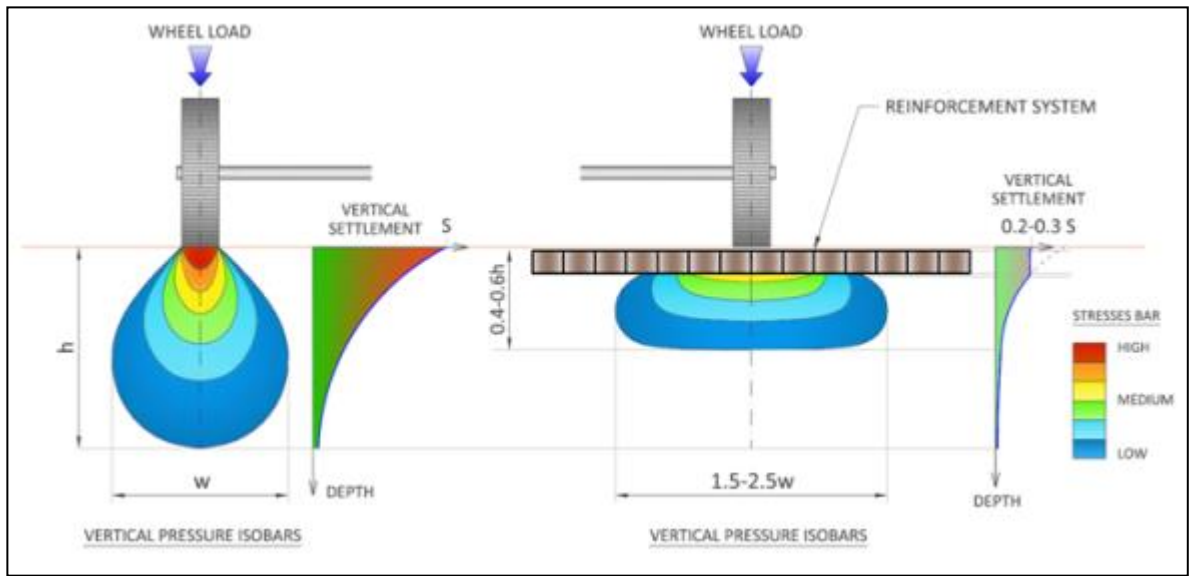
La estructura sin refuerzo, presenta una concentración de esfuerzos justo bajo la carga de la rueda, transmitiendo un esfuerzo puntual que puede generar una superficie de falla local y con mayor facilidad la ruptura del material; por el contrario, en el caso reforzado la distribución de esfuerzos se da en un área entre

⁷ Ibíd.

⁸ Ibíd.

1.5 y 2 veces el área de distribución en la estructura sin refuerzo, permitiendo aplicar una mayor carga antes de generar la falla en el suelo de fundación, esto es por tanto, un incremento en la capacidad portante.

Figura 10: Distribución de esfuerzos por efecto viga



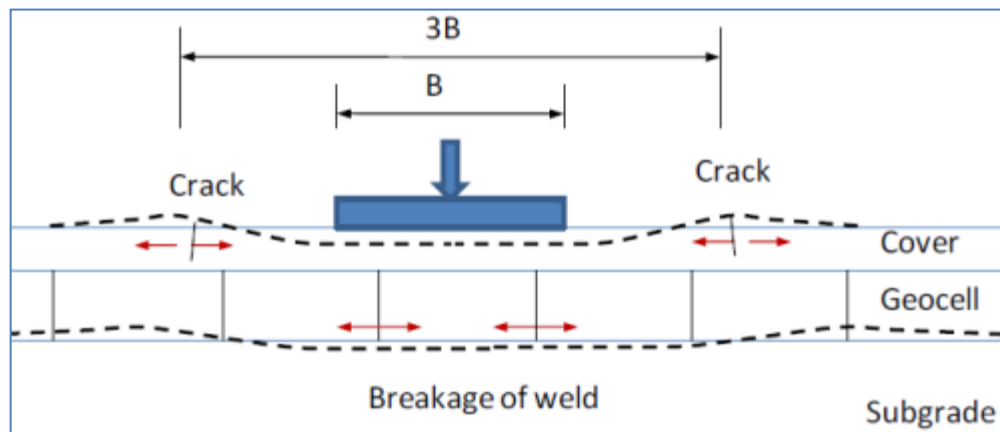
Fuente: GEOSISTEMAS PAVCO, Op. Cit.

Teniendo en cuenta un cambio en la distribución del esfuerzo, es lógico que se genere un cambio en la distribución de la tasa de asentamientos en profundidad bajo la estructura granular reforzada. Cuando se tiene un material granular dentro de un mecanismo de confinamiento celular, el asentamiento esperado puede llegar a ser 0.2 o 0.3 veces el asentamiento inmediato esperado en el caso de una estructura granular no reforzada, debido a la redistribución del esfuerzo generado por el efecto de viga semirígida producido por el incremento en la rigidez y módulo del material granular cuando se encuentra en condición de confinamiento (Figura 10).

Igualmente, Jie Han determinó que el área en donde se distribuye la carga puede incrementarse hasta tres veces utilizando el SCC como refuerzo (Figura 11), comparativamente con el material sin refuerzo, esto debido a la redistribución de

esfuerzos aportado por las geoceldas que redonda en el incremento de la capacidad portante del suelo, lo mismo que en la reducción de asentamientos diferenciales en las estructura del pavimento.⁹

Figura 11: Comportamiento de la estructura de pavimento con SCC

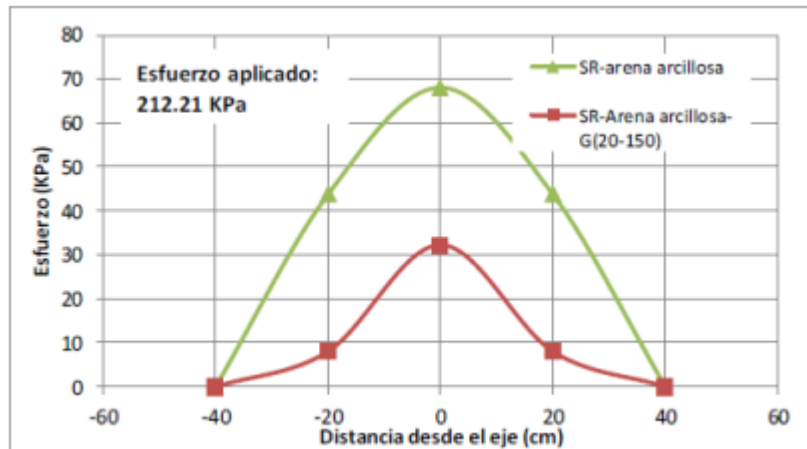


Fuente: PRS. Op. Cit.

Los ensayos realizados por Vacca, León, Ruiz y Quiroga, dejan ver que el SCC permite disipar los esfuerzos de manera más eficiente que el sistema de estabilización sin refuerzo. Esto se ve evidenciado al observar la amplitud de la campana de esfuerzos generados a diferentes distancias de aplicación de la carga en la interface (Figura 12).

⁹ HAN, Op. Cit.

Figura 12: Esfuerzo en la interface a diferentes distancias del eje de aplicación de la carga para un SR no reforzada y una SR reforzada



Fuente: VACCA, H. Estabilización de una subrasante en laboratorio con un sistema de geoceldas. En: Octavas jornadas internacionales del asfalto. Memorias. Colombia, 2012.

También se determinó en este estudio que los menores asentamientos en la superficie se presentan de manera consistente en la estructura reforzada con el SCC en todas las profundidades analizadas a medida que se incrementaba el esfuerzo aplicado en la superficie. Así mismo se pudo observar que la rigidez de la estructura reforzada con el SCC es significativamente mayor a la que presenta la estructura estabilizada de manera convencional, es decir, mediante capas compactadas de material.

Los esfuerzos medidos con el SCC de acuerdo al material de relleno empleado en este estudio presentaron reducciones con respecto a los esfuerzos medidos en el sistema de estabilización convencional del 25% al 50%; también se evidenció que el montaje que presenta mejor comportamiento es la subrasante estabilizada con un SCC, debido a que tiene mayor porcentaje de comportamiento elástico, esto quiere decir que el suelo tendrá mayor resistencia frente a la aplicación de carga y descarga.

Se han realizado numerosos estudios a nivel mundial sobre el comportamiento de estructuras reforzadas SCC, encontrando que los factores más influyentes en el desempeño de las geoceldas son las variables geométricas, la calidad del relleno, la resistencia de la subrasante y el tipo de carga ¹⁰

Si se tiene en cuenta que la aceptación del SCC para el refuerzo de soporte de cargas depende de su estabilidad dimensional en el tiempo, la conservación de la geometría de las celdas en las tres dimensiones es esencial para conservar la rigidez, mantener el confinamiento del suelo y su compactación para garantizar el funcionamiento del sistema. Hasta una mínima expansión de la geometría de la celda con una carga dinámica debilitará totalmente la estructura del pavimento.

La dimensión temporal se basa en diferentes factores como la resistencia a la deformación plástica permanente con el tiempo, la estabilidad dimensional con el ciclo térmico (Coeficiente de expansión térmica vs pérdida de resistencia y rigidez a altas temperaturas), resistencia a la influencia del entorno (Oxidación y degradación por rayos UV con el paso del tiempo).

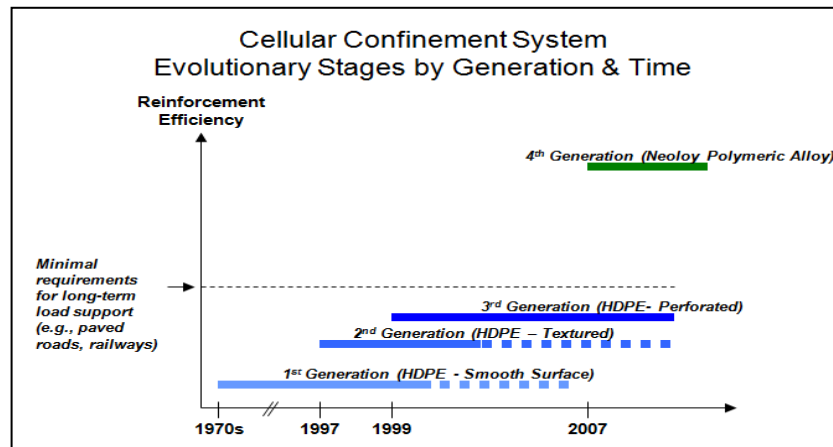
Aunque HDPE (Polímero de alta densidad) es un polímero convencional en las geoceldas, las pruebas de laboratorio y los ensayos en el terreno han demostrado que las geoceldas basadas en HDPE deforman su plasticidad con el paso del tiempo y resultan muy dañadas por las altas temperaturas. Estas propiedades limitan el HDPE a un uso a corto plazo y las hacen poco aconsejables para aplicaciones de estructuras a largo plazo.

Normalmente para la fabricación de las geoceldas se usan polímeros como HDPE que poseen poca estabilidad dimensional y tienen pérdida de resistencia por encima de los 55°C debido a la oxidación térmica, limitando su uso a largo plazo; Polipropileno (PP) muy sensible a las altas y bajas temperaturas y las radiaciones

¹⁰ VACCA, H. Estabilización de una subrasante en laboratorio con un sistema de geoceldas. En: Octavas jornadas internacionales del asfalto. Memorias. Colombia, 2012.

de rayos UV y el Poliéster que carece de elasticidad para la geometría celular y es muy quebradizo.

Figura 13: Evolución de los polímeros a través del tiempo

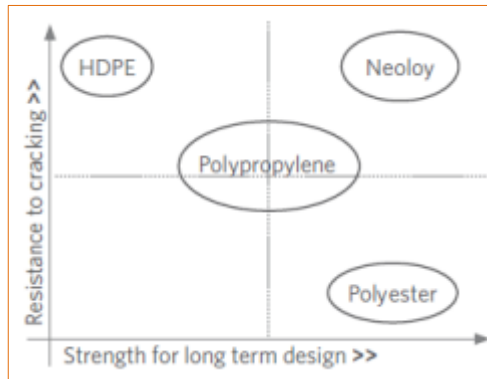


Fuente: PRS. Op. Cit.

Para crear un nuevo SCC que cumpla con los requisitos de ingeniería para rendimientos a largo plazo se presenta una cuarta generación de polímeros denominados Neoloy (Figura 13); es una aleación polimérica nano-compuesta única basada en nanofibras de polímero dimensionalmente estables (poliéster o nylon) en una matriz de poliolefina.

Las aleaciones poliméricas de Neoloy proporcionan la rigidez y estabilidad dimensional a largo plazo necesaria para el confinamiento a largo plazo en las aplicaciones a las diferentes estructuras. A diferencia del HDPE, el sistema de geoceldas con Neoloy mantiene sus propiedades mecánicas en el tiempo y bajo temperaturas elevadas (Figura 14). PRS- Professional Reinforcement Solutions.

Figura 14: Propiedades mecánicas de los diferentes materiales poliméricos



Fuente: GEOSISTEMAS PAVCO, Op. Cit.

1.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para el diseño se tiene en cuenta el método mecanicista, en el cual se analiza el comportamiento de la estructura en términos de esfuerzos y deformaciones, incluyendo el aporte del SCC como una modificación en los módulos de trabajo dentro del modelo de análisis.

Una de las premisas del diseño, contempla que para el llenado de la geoceldas únicamente podrá usarse material granular, tal como arena, grava, sub-base granular, base granular, RAP, entre otros.

1.2.1 Método racional para diseño de pavimentos

La metodología de diseño racional de pavimentos, se basa en el análisis de los esfuerzos y deformaciones en diferentes capas de la estructura de pavimento, buscando definir con base en el comportamiento resiliente de los materiales, el máximo valor admisible para aplicación de la carga correspondiente a un eje de carga.

Los métodos racionales o mecanicistas, describen el funcionamiento del sistema en el cual, la presión ejercida por una rueda q puede ser muy alta para ser

soportada por el suelo natural; la estructura del pavimento reparte la carga para llevarla lo más reducida posible a la subrasante que es la fundación del pavimento; entonces la solución al problema consiste en determinar a una profundidad **Z** que cantidad de esfuerzo se ha disipado.

Los modelos multicapas bajo condiciones de frontera propuestos por Westergaard, Palmer, Barber y Odemark entre otros, se basan en el modelo inicial de Boussinesq, según la cual el esfuerzo vertical a cualquier profundidad puede ser determinado como:

$$\sigma_z = q \left(1 - \frac{(z/a)^3}{(1 + (z^2/a^2))^{3/2}} \right) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde,

- σ_z** : Esfuerzo vertical a cualquier profundidad
- q**: Presión de la sobrecarga
- a**: Radio de carga de la huella circular

Pero así como una falla funcional depende de la capacidad de la estructura de disipar los esfuerzos a profundidad, es posible también encontrar una falla estructural en las capas que conforman la estructura de pavimento debido a las cargas repetitivas. Los materiales de las capas de la estructura de pavimento se consideran homogéneos, isotrópicos y horizontalmente infinitos, que se incluyen dentro de un sistema linealmente elástico, caracterizado por las siguientes variables:

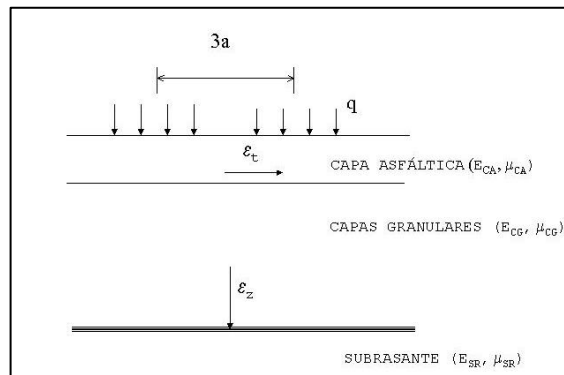
- Módulos Elásticos (E)
- Relación de Poisson (ν)
- Espesores de capa (h)

En el método racional resulta fundamental apoyarse en ensayos de laboratorio y correlaciones que permitan determinar el comportamiento de cada material en

términos de número de ejes para un esfuerzo y/o una deformación aplicada, obtenidos mediante el modelo elástico.

Los criterios que se revisan usualmente están a nivel de la carpeta asfáltica y la capa de subrasante, pero pueden variar de acuerdo con la normatividad de cada país, características de los proyectos y materiales, así como el criterio del diseñador. En la Figura 15, se observa un análisis orientado a chequear la deformación horizontal en la fibra inferior de la capa asfáltica y la deformación vertical a nivel de subrasante.

Figura 15: Estructura multicapa de un pavimento flexible



LILLI, F. Curso sobre diseño racional de Pavimentos. Popayán, 1987

PRS- Professional Reinforcement Solutions y Mexichem – PAVCO¹¹ plantean una metodología de diseño para el análisis de estructuras de pavimento aplicando como refuerzo el SCC con polímeros de cuarta generación (Neoloy) que se basa en la inclusión de módulos modificados en un análisis convencional por el método racional de pavimentos.

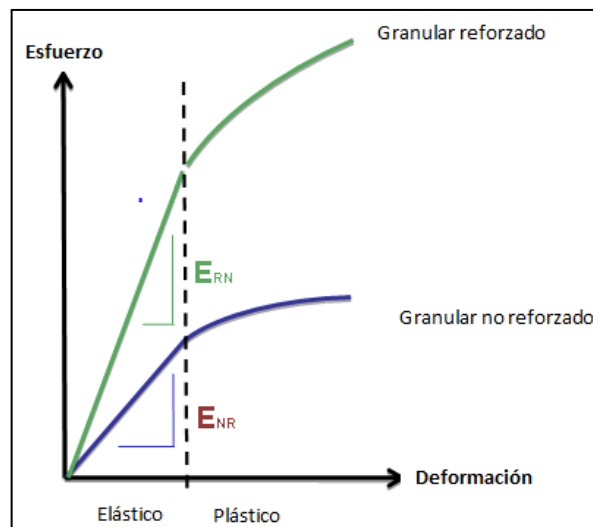
¹¹ GEOSISTEMAS PAVCO. Soluciones para la infraestructura vial Neoweb, Sistema de Confinamiento Celular. Bogotá, 2011

1.2.2 Modificación de módulos

El SCC genera un efecto de confinamiento del material granular que se traduce en un incremento del módulo de elasticidad de los materiales, por tanto, afectando el modelo mecanicista para el análisis de la estructura de pavimento.

El efecto del módulo sobre el comportamiento del material, se produce tanto en el rango elástico como en el rango plástico del material, generando un incremento en la relación esfuerzo deformación, traducida en vida útil de la estructura de pavimento. En la Figura 16, aparece un esquema del aporte del SCC al comportamiento del material granular.

Figura 16: Esquema de esfuerzos y deformaciones para la estructura con y sin refuerzo



GEOSISTEMAS PAVCO, Op. Cit.

Es posible entonces inferir, que aun usando un material granular de características geomecánicas pobres, al reforzarlo mediante un SCC, se obtiene un conjunto de comportamiento superior al de un material granular seleccionado, ambos bajo condiciones de compactación.

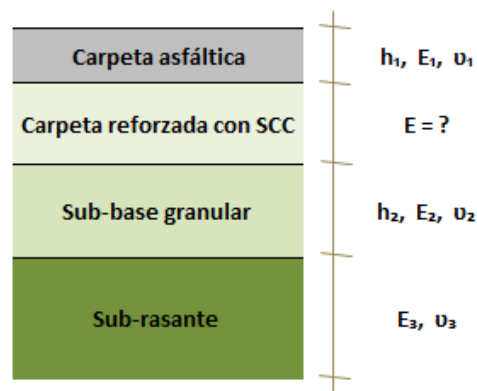
La relación entre el módulo de un material granular confinado con el SCC y un material granular no confinado se conoce como MIF (Modulus Improvement Factor) o Factor de Mejoramiento de Módulos.

$$MIF = \frac{E_{Reforzado}}{E_{Sin-refuerzo}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Diferentes investigaciones se han llevado a cabo a nivel mundial, tanto en ensayos de laboratorio como en pistas de prueba y proyectos reales, con el objeto de determinar el MIF para diferentes condiciones de material de llenado de las celdas y condiciones de confinamiento de las mismas.

En general, el proceso de determinación del MIF se basa en el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación de una estructura de pavimento. A diferencia de una estructura convencional, en una estructura reforzada con el SCC no se conoce el módulo de elasticidad de una de las capas (Figura 17), en este caso el módulo de la capa confinada dentro de las celdas.

Figura 17: Estructura de pavimento



Fuente: Ibíd.

Donde:

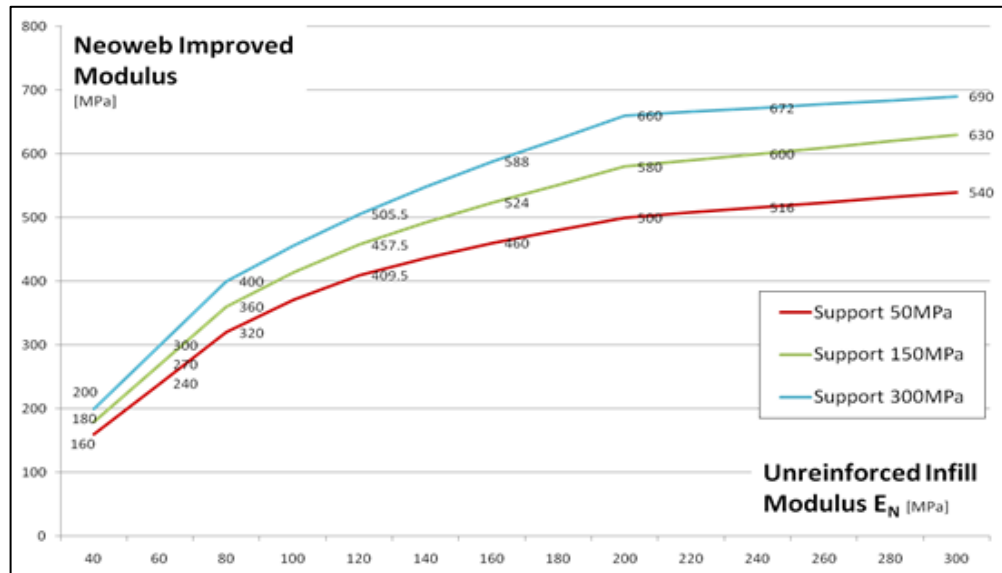
- h_n = Espesor de la capa n
- E_n = Módulo de elasticidad de la capa n
- ν_n = Relación de Poisson de la capa n

A pesar de no conocer algunas variables dentro del modelo, es posible conocer la reacción del suelo subyacente en términos de esfuerzo y deformación ante la aplicación de cualquier carga mediante la utilización de geosensores, celdas de carga o cualquier elemento de monitoreo que permita la medición de cambios en el estado de esfuerzos.

El MIF es adimensional, y sus valores están asociados a las características del material granular, así como el tipo de material sobre el que se apoye el material confinado. El estado ideal del diseño implica la determinación del MIF para cada caso teniendo en cuenta tramos reales de prueba en campo, no obstante, una serie de investigaciones llevadas a cabo en los últimos 15 años en diferentes Institutos y Universidades a nivel mundial, permitió establecer que el MIF varía entre 0 y un valor máximo límite de 5.

Algunos valores del MIF típicos obtenidos en múltiples ensayos de laboratorio y de campo a lo largo de las investigaciones llevadas a cabo en la última década aparecen en la Figura 18, teniendo en cuenta materiales granulares convencionales tanto de llenado como de soporte. En este ábaco se indican los módulos modificados de trabajo para el análisis de la estructura de pavimento.

Figura 18: Abaco de módulos modificados de acuerdo con el MIF

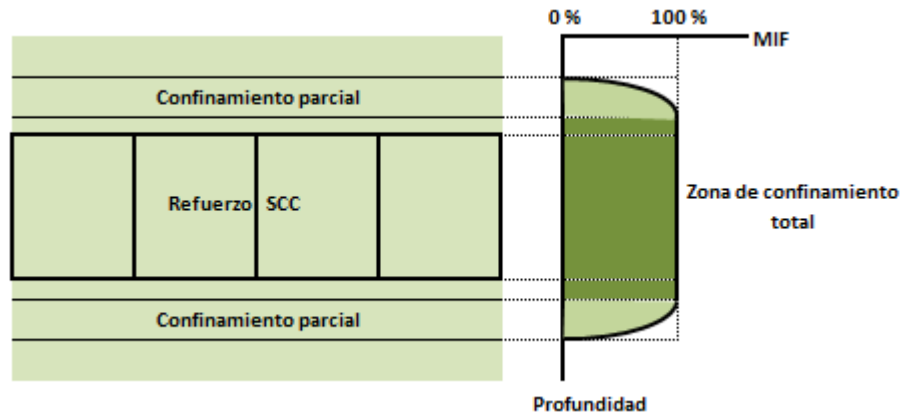


Fuente: Ibíd.

La investigación llevada a cabo muestra además la distribución del confinamiento del material granular, el cual aplica dependiendo de la altura de la celda y tiene límites establecidos, esto se refleja en el porcentaje del valor del MIF que aplica dentro de la distribución de los módulos.

Las mediciones han permitido establecer tres zonas de distribución del confinamiento en términos del MIF (Figura 19), estableciendo una zona central la cual tiene un efecto total de confinamiento o un 100% de aplicación del MIF, mientras que tanto en la parte superior como inferior de la geocelda se genera una zona de transición donde el confinamiento es parcial y disminuye paulatinamente hasta que el MIF tiene un valor cero, que indica que no hay efecto de confinamiento.

Figura 19: Distribución del confinamiento en el área reforzada

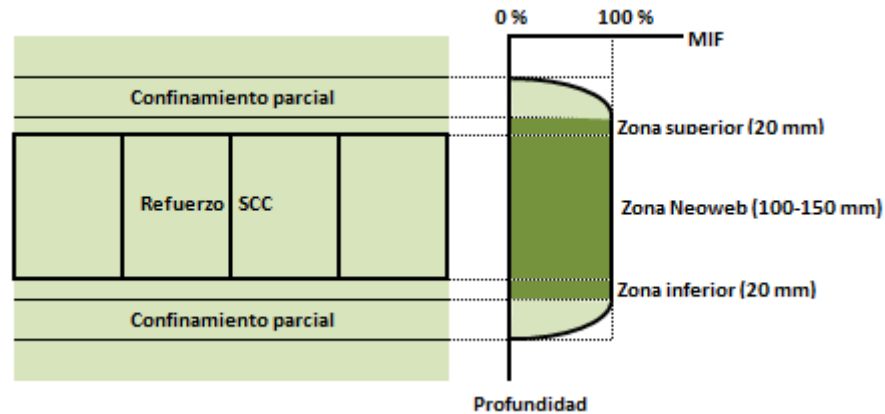


Fuente: Ibíd.

La zona de transición del MIF actúa como un elemento amortiguador, que permite que el material de alto módulo (material reforzado SCC) interactúe fácilmente con materiales blandos o de módulos bajos sin efectos negativos por interacción de capas de gran rigidez.

Para efectos de diseño la zona parcialmente confinada no es tenida en cuenta, y el MIF únicamente se hace efectivo para la zona denominada como Zona Totalmente Confinada, la cual corresponde a la altura de la celda (100-150 mm) más 2 cm arriba y 2 cm debajo de la geocelda, tal como se observa en la Figura 20.

Figura 20: Distribución del confinamiento de la zona reforzada



Fuente: Ibíd.

Esto significa que dentro de la estructura de pavimento, la capa denominada como totalmente confinada estará sujeta a una modificación del módulo por un valor que corresponde al MIF.

$$\text{Módulo no reforzado} * MIF = \text{Módulo reforzado mejorado} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En el diseño con el SCC, deberán seguirse los criterios establecidos en el diseño racional de pavimentos, pero incluyendo los módulos modificados por efectos del confinamiento granular.

1.2.3 Criterios de supervivencia del material

Igualmente, el éxito del diseño se basa en el comportamiento del material en que se fabrican las geoceldas, para lo cual se debe tener en cuenta diferentes factores que garanticen sus propiedades con el paso del tiempo, porque cualquier deformación en la celda generará pérdida del confinamiento y la vida útil del diseño se limitará a la vida útil de la celda.

Teniendo en cuenta lo anterior, PRS- Professional Reinforcement Solutions y Mexichem – PAVCO proponen valorar las siguientes propiedades del material para garantizar su comportamiento a través del tiempo.

El comportamiento de la celda a largo plazo mediante un ciclo de deformación a través de la inclusión de calor en el material para recrear el comportamiento y verificar que el material garantice las propiedades de resistencia a la tensión de las costillas y uniones de las celdas que debe ser el mismo en la etapa de construcción que al final de la vida útil del proyecto.

El coeficiente de expansión térmica, con el que garantiza que las celdas no sufrirán cambios importantes por cambios de temperatura, teniendo en cuenta que puede trabajar cerca de la carpeta asfáltica, lo mismo que climas con ciclos de temperatura variable.

El comportamiento a temperaturas elevadas tanto en la operación como en el almacenamiento, especialmente en áreas tropicales. Teniendo en cuenta que al superarse un determinado límite de temperatura, se observa que el material pierde propiedades de resistencia y rigidez que afectan el confinamiento y por tanto el módulo de trabajo en la metodología de diseño.

La resistencia a la oxidación que evalúa la capacidad del sistema para resistir ante la presencia de agentes químicos y agentes erosivos que pueden afectar la durabilidad en el largo plazo de la integridad de la celda.

La resistencia a la degradación UV, que evalúa el mínimo de resistencia a la radiación ultravioleta con el fin de evitar la cristalización del polímero y por tanto la pérdida de propiedades del material.

1.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

La estructura puede ser diseñada por la metodología que estime conveniente. Sin embargo, para obtener una alternativa comparable se requiere conocer los

parámetros necesarios para realizar la modelación en un programa de diseño racional, para posteriormente obtener los criterios de fatiga, ahuellamiento y deflexión de la estructura de pavimento. Dichos parámetros son:

Tráfico de diseño, eje de carga de referencia y periodo de diseño.

Espesor de las capas, características de los materiales (módulo elástico) y relación de Poisson de cada uno de los materiales que conforman las capas de la estructura.

CBR o C_u , relación de Poisson, módulo resiliente del suelo de subrasante.

Teniendo definidas para la estructura de pavimento las condiciones de drenaje de la vía, calculado el tráfico de diseño de acuerdo a las condiciones reales del proyecto, definidas las propiedades de los materiales que conforman la estructura de acuerdo con las especificaciones de construcción vigentes y se han realizado todos los ensayos necesarios para caracterizar el suelo de subrasante, se procede con la modelación de la estructura tradicional en el programa de diseño racional y se calculan los esfuerzos y las deformaciones de las diferentes capas, para posteriormente calcular la fatiga, el ahuellamiento y la deflexión.

Criterio de fatiga: Para las capas de materiales bituminosos tal como concreto asfáltico, grava asfáltica, etc, se verifica la deformación a tracción en la fibra inferior de la capa. (Imagen 6)

Imagen 6: Pavimento con características de fatiga



Fuente: MUÑOZ E., et al. Infraestructura vial. Disponible en:

<http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/images/ediciones/revistas-pdf/R-16/R16-08-2006.pdf>

Generalmente se manifiesta como grietas o fisuras producidas por la fatiga acumulada debida a la flexión y al envejecimiento natural del asfalto por el intemperismo. Estas fisuras incrementan la permeabilidad de la estructura del pavimento y reducen la resistencia al corte de la carpeta asfáltica produciendo aberturas que aumentan rápidamente por el paso del tráfico vehicular. Una ecuación para definir la fatiga en términos del número de ejes se puede definir como:

$$\log N_f = 15.947 - 3.291 \log \left\{ \frac{\epsilon_t}{10^{-6}} \right\} - 0.854 \log \left\{ \frac{E_{AC}}{10^3} \right\} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

N_f: Número de ciclos para la falla

ε_t: Deformación horizontal en la fibra inferior de la capa asfáltica

E_{AC}: Módulo Elástico de la capa Asfáltica

Criterio de Ahuellamiento: Para la capa de subrasante se verifica el máximo esfuerzo vertical aplicado. También se puede verificar la deformación por tracción sobre la capa de subrasante.

Imagen 7: Ejemplo de ahuellamiento en pavimentos



Fuente: Obras y servicios del Uruguay. Disponible en: <http://www.osusa.com.uy/mantenimiento.php>

Los criterios actuales de falla son designados a la formación de huellas, lo que se puede atribuir principalmente a una estructura de pavimento débil y sub-rasantes con baja capacidad portante; a continuación se presenta la ecuación en términos del esfuerzo de compresión vertical (ϵ_c) en la parte superior de la sub-rasante:

$$W_{18}^{RUTTING} = 1,007 * 10^{18} \left\{ \frac{10^{-6}}{\epsilon_c} \right\}^{4,4843} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Criterio de Deflexión: Se verifica la máxima deflexión admisible de acuerdo con el tráfico proyectado. La deflexión indica la deformación a nivel de superficie de la estructura de pavimento con respecto a su condición inicial. La AASHTO define el criterio de deflexión como:

$$\log W_{18}^{D_0} = 11.06 - 3.25 \log\{D_0 * 10^3\} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

D_0 : Máxima deflexión en pulgadas según AASHTO

W_{18} : Número de ciclos correspondientes a la deflexión

El diseño ha sido elaborado por cualquier metodología, por lo tanto, si se desea realizar la verificación de los datos por la metodología racional, los valores de esfuerzo y deformación calculados (que arroja el programa) se comparan con los valores admisibles correspondientes, que en todos los casos del diseño inicial deben cumplir con los admisibles.

Definición de variables:

E_i	=	Módulo de la capa i (Kg/cm ²)
h_i	=	Espesor de la capa i (m)
ν_i	=	Relación de Poisson de la capa i
ε_t	=	Deformación a tracción (m/m)
ε_z	=	Deformación vertical (m/m)
σ_z	=	Esfuerzo de compresión (kg/cm ²)

Teniendo la estructura con el refuerzo del SCC, el primer paso para el diseño es plantear la alternativa teniendo en cuenta los siguientes criterios:

El material de llenado del SCC podrá ser cualquier tipo de material granular.

Se entiende que si los módulos van a ser incrementados con el SCC, se puede pensar en reducir el espesor de algunas capas.

Una vez planteada una alternativa con el SCC, se determina el MIF y se hace el cálculo de los módulos modificados en las capas que aplique.

Posteriormente, se procede a modelar la alternativa planteada de estructura reducida en el programa de diseño racional (CEDEM, EVERSTRESS, DEPAV, entre otros) teniendo en cuenta los criterios de Ahuellamiento, Deflexión y Fatiga para determinar el tráfico admisible o verificar que se cumple con los valores mínimos.

Teniendo en cuenta los resultados de comportamiento de la estructura modificada propuesta, podrá pensarse en la reducción o ampliación de los espesores propuestos para llegar a resultados económica y técnicamente más ajustados, por tanto, el diseño de alternativas como en cualquier estructura de pavimento se ajusta continuamente para llegar a las opciones más favorables.

2. DESARROLLOS EN EL PAIS UTILIZANDO EL SCC

2.1 PROYECTO CAMPO PETROLERO RANCHO HERMOSO, CASANARE

El problema consistía en que la plataforma para el montaje de los equipos de perforación, se iba a construir sobre un suelo de baja capacidad portante, por tal motivo, antes de concebir la instalación de la geoceldas, el área se mejoró con un geotextil tejido T2400 de refuerzo, 25 cm de crudo de río y 15 cm del mismo crudo pero triturado. Lo anterior debido a que la plataforma tendría altas cargas puntuales permanentes y cargas dinámicas originadas por grandes grúas y carro tanques, que accederán a ella en diferentes direcciones.

Para dar solución a la necesidad planteada se colocó sobre la última capa un geotextil NT1800, y un SCC (Neoweb 330-125) relleno con crudo de río clasificado y sobre esta, una capa de 6 cm del mismo crudo triturado.

Imagen 8: Desarrollo constructivo instalación refuerzo SCC



Fuente: GEOSISTEMAS PAVCO, Op. Cit.

Se recomendó la instalación del geotextil NT1800 para proteger mediante separación el material de relleno de las celdas, pues, el nivel freático en este sitio está muy cerca de la superficie, lo que podía generar migración de material confinado.

2.2 INFRAESTRUCTURA VIAL CONCESIÓN VIAL DEVINORTE, CAJICA – ZIPAQUIRA

El problema consistía en una falla geotécnica de los suelos finos de alta plasticidad de la zona, provocaron un desnivel en la vía al punto de tener que cerrarla para evitar accidentes de los usuarios. Este tipo de falla requería una intervención inmediata de mantenimiento de la vía, dado el alto nivel de tráfico de la misma.

Para dar solución al problema, se instaló un sistema de estabilización y refuerzo de la vía justo debajo de la carpeta asfáltica con SCC (Neoweb) y un Geotextil No Tejido como separación del material de base. Se empleó una capa de material granular para encontrar la cota de excavación y llegar al nivel requerido de la estructura. En este caso, el material granular de llenado fue el mismo fresado de la vía.

Imagen 9: Instalación del SCC como refuerzo de la estructura



Fuente: ibíd.

Con la instalación del SCC Neoweb se logró el mejoramiento del módulo de la capa granular, lo cual permitió mantener controladas las posibles deformaciones por efecto de la subrasante, generando mayor vida útil de la vía y unas condiciones de servicio óptimas, de acuerdo con los exigentes requerimientos de la concesión.

2.3 INFRAESTRUCTURA VIAL IDU, BOGOTÁ

Se planteó una alternativa para la construcción de la estructura de pavimento existente y diseñada, incluyendo la tecnología del SCC con la intención de optimizar los espesores granulares de la vía, evitar la estabilización con rajón, mejorar el desempeño de la estructura y aumentar rendimientos en el proceso constructivo. Información inicial:

Tabla 1: Condiciones iniciales

CAPA	ESPESOR (cm)
Carpeta Asfáltica	11
Base estabilizada con asfalto	15
Subbase Granular	16
Subrasante CBR 3.5% (Plataforma de trabajo después de mejoramiento con rajón 30cm, sello granular 10cm)	
-	

Fuente: ibíd.

El SCC genera un aumento de módulo del material dada la restricción lateral que se presenta ante la aplicación de cargas verticales, este incremento de módulo se traduce en una redistribución de esfuerzos en un área mucho mayor, generando un efecto viga de rigidez que incrementa las propiedades de la estructura de pavimento, lo cual permite la disminución de espesores de material.

Imagen 10: Desarrollo del proceso constructivo con el SCC



Fuente: ibíd.

Con el SCC planteado, se logra proponer una estructura de menor espesor como se muestra en cuadro siguiente:

Tabla 2: Detalle de la estructura con el SCC

Estructura Propuesta Alternativa con Neoweb	
CAPA	ESPESOR (cm)
Carpeta Asfáltica	11
Base Estabilizada con Asfalto	15
Neoweb 330 125 - llena con subbase (Neoweb 12.5cm+17.5cm de material subbase)	30
Subrasante (Geotextil TR4000)	-
Subrasante CBR 2.1%	-

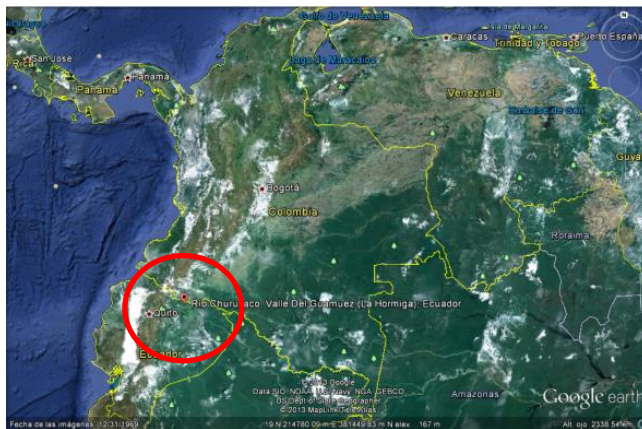
Fuente: ibíd.

3. POZO EXPLORATORIO TINKHANA – 1

3.1 UBICACIÓN

El pozo está ubicado en el departamento del Putumayo y hace parte de las labores exploratorias que se desarrollan en el convenio de Producción Área Occidental, suscrito con la Agencia Nacional de Hidrocarburos, cuyos derechos pertenecen 100% a Ecopetrol. El pozo se ubica en jurisdicción del municipio de Orito, GRS-SOP-CHURUYACO.

Imagen 11: Ubicación general, sur de Colombia



Fuente: Google earth

Imagen 12: Ubicación específica en el Departamento del Putumayo



Fuente: Página oficial, Puerto Caicedo. Disponible en: <http://puertocaicedo-putumayo.gov.co/sitio.shtml?apc=mmxx1-&x=1896237>

3.2 GEOLOGIA

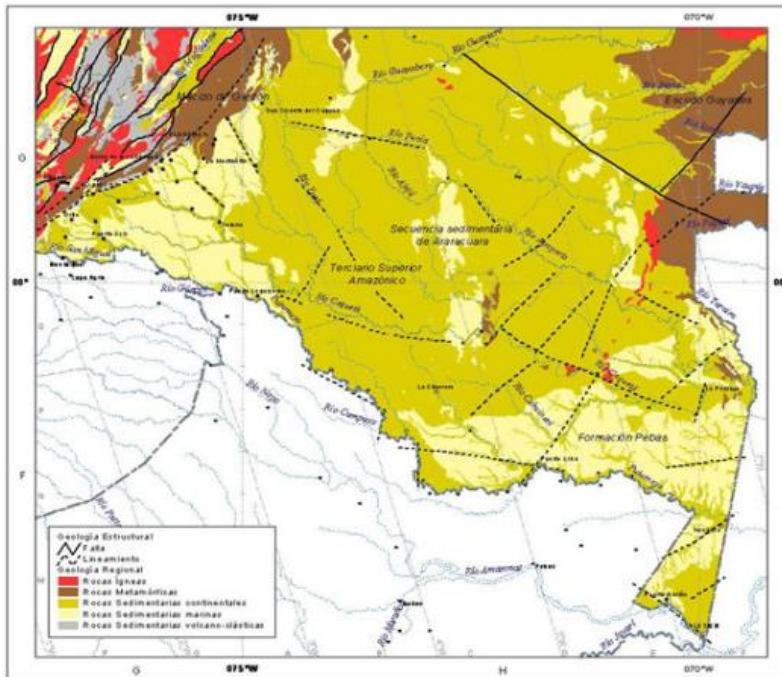
La región sur amazónica colombiana, geológicamente se caracteriza por estar conformada por diferentes tipos de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que varían en edad desde el Precámbrico hasta el presente.

Entre las rocas ígneas se presentan dos cinturones, uno al oriente, de edad Precámbrica, representado por los Granófiros de Tijereto; y el segundo, al occidente, representado por el Batolito de Mocoa, de edad Jura triásica. Así mismo, se presentan algunos pórfidos andesíticos y dacíticos en la Cordillera Centro-Oriental.

Litológicamente en el departamento del Putumayo prevalece un sustrato de rocas sedimentarias marinas que cubren prácticamente toda la Llanura. Esta unidad está seguida en magnitud por un sustrato de rocas sedimentarias continentales que afloran principalmente en la zona de transición entre la Llanura y la Cordillera, en la cual prevalecen formaciones geológicas de Rocas Metamórficas, Ígneas y Sedimentarias Volcanoclásticas, especialmente en el Valle de Sibundoy.

Estructuralmente la zona andina está afectada por varias fallas orientadas en sentido noreste suroeste y de tipo inverso principalmente, entre las que se encuentran: la falla Conejo, la falla de la Tortuga, la falla de San Francisco-Yunguillo, la falla de Churumbelo y la falla de Urdusue. La falla Sibundoy tiene una orientación noroeste a sureste.

Imagen 13: Geología estructural de la región Amazónica de Colombia



Fuente: Corporación para el desarrollo sostenible del sur de la Amazonía. Disponible en:

http://www.corpoamazonia.gov.co/Region/Jur_geologia.htm

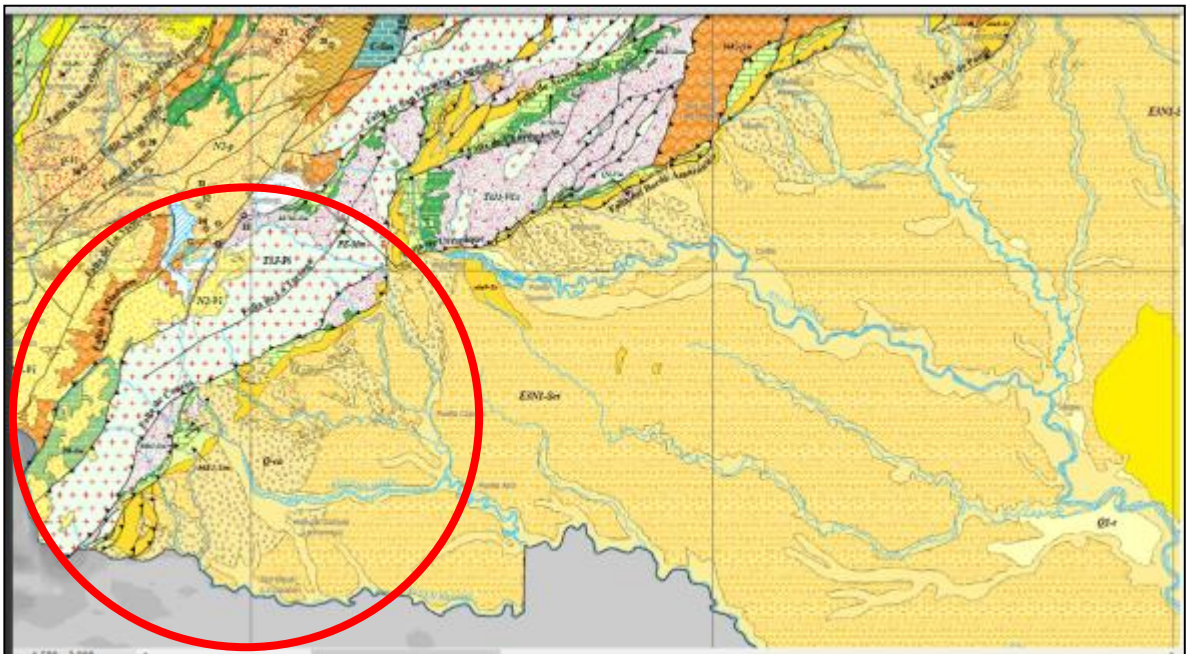
Desde el punto de vista de la Geología Económica, en el departamento existen diferentes yacimientos, depósitos, prospectos y manifestaciones minerales metálicas y no metálicas, entre las que se destacan: Oro, Cadmio, Cobalto, Cobre, Estaño, Molibdeno, Titanio, Tungsteno, Caliza, Diatomitas, Evaporitas, Yeso, Mica y Mármol. Adicionalmente, sobre la cuenca sedimentaria del río Putumayo se vienen desarrollando, desde hace doce lustros actividades relacionadas con la exploración y la explotación de Petróleo, el cual, a pesar de haber decaído en su cantidad significativamente comparado con la producción alcanzada cuando se inició su explotación, representa la principal fuente de ingresos provenientes de la nación por concepto de regalías.

En términos generales, los suelos amazónicos son pobres en minerales. De acuerdo con PRORADAM (1979), en la región se presentan suelos formados de depósitos aluviales y fluviotorrenciales, entre los que se distinguen: suelos

asociados a los depósitos de los ríos de origen andino como el Caquetá y el Putumayo, el Guamués, el Orito, entre otros; b) suelos asociados a los ríos de aguas negras de origen amazónico como el Mecaya y el Sencella; suelos de valles menores con influencia coluvio-aluvial; suelos de terrazas; suelos de abanicos del Piedemonte; suelos originados por la denudación de la superficie sedimentaria terciaria; y suelos asociados a las estructuras geológicas, entre los que se presentan los relacionados con las secuencias ígneo-metamórficas en el extremo occidental.

Los aportes de precipitación son constantes durante todos los meses del año, variando entre 630 mm anuales en los años más secos, hasta 3.500 mm en los de mayor precipitación.

Imagen 14: Detalle según mapa geológico de Colombia



Fuente: Grupo Mapa Geológico de Colombia. Disponible en:
<http://www.ingegominas.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia.aspx>

Esta son las características de los suelos presentes en la región de acuerdo a la plancha de Ingeominas.

Q-ca Abanicos aluviales y depósitos coluviales.

E3N1-Sct Lodolitas, arenitas líticas e intercalaciones de conglomerados ferruginosos. Presenta costras de yeso y costras de carbón.

K6E1-Stm Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino. Localmente mantos de carbón a la base.

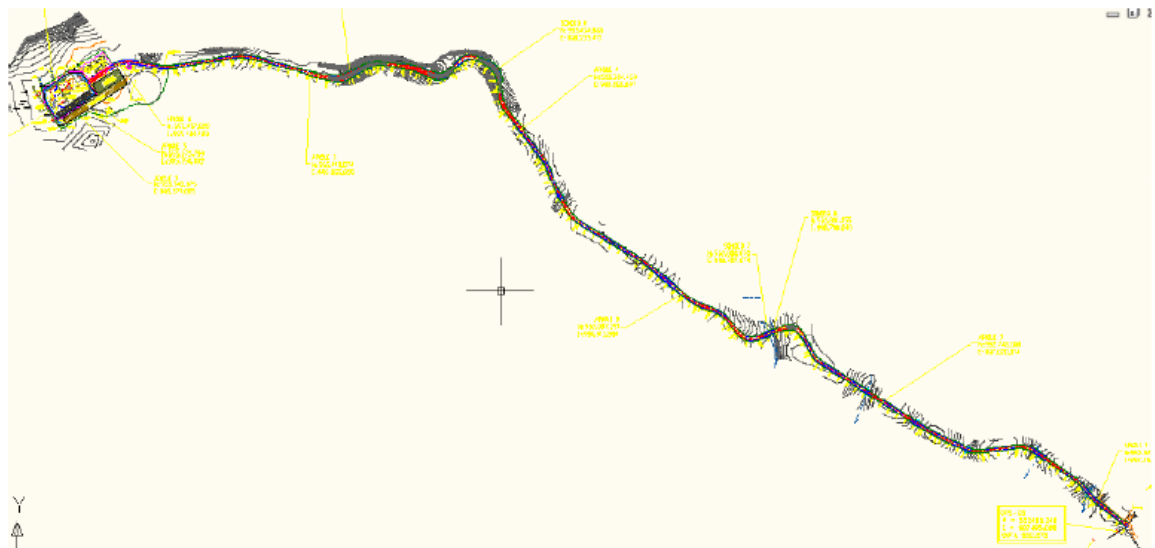
e6e9-Sc Intercalaciones de capas rojas de conglomerados, arenitas líticas conglomeráticas y arcillolitas.

Q1-t Terrazas aluviales.

3.3 DESCRIPCION DEL PROYECTO

El proyecto TINKHANA-1 corresponde a una plataforma como facilidad para la perforación del pozo, que para acceder tiene una vía de aproximadamente 2.550 metros.

Imagen 15: Esquema general del proyecto (vía de acceso y plataforma)



Fuente: JOSEPH, C. Implementación de nueva tecnología Geoceldas. Ecopetrol: Proyecto Tinkhana-1, 2012.

En esta vía se presentan problemas de falta de capacidad portante de la subrasante, que dificulta su uso para el normal desarrollo de proyecto.

Sectores como del K0+000 al K0+630 y del K0+900 al K1+900 ubicados en zona de suelos residuales de la formación Orito presenta CBR del 0,46%; lo mismo que del sector K1+900 al K2+100 que se ubica en zona de depósitos de terraza conformados por aluviones con tamaños variables entre 15 centímetros y 1 metro embebidos en una matriz limosa que presenta un CBR mayor al 1% y el sector del K2+100 al K2+550 conjuntamente con las zonas de circulación de la plataforma se ubican en zonas de depósitos de terraza predominantemente fina con un CBR del 0.66%.

Imagen 16: características de la subrasante



Fuente: Ibíd.

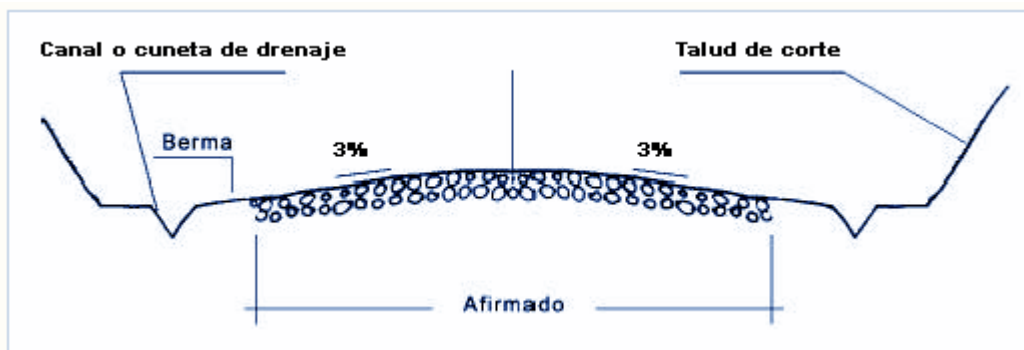
Imagen 17: comportamiento al paso vehicular en el desarrollo del proyecto



Fuente: Ibíd.

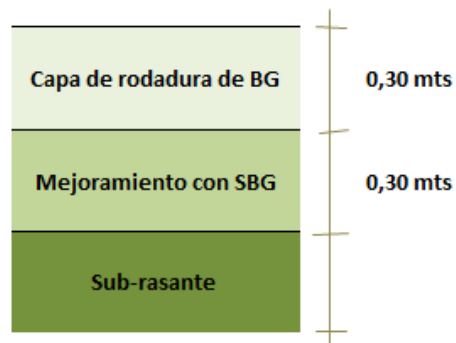
El proyecto determina una vía para una velocidad de diseño de 30 Km/Hra con una calzada de 4,50 metros con sus correspondientes pendientes de bombeos. El diseño convencional define una recuperación de la subrasante con material granular de espesor 0,30 mts y una base granular de 0,30 mts como rodadura, para la conformación de una estructura de 0,60 mts.

Figura 21: Sección típica a recuperar en la vía



Fuente: Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios manuales. Curso de aprendizaje. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/curso_rsm/e/unidad6.html

Figura 22: Sección convencional propuesta



Fuente: Autor

Con la aplicación de la nueva tecnología del SCC, se plantea una estructura reforzada permitiendo una reducción en su espesor lo mismo que de material.

El diseño presentado por PRS- Professional Reinforcement Solutions para las condiciones planteadas determina una estructura de 210 mm con geoceldas de 15 cm y 6 cm de capa superior.

Figura 23: Proposed Neoweb

PROPOSED NEOWEB™ REINFORCEMENT

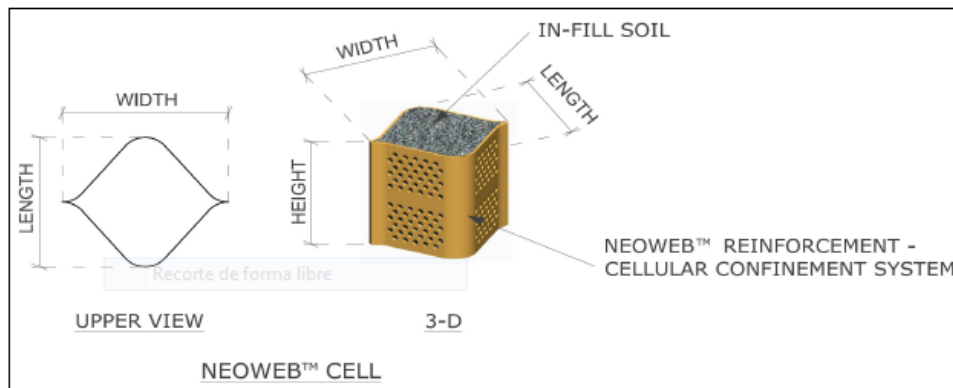
CELL / SECTION DIMENSIONS (NOMINAL)

Table 4 - Cell / Section Dimensions (nominal)

NAME	WELD SPACING	CELL DIMENSIONS ±3%			SECTION DIMENSIONS ±3%		
		Width	Length	Height	Width	Length	Area
Neoloy™	± 2.5 mm						
PRS-330-150	330 mm	250 mm	210 mm	150 mm	2.50 m	4.63 m	11.6 m ²

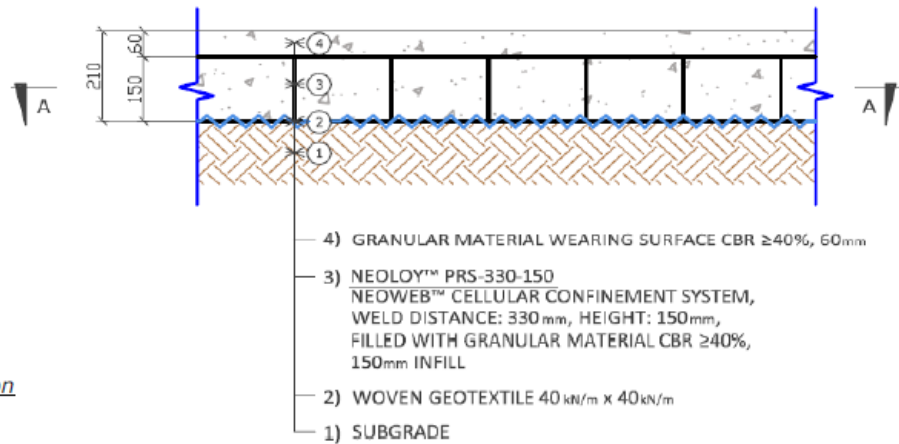
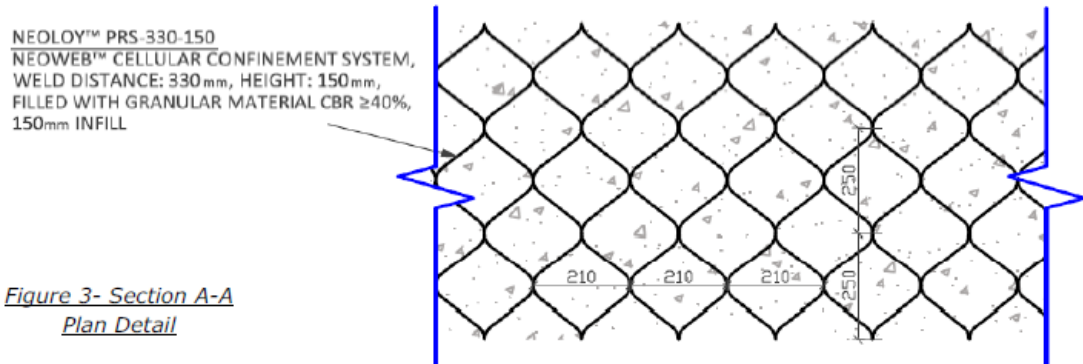
Effective Neoweb™ cell diameter: $N_d = 183$ mm

Figure 2- Neoweb™ Cell



Fuente: PRS. Op. Cit.

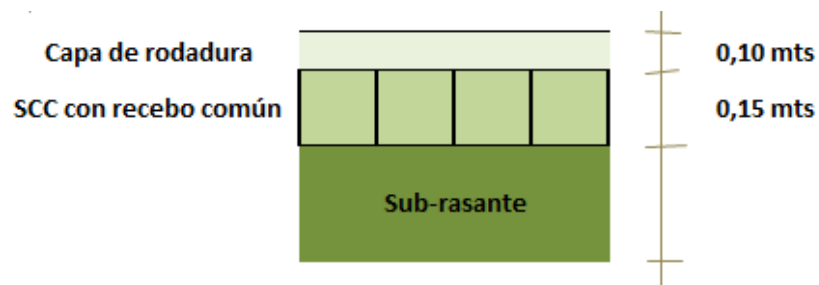
Figura 24: Section A-A Plan Detail



Fuente: Ibíd.

Para optimizar el sistema previendo mantenimientos y las pendientes de bombeo sobre la vía, se determinó aplicar un recubrimiento superior de 0,10 mts.

Figura 25: Sección planteada con el SCC



Fuente: Autor

En primera instancia, se puede apreciar una reducción considerable en el espesor de la estructura reforzada con el SCC comparativamente con el sistema convencional utilizado tradicionalmente en este tipo de proyectos; esta reducción permite inicialmente considerar una reducción en los consumos de material, lo mismo que en su calidad, permitiendo así la utilización de materiales que se puedan obtener en el entorno más cercano. Igualmente, este menor consumo de material prevé un menor acarreo lo que permitiría mayores ahorros en costos, tiempo de ejecución y de afectación al medio ambiente.

3.4 VENTAJAS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONOMICO

Para verificar estas ventajas se procede a realizar un cuadro comparativo de costos de las dos estructuras, teniendo en cuenta el material utilizado y su acarreo al proyecto para un metro cuadrado de vía construida en las condiciones y los sectores que conservaron las mismas premisas del diseño inicial.

Tabla 3: Diferencia porcentual de los sistemas constructivos

COMPARATIVO DE COSTO ENTRE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

ITEM	ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD		V/UNIT	V/TOTAL	
			CONVENCIONAL	REFORZADA		CONVENCIONAL	REFORZADA
1	Excavación mecánica y cargue	M3	0,60	0,25	\$ 16.900,00	\$ 10.140,00	\$ 4.225,00
2	Suministro e instalación de SBG	M3	0,30	0,15	\$ 78.000,00	\$ 23.400,00	\$ 11.700,00
3	Suministro e instalación de BG	M3	0,30	0,10	\$ 85.000,00	\$ 25.500,00	\$ 8.500,00
4	Sistema de confinamiento celular Neoweb	M2	0,00	1,00	\$ 20.000,00	\$ -	\$ 20.000,00
5	Geotextil T biaxial de alto flujo	M2	0,00	1,00	\$ 12.000,00	\$ -	\$ 12.000,00
6	Acarreo de material BG y SBG	M3/Km	15,00	6,25	\$ 1.200,00	\$ 18.000,00	\$ 7.500,00
7	Acarreo de material producto de excavación a ZODME	M3/Km	1,80	0,75	\$ 1.200,00	\$ 2.160,00	\$ 900,00
Valor total por M2						\$ 79.200,00	\$ 64.825,00
Menor valor del SCC						\$	14.375,00
Diferencia							18%

Fuente: Autor

De acuerdo a la evaluación realizada en los ítems representativos del proyecto para un metro cuadrado de estructura, se puede determinar un menor valor en la estructura reforzada con el SCC en un 18%.

Imagen 18: Características del terreno descapotado



Fuente: JOSEPH. Op. Cit.

En el desarrollo del proceso constructivo posterior a la localización, replanteo y el descapote, se procede a instalar el geotextil biaxial que separa las geoceldas y la

subrasante para evitar la contaminación del material usado como relleno, lo mismo que garantiza la misma resistencia a la tensión en ambos sentidos.

Imagen 19: Presentación del SCC e instalación del Geotextil



Fuente: Ibíd.

El sistema de geoceldas se presenta en paneles comprimidos que facilitan su transporte y manejo, lo mismo que su almacenamiento. Una vez definida el área a intervenir con el SCC se procede a su colocación mediante anclajes guía que permiten la extensión total de los paneles.

Imagen 20: Proceso de instalación del SCC sobre geotextil



Fuente: Ibíd.

Posteriormente a la instalación del SCC se procede al relleno de las celdas con material granular y su compactación permitiendo inmediatamente el paso de los equipos sobre la estructura reforzada.

Imagen 21: Proceso de relleno de geoceldas



Fuente: Ibíd.

Imagen 22: Proceso de compactación de geoceldas



Fuente: Ibíd.

Se debe tener en cuenta que no se debe bajo ninguna circunstancia, pasar equipos sobre la geoceldas sin rellenar.

Imagen 23: Proceso de instalación, llenado, compactación y posterior tránsito sobre la estructura reforzada



Fuente: Ibíd.

3.5 VENTAJAS DESDE EL PUNTO DE VISTA TIEMPO DE EJECUCION.

En el desarrollo del proyecto se presentan cambios en las condiciones iniciales de la subrasante que obliga en campo a desarrollar diferentes propuestas estructurales tratando de disminuir al máximo el movimiento de material en recuperación del área para mejorar su capacidad portante, estas propuestas contemplaron la colocación de geoceldas de 0,20 mts de ancho y generar estructuras con doble refuerzo de geocelda de 0,15 mts. Igualmente, se presentaron sectores en donde por las características del terreno no fue necesario el reforzamiento y solo se colocó el material granular de la capa de rodadura.

Imagen 24: Condiciones críticas que obligaron la construcción de estructuras de pavimento diferente a la inicialmente contemplada



Fuente: Ibíd.

A continuación se refleja las diferentes condiciones constructivas en el desarrollo de la estructura a lo largo de la vía.

Tabla 4: Estructuras configuradas de acuerdo a la subrasante

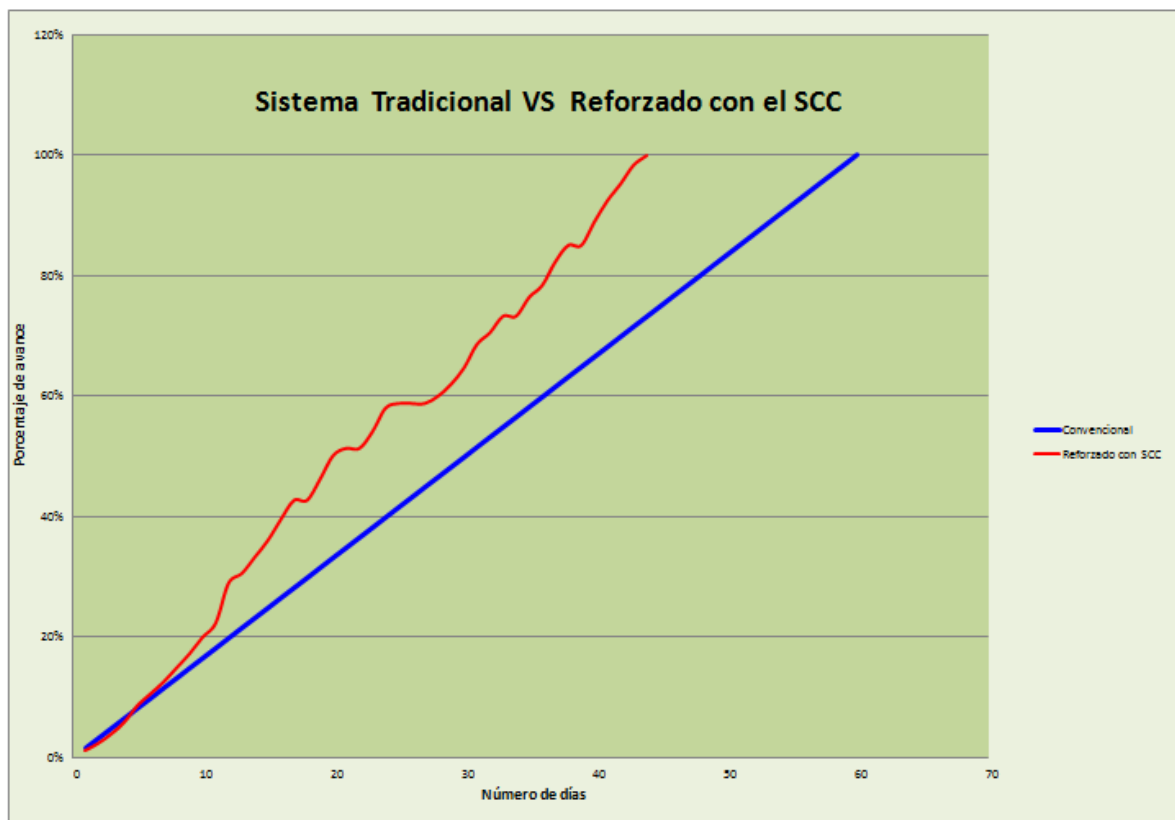
Abscisa		Geocelda (15cm Altura)	Geocelda (20cm Altura)	Geocelda Doble (15cm Altura c/u)	Granular
Inicial	Final				
K0 + 000	K0 + 220		Si		
K0 + 220	K0 + 260				Si
K0 + 260	K0 + 370		Si		
K0 + 370	K0 + 410				Si
K0 + 410	K0 + 480		Si		
K0 + 480	K0 + 510				Si
K0 + 510	K0 + 550		Si		
K0 + 550	K0 + 610	Si			
K0 + 610	K0 + 630				Si
K0 + 630	K0 + 840	Si			
K0 + 840	K0 + 900				Si
K0 + 900	K1 + 120	Si			
K1 + 120	K1 + 145				Si
K1 + 145	K1 + 250	Si			
K1 + 250	K1 + 345			Si	
K1 + 345	K1 + 420				Si
K1 + 420	K1 + 540			Si	
K1 + 540	K2 + 450	Si			

Fuente: ITINERIS. Informe de deflectometría y valoración de módulos para la vía de acceso al pozo exploratorio Tinkhana-1. Gestión de Infraestructura Ltda., 2010

Para la ejecución del proyecto se tenía programado un tiempo aproximado de 60 días debido a la complejidad del terreno y el clima, ya que la humedad es el principal problema que afecta el rendimiento de las obras por sus suelos con características de capacidad portante muy bajas.

Con la aplicación del SCC como refuerzo de la estructura, se pudo determinar un ahorro en los tiempos de ejecución ya que con la reducción de movimientos de material y la reducción en las excavaciones se minimiza el difícil manejo de la subrasante con baja capacidad portante.

Figura 26: Comparativo de tiempos de ejecución programados con sistema tradicional y la estructura reforzada con el SCC



Fuente: autor.

Con la aplicación de esta nueva tecnología, se pudo determinar un ahorro considerable en tiempo ya que el proyecto se pudo terminar 16 días antes de lo

estipulado; este avance corresponde a una disminución del tiempo de ejecución en un 27% aproximadamente, lo que implica un aporte significativo en costos de ejecución del proyecto.

Adicionalmente, en el desarrollo global del proyecto se pudo apreciar una disminución en el tiempo de entrega con respecto al compromiso adquirido por la operadora del campo con ANH (Asociación Nacional de Hidrocarburos), en virtud al comportamiento de la vía puesta en servicio para el transporte de material hacia la plataforma, lo que redujo el máximo las paradas por mantenimiento.

Imagen 25: Aspectos de tramos de la vía terminada



JOSEPH. Op. Cit.

3.6 VENTAJAS DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL

Dentro de los beneficios desde el punto de vista ambiental tenemos que al reducir el espesor de la estructura de la vía, igualmente se reduce la cantidad de material de cantera y su transporte, lo mismo que la magnitud de las áreas para disposición de los sobrantes producto de las excavaciones (ZODME).

Si tenemos en cuenta los 2.550 metros de longitud de la vía, por un ancho promedio de 5,0 metros incluyendo las cunetas para el manejo de aguas

superficiales y la disminución en el espesor de la estructura, que inicialmente se contemplaba 0.60 metros con el sistema tradicional a 0.25 metros con el refuerzo del SCC, podemos determinar una reducción de 0.35 metros, lo que implica un menor volumen de material a utilizar en el proyecto. Esta menor cantidad de material a utilizar corresponde a $4.462,50 \text{ m}^3$ ($2550 \times 5 \times 0.35$), lo que implica una menor afectación paisajística en el área de influencia del proyecto.

Teniendo en cuenta lo anterior, y que la capacidad de una volqueta vinculada al proyecto tiene características de doble troque con capacidad aproximada de 14 m^3 , podemos definir una menor cantidad de viajes a realizar para su acarreo contemplando la expansión del material; Este menor volumen transportado corresponde a 5.578 m^3 ($4.462,50 \times 1.25$), que son equivalentes a 398 viajes ($5578/14$) de volqueta.

Esta menor cantidad de viajes de volqueta, corresponden a menores consumos de combustible como también a menores emisiones de CO_2 al medio ambiente.

Si se tiene en cuenta que el consumo de combustible promedio de una volqueta de estas características es de aproximadamente 2,24 Kms / Litro, y una distancia aproximada de 25 kms a la cantera, se puede calcular el volumen de combustible ahorrado por la menor cantidad de material utilizado en el proyecto. Esto correspondería a 8.883,93 lts ($398 \times (25 \times 2) / 2,24$) que corresponden a 2.344 galones de combustible ahorrado.

Sin tener este ahorro en el consumo de combustible, igualmente tendremos una menor emisión de CO_2 al ambiente, que de acuerdo a los estándares para un motor de combustible diesel el promedio es de 2,65 kg por litro; podemos calcular que la disminución en la emisión de CO_2 al ambiente corresponde aproximadamente a 23.542,41 kg ($8.883,93 \text{ lts} \times 2,65 \text{ kg/lit}$).

Para verificar la efectividad del SCC se determinó realizar una evaluación estructural en los diferentes tramos de la vía, para lo cual la firma INTINERIS Gestión de Infraestructura realiza mediciones deflectométricas con un equipo LWD (Deflectómetro de Impacto Liviano) PRIMA 100, con el objeto de estimar la capacidad estructural de las capas conformadas con el refuerzo. Se enuncian a continuación los apartes más importantes del ensayo realizado.

Imagen 26: Esquema básico del equipo y funcionamiento del LWD



Fuente: MASTRAD. Deflectómetro de impacto portátil prima100 – fwd. Disponible en: <http://www.mastrad.com/prima100sp.htm>

El LWD es un equipo portátil usado para determinar el módulo dinámico de suelos y materiales granulares; está compuesto por una varilla vertical sobre la cual se desliza una pesa de 10 kg, con la cual a diferentes alturas graduables se puede conseguir diferentes esfuerzos, golpeando una goma amortiguadora o buffers. Una celda mide la fuerza aplicada y un geófono mide la deflexión de la superficie de la capa evaluada en el centro de la placa de carga.

Para evaluar el comportamiento estructural de las capas, se realizaron mediciones con el LWD (Deflectómetro de Impacto Liviano) cada 50 m. Estas mediciones se efectuaron sobre capas compuestas por diferentes materiales como son

granulares y reforzadas con el SCC en diferentes espesores, información que se encuentra consignada en la Tabla 4.

Imagen 27: Proceso de toma de mediciones en campo

ITINERIS. Op. Cit.



En la Tabla 5 se observan los valores promedio del módulo de las mediciones en cada abscisa correspondiente a cada capa granular con y sin reforzamiento con el SCC obtenidos.

Tabla 5: valores promedio del módulo de las mediciones en cada abscisa

Punto No.	Abscisa	Carga Promedio (KN)	D0 Promedio (µm)	Módulo Promedio (MPa)	Descripción de la capa
1	K0+000	13.7	610	71.8	Geocelda 20cm altura
2	K0+050	14.7	259	182.7	Geocelda 20cm altura
3	K0+100	14.5	202	230.3	Geocelda 20cm altura
4	K0+150	14.4	463	100.1	Geocelda 20cm altura
5	K0+200	14.7	241	196.6	Geocelda 20cm altura
6	K0+250	14.5	207	224.2	Granular
7	K0+300	14.3	292	157.6	Geocelda 20cm altura
8	K0+350	14.3	335	137.8	Geocelda 20cm altura
9	K0+400	13.8	350	126.6	Granular
10	K0+450	13.1	615	68.7	Geocelda 20cm altura
11	K0+500	15.3	124	395.2	Granular
12	K0+550	14.1	477	95.2	Geocelda 20cm altura
13	K0+600	14.7	135	348.7	Geocelda 15cm altura
14	K0+650	14.5	306	151.9	Geocelda 15cm altura
15	K0+700	14.9	241	198.4	Geocelda 15cm altura
16	K0+750	14.8	241	197.1	Geocelda 15cm altura
17	K0+800	15.0	235	204.6	Geocelda 15cm altura
18	K0+850	15.2	87	561.6	Granular
19	K0+900	14.9	302	158.4	Geocelda 15cm altura
20	K0+950	14.0	293	153.3	Geocelda 15cm altura
21	K1+000	14.9	306	156.6	Geocelda 15cm altura
22	K1+050	15.0	354	135.9	Geocelda 15cm altura
23	K1+100	14.4	732	63.2	Geocelda 15cm altura
24	K1+150	14.6	732	63.9	Geocelda 15cm altura
25	K1+200	14.1	345	130.5	Geocelda 15cm altura
26	K1+250	13.6	361	120.5	Geocelda 15cm altura
27	K1+300	14.7	219	216.0	Geocelda Doble 15cm altura c/u
28	K1+350	14.2	362	125.9	Geocelda Doble 15cm altura c/u
29	K1+400	14.1	366	123.4	Geocelda Doble 15cm altura c/u
30	K1+450	15.5	210	236.9	Geocelda Doble 15cm altura c/u
31	K1+500	13.1	438	96.2	Geocelda Doble 15cm altura c/u
32	K1+550	15.2	241	202.5	Geocelda 15cm altura
33	K1+600	14.9	447	106.8	Geocelda 15cm altura
34	K1+650	13.3	265	161.2	Geocelda 15cm altura
35	K1+700	13.3	254	168.6	Geocelda 15cm altura
36	K1+750	14.1	170	265.5	Geocelda 15cm altura
37	K1+800	14.4	131	354.9	Geocelda 15cm altura
38	K1+850	14.8	138	345.6	Geocelda 15cm altura
39	K1+900	14.8	115	413.5	Geocelda 15cm altura
40	K1+950	12.5	73	549.5	Geocelda 15cm altura
41	K2+000	13.5	118	366.5	Geocelda 15cm altura
42	K2+050	13.2	318	133.0	Geocelda 15cm altura
43	K2+100	14.5	737	63.2	Geocelda 15cm altura
44	K2+150	14.4	623	74.1	Geocelda 15cm altura
45	K2+200	13.8	717	61.8	Geocelda 15cm altura
46	K2+250	14.6	116	405.3	Geocelda 15cm altura
47	K2+300	13.9	713	62.5	Geocelda 15cm altura
48	K2+350	13.9	546	81.5	Geocelda 15cm altura
49	K2+400	14.7	365	129.0	Geocelda 15cm altura
50	K2+450	14.7	371	127.2	Geocelda 15cm altura

Fuente: Ibíd.

Tabla 6: Resultados obtenidos de las mediciones sobre la subrasante

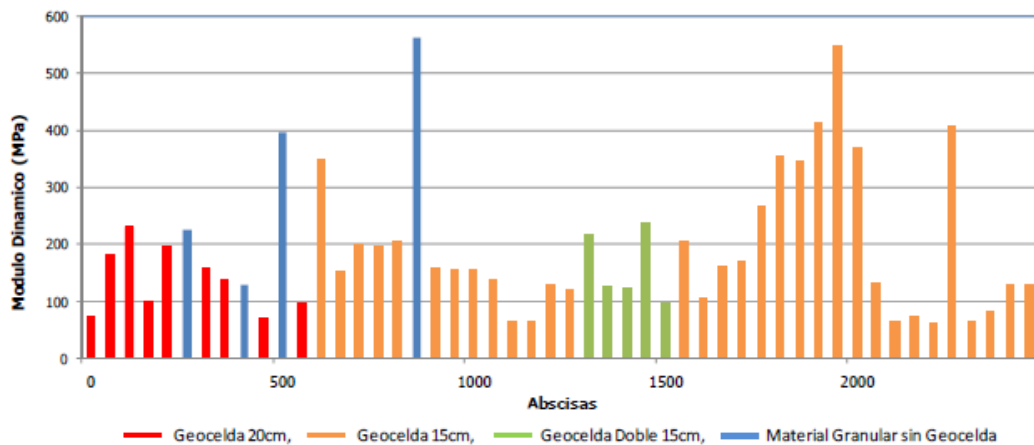
Punto No.	Abscisa	Carga Promedio (KN)	D0 Promedio (µm)	Módulo Promedio (MPa)	Descripción de la capa
1	K0+100	4.3	5105	2.45	Subrasante
2	K0+300	3.1	4199	2.14	Subrasante
3	K0+450	3.7	587	17.78	Subrasante
4	K0+900	2.8	3481	2.32	Subrasante
5	K2+000	3.3	670	14.08	Subrasante
6	K2+400	3.2	1330	6.85	Subrasante

Fuente: Ibíd.

Como se observa, el comportamiento del módulo sobre capa granular con el SCC en la extensión del tramo es muy variable (Figura 25), esto se puede dar debido a posibles cambios de humedad, gradación discontinua y en general a la heterogeneidad del material componente de la capa granular.

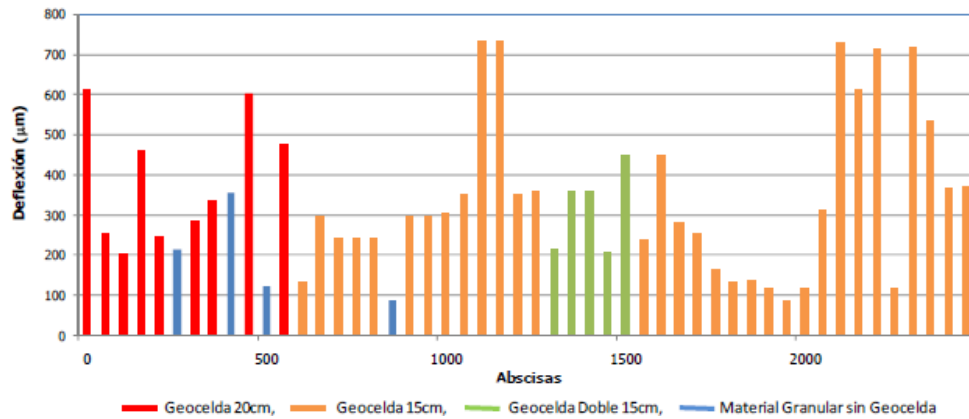
Los valores de módulo de la subrasante obtenidos en las mediciones con el LWD, varían entre 2.0 y 20 MPa lo cual indica una subrasante con una capacidad de soporte muy baja. Este módulo de subrasante tan bajo es evidencia de la necesidad de implementar un mejoramiento. En las Figuras 25 y 26, se puede observar la tendencia de comportamiento del tramo en términos de módulo y deflexiones.

Figura 27: Variación del módulo dinámico a lo largo de la vía



Fuente: Ibíd.

Figura 28: Variación de las deflexiones a lo largo de la vía



Fuente: Ibíd.

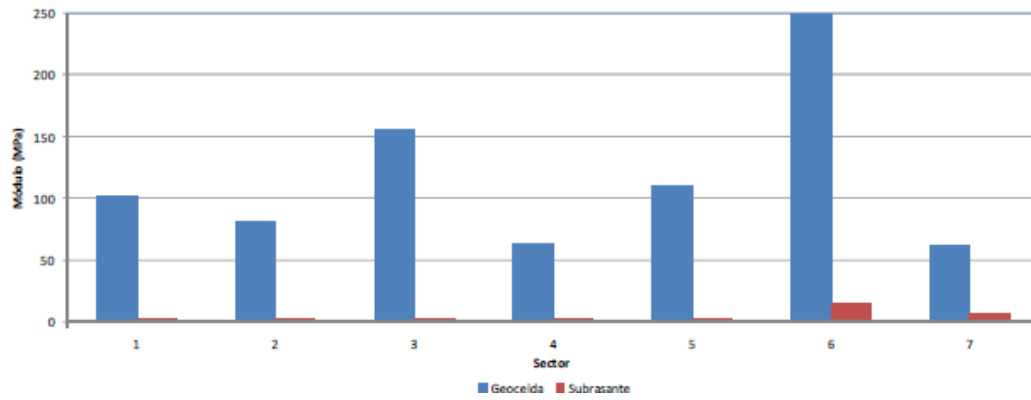
En la Tabla 7 y la Figura 27, se puede observar el parámetro módulo dinámico para cada sector, dada la variabilidad de los datos, lo cual se puede ratificar por medio de los resultados del coeficiente de variación, fue necesario utilizar el percentil 85 y de esta forma asegurar que los valores de módulo adoptados para cada sector son representativos del mismo.

Tabla 7: Parámetros estructurales representativos de las secciones homogéneas

Sector	Desde	Hasta	Módulo sobre geocelda (MPa)	Módulo subrasante representativo del sector
1	K0+000	K0+350	102	2.45
2	K0+350	K0+650	81	2.14
3	K0+650	K0+950	156	2.32
4	K0+950	K1+250	64	2.32
5	K1+250	K1+700	110	2.32
6	K1+700	K2+050	252	14.08
7	K2+050	K2+450	62	6.85

Fuente: Ibíd.

Figura 29: Módulos en percentil para cada uno de los sectores



Fuente: Ibíd.

4. CONCLUSIONES

Se puede concluir que la aplicación del SCC como refuerzo a la estructura de la vía, desde el punto de vista económico, presenta ventajas al permitir la reducción de costos aproximados al 18 % en los sectores en donde se colocó geoceldas sencilla de 0.15 mts. Esta disminución de costos se determina por la menor cantidad de material requerido en la estructura reforzada y su reducción en el acarreo del mismo.

Igualmente, se determinó una reducción en los tiempos de ejecución del proyecto en aproximadamente del 27%, lo que permitió el cumplimiento del compromiso de la operadora del campo con la ANH 43 días antes con la entrega del proyecto global, esto debido en gran parte al comportamiento de la vía puesta en servicio para el transporte de material hacia la plataforma, lo que redujo el máximo las paradas por mantenimiento.

Teniendo en cuenta la disminución de material a remover con la aplicación del SCC como refuerzo en la estructura de la vía, se pueden determinar beneficios desde el punto de vista ambiental; estos beneficios se representan en menor movimiento de volquetas para el transporte de material, lo que implica un menor consumo de combustible representado para el proyecto en 2.344 galones de diesel. Esto representa menores emisiones de CO₂ al ambiente en un volumen aproximado de 23.542 kg. De otra parte, los menores consumos de material en el desarrollo de la obra permiten una menor afectación del paisaje en el entorno del proyecto, lo mismo que se disminuye la afectación por material particulado en las comunidades de influencia directa, lo mismo que los costos que implican su mitigamiento de acuerdo a la licencia ambiental.

Con los ensayos de deflectometría realizados a lo largo de la vía, se pudo determinar que el comportamiento a lo largo del tramo es variable, esto se puede dar por cambios de humedad en la capa entre cada uno de los sectores, gradación discontinua, diferencias en la resistencia de la subrasante y en general heterogeneidad del material granular. Para las condiciones particulares del proyecto, se encontraron valores de módulo medidos sobre capa de material granular con el SCC que varían entre 62 y 250 MPa, cuyos resultados se pueden expresar de forma probabilística como un mejoramiento del suelo natural de subrasante entre 5 y 10 veces con respecto a su módulo inicial, cuya variación se puede dar de acuerdo a las condiciones específicas de la subrasante en cada punto.

REFERENCIAS

Corporación para el desarrollo sostenible del sur de la Amazonía. Disponible en: http://www.corpoamazonia.gov.co/Region/Jur_geologia.htm

Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios manuales. Curso de aprendizaje. Disponible en:

http://www.bvsde.paho.org/curso_rsm/e/unidad6.html

EMERSLEBEN, A. y MEYER, N. Mechanical behavior of geocell reinforced soils. Information and lectures congress of the speciality section, 2005.

GAETE, R., FUENTES, C. y VALVERDE, S. Uso del Deflectómetro de impacto para la evaluación estructural de recapados asfálticos sobre pavimentos de hormigón. Disponible en:

http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/27GaeteRecapadosobrehormigon.pdf

(Visitado el 20 de mayo de 2013)

GEOSISTEMAS PAVCO. Soluciones para la infraestructura vial Neoweb, Sistema de Confinamiento Celular. Bogotá, 2011

Grupo Mapa Geológico de Colombia. Disponible en:

<http://www.ingeminas.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia.aspx>

HAN, J., LESHCHINSKY, D., y PEARSONS, R. Behavior of Geocell-Reinforced Sand Under a Vertical Load. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008. 95-101 p.

ITINERIS. Informe de deflectometría y valoración de módulos para la vía de acceso al pozo exploratorio Tinkhana-1. Gestión de Infraestructura Ltda., 2010

JOSEPH, C. Implementación de nueva tecnología Geoceldas. Ecopetrol: Proyecto Tinkhana-1, 2012.

KIEF, O. y RAJAGOPAL, K. Three dimensional cellular confinement system contribution to structural pavement reinforcement. Geosynthetics India, 2008.

LILLI, F. Curso sobre diseño racional de Pavimentos. Popayán, 1987

MASTRAD. Deflectometro de impacto portátil prima100 – fwd. Disponible en: <http://www.mastrad.com/prima100sp.htm>

MUÑOZ E., et al. Infraestructural vial. Disponible en:

<http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/images/ediciones/revistas-pdf/R-16/R16-08-2006.pdf> (visitado el 20 abril de 3013)

Obras y servicios del Uruguay. Disponible en:

<http://www.osusa.com.uy/mantenimiento.php> (visitado el 20 abril de 3013)

Página oficial, Puerto Caicedo. Disponible en: <http://puertocaicedo-putumayo.gov.co/sitio.shtml?apc=mmxx1-&x=1896237> (visitado el 20 abril de 3013)

POKHAREL, S, et al. Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading. Geotextiles and geomembranes. 2010. 570-578 p.

Professional Reinforcement Solutions. Tinkhana-1 Well Access road, Colombia, Neoweb Reinforcement System for Unpaved Road Support. (s.c.), 2010.

VACCA, H. Estabilización de una subrasante en laboratorio con un sistema de geoceldas. En: Octavas jornadas internacionales del asfalto. Memorias. Colombia, 2012.

VERGARA, H. B. Diseño directo de pavimentos