“Propuesta de disposición final para cortes de perforación contaminados con diésel”

**Autor**

Ing. Alejandro Silva Gutsens

**Tutor**

MSc. Ing. Yuletsis Díaz Rodríguez

## **Introducción**

La prospectiva es una herramienta que permite escudriñar el futuro para incidir en el presente y mejorarlo con imaginación y realismo. Usada originalmente por militares, políticos y empresarios, hoy diversos grupos de investigaciones contribuyen a este esfuerzo prospectivo diseñando posibles escenarios de la humanidad a 15 ó 20 años vista. También se ha realizado algunas investigaciones sobre el futuro de la humanidad a 100 años vista que, por primera vez, diseña el escenario del mundo después de una época de caos generalizado (la actual). Esta época caótica coincide con la transición a un nuevo siglo (2000-2100). Un mundo inimaginable donde la contribución de todos debe empezar desde hoy mismo, donde el cuidado y preservación del medio ambiente entra a jugar un rol esencial en la humanidad.

En este último tiempo las preocupaciones ambientales sobre nuestro planeta se han ampliado dramáticamente en los últimos decenios y figuran ahora entre los más graves desafíos para el bienestar de la humanidad en todo el mundo al igual que a futuro. Se ven afectadas todas las naciones, pero con frecuencia son los países más pobres y las poblaciones menos privilegiadas quienes soportan la mayor parte de la carga. Los cuales sufren grandemente los efectos de la destrucción ambiental y el cambio climático y son los que tienen menos recursos disponibles para adaptarse a situaciones cambiantes, como la lucha contra la degradación ambiental y las medidas en favor de la sostenibilidad del medio ambiente.

La actividad petrolera es una de las industrias que más impactos ambientales y en la biodiversidad genera a nivel local y global de manera negativa, en las distintas fases de la explotación petrolera y en las prácticas operacionales típicas. Se produce destrucción de la biodiversidad y del ambiente en general. Por otro lado, la quema de combustibles fósiles constituye la principal causa del calentamiento global.

Para analizar los impactos de esta industria en la biodiversidad, no podemos limitarnos a analizar el impacto que el petróleo crudo tiene en cada una de las especies o en los ecosistemas, sino que hay que entender cómo funciona la industria de la extracción petrolera en diferentes ecosistemas y los residuales que genera como son los cortes de perforación contaminados con diésel los cuales son una fuente de contaminación y de toxicidad para los organismos presentes en un ecosistema por largo tiempo, principalmente en los países tercermundistas los cuales escasean de recursos para obtener tecnologías y sustancias amigables con el medio ambiente a la hora de tratar ese residual que afecta directamente los suelos, las aguas y el aire.

En un mundo cada vez más preocupado por la sostenibilidad y la conservación del medio ambiente, es esencial buscar soluciones innovadoras y eficientes para reducir la contaminación y promover la economía las cuales lleguen a todo el mundo y sean aplicables para todos los países tanto lo desarrollados como los que están envía de desarrollo, para así construir nuevos horizontes de sostenibilidad y protección ambiental. Una propuesta evaluada que podría revolucionar en el mundo tanto la industria petrolera como la industria de la construcción es el reúso de cortes de perforación contaminados con diésel para la fabricación de pavimento asfáltico. Este artículo, tiene como objetivo determinar cómo esta práctica podría desarrollarse en el futuro y los impactos positivos que tendría en el medio ambiente y la sostenibilidad para el 2100.

## **Capítulo 1. Resultados investigativos de la propuesta hacia horizontes 2100**

En el presente capítulo se exponen los resultados científicos alcanzados a partir de los ensayos realizados a los cortes de perforación contaminados con diésel. Así mismo, se valora la efectividad del reúso de los cortes como materia prima en la conformación de pavimento asfáltico dando un valor de uso a dicho residual y de esta manera implementar esta propuesta en todos los países principalmente en los que están en vías de desarrollo. Pues se alinea con los principios de la economía circular y la sostenibilidad, al promover la reutilización de materiales contaminados, la reducción de residuos y la creación de productos sostenibles. Su implementación podría contribuir a un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente camino hacia el 2100.

## **1.1.** **Características de los residuos**

Los resultados de la caracterización físico-química se reportan en el anexo 1. Los mismos evidenciaron valores de grasas y aceites, hidrocarburos totales de petróleo y pH que exceden los parámetros regulados para disposición final. Por tal motivo no pueden ser dispuestos sin previo tratamiento, según define la norma de tratamiento de residuos petrolizados (NC 819:2017).

Los cortes también poseen un alto porcentaje de humedad asociado al contenido de diésel en el mismo y que se encuentra superior al 5 % que se establece en la licencia ambiental otorgada por el organismo regulador (Resolución 136:2009).

## **1.1.2. Composición granulométrica del corte seco**

Los resultados del análisis granulométrico evidenciaron que la granulometría del corte seco se encuentra dentro del rango 0,075 - 0,01 mm en tamizado No. 200 ya que pasa la mayor cantidad (88%). Esto corresponde a un árido tipo fino compuesto por limo, arcilla y coloides (NC 20:1999).

Para la evaluación del tipo de árido que conforma el corte de perforación se consideró la norma cubana (NC 759:2010) sobre áridos para mezclas asfálticas. El corte seco clasifica según su granulometría como *filler* para mezclas asfálticas (relleno mineral). En tal caso se considera un material finamente dividido donde más del 70 % de las partículas pasa por el tamiz 200. Los *fillers* son usados principalmente como modificadores de la granulometría del árido (NC 759:2010). De este modo se posibilita mejorar la trabajabilidad, la adherencia y la durabilidad de los áridos permitiendo la utilización de los cortes como componente parcial en la sustitución de los áridos que se utilizan convencionalmente para la producción de pavimentos asfálticos.

## **1.2. Estado de compactación del corte seco como suelo**

La variación del porcentaje de humedad se representó gráficamente (figura 1), con el objetivo de valorar el corte seco con diferentes contenidos de agua y no solo su comportamiento individual. El análisis se realizó por cada propiedad medida. Los valores de referencia marcados en los gráficos corresponden a los exigidos en la norma (ASTM D 1557:12). A partir del peso específico del corte de perforación en estado seco y suelto (18,53 kN/m3) se obtuvo la humedad óptima de 9,3 % para la compactación del material como suelos, pues con un contenido de humedad superior a este comienza a decrecer el peso específico lo que afecta la compactación, integridad y calidad del material para su uso como pavimento. Dicho resultado se debe tener en cuenta en las posteriores pruebas de campo pues con una humedad aproximada se garantiza que el corte seco compacte de manera viable lo que influye en la durabilidad y calidad de dicho suelo. También se obtuvo una saturación 82 % lo que significa que la muestra de suelo se ha compactado con una cantidad de agua que representa el 82 % de lo puede retener y, aun así, ser compactado a su máxima densidad seca. Tal situación se considera óptima según se especifica en la norma (ASTM D 1557:12).

**Figura 1.** Compactación del corte seco como suelo

En general la humedad puede actuar sobre la pérdida de adherencia, lo que es el punto de partida de muchas fallas en el pavimento ya que ataca directamente la compatibilidad entre el asfalto y los áridos, así como la cohesión de la matriz de asfalto. En este sentido es posible que el contenido de diésel presente en el corte seco permita la compactación del material con un menor grado de agua lo que influye positivamente para evitar la pérdida de la adherencia o cohesión. Como resultado se obtendrá la reducción de la rigidez o resistencia para los materiales de pavimentación de carreteras.

## **1.3. Evaluación de mezcla para pavimento**

Los resultados al utilizar el corte seco para la confección de las probetas con las mezclas diseñadas mostraron una homogeneidad y compactación favorable desde el punto de vista visual. Sin embargo, en el caso de las probetas que contenían los cortes húmedos evidenciaron signos de plasticidad al tacto, debido al alto nivel de hidrocarburo que presentaban en su composición. Tal situación comprometía la integridad parcial de las probetas como resultado del desmoronamiento. Por tal motivo se determinó continuar las pruebas solamente con las probetas con corte seco.

Los cálculos de las densidades a las probetas de corte seco (S1, S2, S3, S4, S6 y S7) se presentan en el anexo 2, donde se obtuvieron valores viables respecto a la densidad (superior a 2,33 g/cm3) que plantea la norma (NC 261:2005). Esto se debe a que los diseños de mezclas y cada componente que la integran poseen propiedades esenciales como: la resistencia que brinda la granalla y el aglutinante que aporta el diésel, lo que permite la compactación entre el corte seco y los áridos molidos.

Sin embargo, la probeta S5 mostró valores inferiores a lo establecido por la normativa de referencia (NC 261:2005). Esto puede estar asociado a la ausencia de granalla en el diseño de mezcla ya que la misma incrementa el peso por unidad de volumen con el aporte óxidos metálicos de su composición.

A partir del incumplimiento del requerimiento respecto a la densidad, se inhabilita la probeta S5 para el ensayo de estabilidad.

## **1.3.1 Estabilidad y deformación preliminar en equipo Marshall**

La prueba preliminar de estabilidad Marshall fue realizada a las probetas sin adición de mezcla asfáltica, pues el objetivo principal es analizar el comportamiento del diésel como aglutinante o adherente pétreo. Al respecto se realizaron algunas observaciones sobre los resultados anexo 3, donde se evidenció que el factor de corrección varió entre 1 y 1,39. Tal situación indica que la carga medida en las pruebas se ajustó correctamente para el tamaño de la muestra utilizado, según especifica en la norma cubana (NC 261:2005). La altura de las probetas permanece entre 5,3 cm y 6,4 cm, lo que también se encuentra en el rango típico de altura para esta prueba (NC 261:2005).

En el caso de la carga, se registraron cargas máximas que oscilan entre 44 kN y 72 kN, lo que influyó en la estabilidad Marshall de todas las probetas obteniéndose valores entre 9,48 kN y 12,41 kN, lo que demuestra que son estables y capaces de soportar cargas sin sufrir una deformación plástica pues están dentro del rango aceptable de 9 a 13 kN según establece la normativa de referencia (NC 261:2005).

A cargas más bajas pueden mostrar una falta de resistencia a la deformación permanente, mientras que cargas más altas pueden indicar una mezcla demasiado rígida que puede agrietarse o romperse bajo cargas repetidas.

La estabilidad Marshall más alta (12,41 kN) y la densidad de la mezcla compactada más baja (2,42 g/cm³), pero superior al valor de aceptación (˃ 2,33 g/cm3) (NC 261:2005), se registró con la probeta S4,lo que se identifica como la más viable.

En la conformación del pavimento asfáltico una buena estabilidad es importante porque indica que la mezcla tiene la capacidad de soportar las cargas de tráfico sin deformarse o romperse. Si la mezcla asfáltica no tiene una buena estabilidad, puede sufrir deformaciones permanentes o agrietarse prematuramente, lo que puede llevar a una vida útil reducida de la carretera y a costos adicionales de mantenimiento y reparación. Por otro lado, una baja densidad, pero con valor superior al de aceptación, puede ser beneficiosa porque reduce el peso de la mezcla asfáltica y, por lo tanto, reduce el costo de transporte y la cantidad de asfalto necesario para construir la carretera. Sin embargo, es importante encontrar un equilibrio entre la densidad y la estabilidad de la mezcla asfáltica a conformar, ya que una densidad demasiado baja puede comprometer la capacidad de la mezcla para soportar las cargas de tráfico según los estudios realizados.

Estos resultados de la prueba de estabilidad son preliminares, pero sugieren de manera general que los cortes de perforación tienen potencialidad para ser utilizados como componente parcial en la disminución del volumen de mezcla asfáltica en la fabricación de pavimento asfáltico ya que cumple con los requisitos de la norma cubana (NC 261:2005).

## **1.4. Comportamiento del CBR del corte seco**

El ensayo CBR para el corte seco, obtuvo un porcentaje elevado de compactación del suelo (87 - 99 %), lo que sugiere que el suelo ha sido compactado adecuadamente. También se alcanzó una humedad de 10,6 % la cual se debe tener en cuenta para las pruebas de campos posteriores pues con un contenido de humedad superior a este comienza a decrecer el peso específico lo que afecta la compactación, integridad y calidad del material para su uso como pavimento.

También el peso específico seco del corte seco indicó que el suelo es denso y puede proporcionar cierta resistencia a la deformación según especifica la (ASTM D 1883-07). Los valores de CBR para los dos diámetros de pistón (2,54 mm y 5,08 mm) son relativamente bajos. Esto se analiza para determinar el posible uso como capas de la carpeta asfáltica según la (NC 334:2004), indicando que el suelo tiene una capacidad de carga limitada y no puede ser utilizado como base en carreteras.

Sin embargo, se obtuvo un índice de CBR de 46 % a los 55 golpes, superior al rango mínimo de (20 a 30) % que se establece en la norma de referencia (NC: 334:2004). De este modo el corte seco puede ser usado como materia prima principal para la conformación de sub-base en pavimentos asfálticos.

Según el valor de CBR de 46 % es posible emplearlo como sub-base en carreteras, aeropuertos, caminos de baja intensidad de tráfico y de bajo costo como especifica la norma cubana (NC 161:2002) para Carreteras. Bases y sub-bases de caliza blanda.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se analizaron muestras de CBR con diferentes relaciones de mezclas que influyan en propiedades como la resistencia a la deformación. Tal es el caso de la granalla y así poder evaluar mejoras en las propiedades para la aplicación.

## **1.4.1 Comportamiento del CBR en las diferentes relaciones de mezclas**

Los resultados de las pruebas de CBR demuestran que las probetas SH1 y SH3 tienen los valores de CBR más altos con porcentajes de 33 % y 32 % para el ensayo de 2,54 mm.

**Tabla 1.** Comportamiento del CBR en los diseños de mezcla

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Probetas** | SH1 | SH2 | SH3 | SH4 |
| **Molde No** | P | L | L | P |
| **% CBR 2,54 mm** | 33 | 8 | 32 | 13 |
| **% CBR 5,08 mm** | 32 | 8 | 28 | 13 |
| **Densidad seca (kg/m3)** | 2 258 | 2 178 | 2 195 | 2 197 |

Las determinaciones indicaron que dichas probetas pueden ser recomendadas para su empleo en capas de sub-base en un vial a reparar o nuevo; o en los casos de bacheos profundos donde la afectación llegue al nivel de la subrasante, según especifica la norma de pavimento flexible de carreteras (NC 334:2004).

Por otro lado, las probetas SH2 y SH4 tienen valores de CBR menores que 20 %, según se establece (NC: 334:2004), lo que no es adecuado para su uso en viales.

La humedad promedio es similar en todas las probetas, con valores entre 3,2 % y 5,5 %, lo que se debe tener en cuenta para la conformación de las mezclas en las pruebas posteriores de campo.

A pesar de que los valores de resistencia con SH1 y SH3 fueron ligeramente inferiores (33 y 32 %, respectivamente) a los obtenidos con corte seco también son efectivos para emplearlos como sub base en carreteras, aeropuertos, caminos de baja intensidad de tráfico y de bajo costo como se especifica la norma cubana (NC 161:2002) para carreteras.

## **1.4.2. Análisis estadísticos de las probetas de CBR con mejores resultados**

El análisis ANOVA (figura 2 b)) de medias repetidas para comparar los porcentajes de CBR entre los tres tipos de suelo con las probetas con mejores resultados (corte seco y las mezclas seleccionadas). Entre las mediciones repetidas dentro de cada tipo de suelo se demostró la variabilidad de los datos dentro de cada nivel de suelo (Cs1, SH1 y SH3) con diferencias significativas entre los tres tipos de suelo con un nivel del 95,0 % de confianza (figura 2 a). Se observa una mayor variabilidad dentro del nivel de suelo Cs1 que en los otros dos niveles. También evidenció que los porcentajes de CBR son similares entre las otras dos probetas de cada nivel y que el tipo de suelo tuvo un efecto significativo en el porcentaje de CBR.

 

1. **b)**

**Figura 2**. Análisis estadísticos: a) dispersión por código de nivel y b) Anova para CBR.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, se considera que los cortes secos (Cs1) tienen mayor potencialidad para su utilización en la construcción de carreteras y pavimentos.

La alternativa evaluada se considera atractiva para la industria de la construcción, demostrando la disminución de costos de obtención de áridos que se utilizan convencionalmente para la producción de dichos materiales. Consecuentemente se disminuirán loscostos evitados por multas a las empresas petroleras perforadoras como consecuencia del incumplimiento de las medidas de regulación ambiental para el manejo de desechos peligrosos. Además, la utilización de este residual para la conformación de materiales de la construcción sería una alternativa de disposición final segura que elimina contrataciones adicionales con empresas extranjeras para el tratamiento de los cortes de perforación contaminados con diésel. Lo más importantes que es una práctica sustentable que da un valor de reúso al residual contribuyendo a la economía circular y siendo una propuesta muy interesante desde el punto de vista económico para los países tercermundistas donde no se cuenta con tecnologías avanzadas para su tratamiento y no habría necesidad de explotar materias primas convencionales que son costosas.

**1.5. Impacto social y medioambiental rumbo al 2100**

Dentro de un concepto de desarrollo sostenible e impacto ambiental y social positivo, con la propuesta evaluada se garantiza que la industria petrolera se enmarque en el objetivo de la conservación y el uso racional de los recursos naturales, la protección del ecosistema y la salud humana. Además, se contribuye a reducir los volúmenes almacenados de desechos peligrosos de este tipo con el desarrollo de nuevos métodos en procesos de recuperación y reciclaje para el uso eficiente de los recursos y la utilización de materiales de desechos como recurso verde. En adición a eso, se disminuyen los riesgos a los que están expuestos los trabajadores y personas de las comunidades cercanas a las entidades que contienen los cortes. También, el reúso de los cortes de perforación para pavimento tendrá un impacto positivo en la reducción de emisiones de carbono. Al utilizar estos cortes en lugar de materiales tradicionales, se evitará la extracción de recursos naturales disminuiría la emisión de gases de efecto invernadero asociados a estas actividades. La disminución de los residuos de construcción y demolición también contribuiría a la reducción de los vertederos y a la contaminación del suelo y del agua. Esto apoyará a la lucha contra el cambio climático y la mejora de la calidad del aire. Además, la implementación de la economía circular fomentará la creación de empleo en el sector de la gestión de residuos y la producción de pavimento todo ello hacia un 2100 sostenible.

## **Capítulo 2. Un enfoque de la propuesta hacia el futuro sostenible**

En este capítulo, se explorará cómo la propuesta evaluada está enfocada en un futuro sostenible, utilizando la imaginación como una herramienta fundamental para la innovación. Se analizará cómo la investigación y el desarrollo científico pueden desempeñar un papel crucial en la creación de soluciones sostenibles para desafíos ambientales y sociales. Se considerará el papel de la imaginación y la creatividad en la generación de nuevas ideas y enfoques para abordar problemas complejos, y se explorarán las formas en que la ciencia puede impulsar un cambio positivo hacia un futuro más sostenible.

## **2.1. La industria petrolera en el año 2100 como sector en constante evolución hacia prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente**

Hacia finales de 2100, la humanidad habrá experimentado un cambio radical en la forma en que utiliza los recursos naturales, en particular en la industria petrolera y su impacto en el medio ambiente. La innovación y la originalidad serán clave en esta visión científica del futuro, con avances tecnológicos y prácticas sostenibles que transformarán por completo la forma en que el petróleo y sus derivados se utilizan y gestionan.

En esta visión, se habrá logrado desarrollar tecnologías avanzadas para el reciclaje y reutilización de cortes de perforación contaminados con diésel. Estos residuos se habrán convertido en materias primas para la producción de materiales de pavimentación sostenibles, contribuyendo así a la reducción de desechos y la disminución de la dependencia de materiales no renovables.

Además, la industria petrolera habrá evolucionado hacia una dominancia de tecnologías limpias, las cuales se alinearán hacia la optimización de la eficiencia energética en sus operaciones, utilizando tecnologías avanzadas para minimizar el consumo de energía y maximizar la producción de petróleo de manera sostenible. También, se invertirá en la exploración y perfeccionamiento de nuevas tecnologías, como la bioenergía, la electrificación de equipos y la producción de biocombustibles, con el objetivo de diversificar su cartera energética y avanzar hacia un futuro más sostenible.

A nivel global, la humanidad habrá alcanzado un equilibrio delicado entre el desarrollo económico y la conservación ambiental tanto en los países desarrollados como los que están en vías de desarrollo. La innovación científica habrá permitido la restauración de ecosistemas dañados, la preservación de la biodiversidad, la adaptación a los efectos del cambio climático y el cese de los conflictos internacionales por los preciados recursos naturales. Se habrá desarrollado tecnologías avanzadas para la gestión sostenible del agua, la reducción de la contaminación del aire y la optimización de la producción de alimentos para una población mundial en crecimiento.

A medida que nos acercamos a este futuro, esta visión no solo representa un avance significativo en términos de sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece la conexión entre la ciencia, la tecnología y la preservación del planeta, generando un impacto sensible en la conciencia colectiva y promoviendo un cambio de paradigma hacia un desarrollo más equitativo y sostenible para la humanidad donde exista oportunidades para todos y las alianzas entre los países estén en su máximo esplendor, donde la guerra y todos los conflictos bélicos hayan acabado, pues lo verdaderamente importante en ese 2100 es la búsqueda de nuevas herramientas para el desarrollo.

## **2.2. Enfoque científico del futuro de la alternativa de reúso de los cortes de perforación contaminados con diésel**

En el año 2100, la humanidad habrá alcanzado un punto crucial en el desarrollo sostenible, donde la ciencia y la tecnología se habrán convertido en el pilar fundamental para la preservación del planeta. Una de las propuestas revolucionarias que se vislumbra en esta época es la transformación de residuos de perforación contaminados con diésel en pavimentos sostenibles. Esta visión se basa en una serie de argumentos científicos sólidos presentados en el anterior capítulo que impacta de manera directa en la conciencia ambiental y la economía del país donde se aplique.

La sostenibilidad y el impacto ambiental positivo de los cortes de perforación contaminados con diésel en la fabricación de pavimento asfáltico son un avance significativo en la ingeniería de materiales y la construcción de infraestructuras. Este innovador enfoque no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también disminuye la cantidad de residuos contaminantes que se generan durante la construcción de calles, carreteras y aeropuertos.

La clave de esta novedosa investigación radica en la capacidad de los cortes de perforación contaminados con diésel para formar parte de la matriz asfáltica, reduciendo así la cantidad de energía y recursos necesarios para la producción de pavimento.

## **2.2.1. Beneficios futuros del uso de cortes de perforación contaminados con diésel en la fabricación de pavimento**

1. Neutralización total de las emisiones de carbono: Gracias a la implementación generalizada de esta tecnología, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la pavimentación serán eliminadas por completo. Esto contribuirá significativamente a contrarrestar el cambio climático y a mejorar la calidad del aire de manera irreversible. Abriendo paso a un futuro donde el aire es puro y el cambio climático es solo un recuerdo lejano.
2. Transformación de residuos contaminantes en recursos valiosos: Los cortes de perforación contaminados con diésel no solo serán reutilizados en la fabricación de pavimentos asfálticos, sino que también se convertirán en una valiosa fuente de materiales para otras industrias, reduciendo drásticamente la cantidad de desechos que se generan y contribuyendo a un modelo de economía circular sostenible.
3. Protección total de los recursos naturales: La reutilización de los cortes de perforación contaminados con diésel será tan eficiente que la demanda de materiales vírgenes se verá reducida a cero, preservando así los recursos naturales garantizando que las generaciones futuras hereden un planeta próspero y lleno de vida.
4. Infraestructuras que resisten el paso del tiempo: Los pavimentos asfálticos producidos con cortes de perforación contaminados con diésel serán tan duraderos que las reparaciones y el mantenimiento serán cosas del pasado, contribuyendo a reducir el consumo de recursos y la generación de residuos relacionados con la vida útil de las infraestructuras de manera permanente.

## **2.3. Descripción futurista del proceso de la propuesta evaluada utilizando tecnologías avanzadas en el año 2100:**

1. Recolección e identificación inteligente: Drones especializados equipados con tecnología de análisis químico avanzado escanearán continuamente las áreas de perforación en busca de cortes contaminados con diésel. Utilizando algoritmos de inteligencia artificial, los drones identificarán y recopilarán los cortes, asegurando una recolección eficiente y precisa. Estos cortes serán transportados a plantas de procesamiento designadas para su tratamiento.
2. Nanobots de separación: Una vez en la planta de procesamiento, los cortes de perforación serán sometidos a un revolucionario proceso de separación asistido por nanobots. Estos diminutos robots inteligentes detectarán y eliminarán selectivamente materiales no deseados, como piedras, tierra u otros residuos. El objetivo es obtener un material homogéneo compuesto principalmente por perforaciones y residuos de aceite diésel.
3. Bio-reparación y rejuvenecimiento: Posteriormente, utilizando biotecnología de vanguardia, se emplearán microorganismos diseñados genéticamente para reparar y reducir el contenido de diésel. Estos microorganismos ayudarán a descomponer cualquier residuo restante y a fortalecer la estructura del material para su uso posterior en la fabricación de pavimentos. Esto garantizará que el material resultante cumpla con los estándares ambientales y de seguridad para su uso en la fabricación de pavimentos asfálticos.
4. Fabricación de asfalto adaptable: La inteligencia artificial colaborativa en las plantas de fabricación de asfalto controlará cada etapa del proceso. Los algoritmos de aprendizaje automático ajustarán la composición de los ligantes, agregados y cortes procesados para adaptarse a las condiciones específicas de cada proyecto, asegurando un pavimento asfáltico optimizado para su entorno. Los ligantes podrán ser obtenidos a partir de fuentes alternativas sostenibles, como polímeros reciclados o bio-bitumen, lo que potenciará aún más la sostenibilidad del proceso.
5. Impresión 3D de pavimentos: Con la llegada de la impresión 3D a gran escala, las empresas de construcción utilizarán impresoras gigantes robotizadas para colocar capas de pavimento asfáltico directamente en el sitio. Estas impresoras, controladas por sistemas de inteligencia artificial, garantizarán una aplicación precisa y eficiente del asfalto, reduciendo al mínimo los residuos, optimizando el uso de materiales y estarán equipadas con sistemas de control de emisiones para minimizar cualquier impacto ambiental negativo.
6. Mantenimiento predictivo: Una vez terminada la construcción, la inteligencia artificial supervisará continuamente el pavimento, utilizando sensores integrados para monitorear su estado y detectar cualquier necesidad de mantenimiento. Los algoritmos predictivos calcularán el momento óptimo para realizar intervenciones, asegurando la durabilidad y eficiencia del pavimento a lo largo del tiempo.

Este proceso describe una cadena de suministro completa que convierte a los cortes de perforación contaminados con diésel en un recurso valioso y sostenible para la fabricación de pavimentos asfálticos en el año 2100. Este enfoque representa un futuro cautivador donde las tecnologías avanzadas y la inteligencia artificial se unen para transformar por completo el tratamiento y utilización de cortes de perforación contaminados con diésel.

# **Conclusiones**

1. Los cortes de perforación contaminados con diésel poseen un contenido de hidrocarburos de 3,2 % y 6,9 % en corte seco y húmedos respectivamente, que supera los límites establecidos para la disposición final, lo que representa un desafío para su manejo sostenible. Sin embargo, se identificó que estos materiales pueden ser utilizados como modificadores de la granulometría del árido, lo que sugiere un potencial para su reutilización en la construcción de infraestructuras viales.
2. Se obtuvo una humedad favorable de 9,3 % para la compactación del material como suelo con corte seco y estabilidad Marshall de 12,41 kN en la probeta S4 mostrando potencialidad para su uso como componente parcial en la fabricación de pavimento asfáltico, lo que podría reducir la cantidad de mezcla de asfalto necesaria, por tanto, contribuir a la sostenibilidad del sector de la construcción. Impulsando avances futuros en la gestión sostenible de recursos naturales, incluida la conservación de la biodiversidad, la protección de ecosistemas críticos y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles.
3. Se determinó que tanto el corte seco (Cs1) como su mezcla con corte húmedo, granalla y árido (SH1 y SH3) pueden ser empleados como sub-base en carreteras, aeropuertos, caminos de baja intensidad de tráfico y de bajo costo mostrando un índice de CBR de 46 %, 33 % y 32 %, respectivamente. La implementación de enfoques innovadores en la ingeniería civil, como el desarrollo de técnicas de estabilización y refuerzo de suelos, podría mejorar significativamente la resistencia y durabilidad de estos materiales, lo que tendría un impacto positivo en la construcción de infraestructuras resilientes y sostenibles en el futuro.
4. Los cortes de perforación contaminados con diésel representan un avance significativo en la sostenibilidad y en el impacto ambiental positivo de la fabricación de pavimento. Esta innovadora investigación tiene el potencial de transformar la forma en que se construyen las infraestructuras y sentar las bases para una visión futurista de un mundo más sostenible hacia el año 2100.

# **Recomendaciones**

1. Llevar a cabo un análisis detallado de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los cortes de perforación contaminados con diésel para comprender completamente su composición y comportamiento. Esto permitirá identificar los desafíos asociados con la toxicidad y la durabilidad del material, así como explorar posibles enfoques futuristas para mitigar los impactos negativos.

2. Investigar y evaluar tecnologías emergentes que puedan ser aplicadas para el tratamiento y reutilización de los cortes de perforación contaminados para la fabricación de pavimento. Esto puede incluir el uso de enfoques innovadores basados en nanotecnología, diseñadas para aislar y neutralizar los compuestos contaminantes presentes en los cortes de perforación, permitiendo que el material resultante sea más viable para su uso en pavimentos. Esta solución requeriría de un enfoque altamente innovador y futurista en la aplicación de tecnología a nivel molecular para resolver problemas de contaminación ambiental.

3. Aplicar la reingeniería de materiales mediante bioingeniería, en un futuro donde la tecnología bioingenieril esté avanzada, se podría plantear la reingeniería de los cortes de perforación contaminados, utilizando técnicas para degradar y modificar molecularmente los compuestos tóxicos presentes. Estos materiales reingenierados podrían ser empleados en la fabricación de pavimentos más sostenibles y resistentes, los cuales tendrían la capacidad de absorber y neutralizar los contaminantes con sistemas de filtración incorporados. aportando así una solución creativa e innovadora para la utilización de los desechos petroleros.

# **Referencias**

APHA 5520-D., Standard Methods for the examination of water and wastewater, in, A.P.H. Association, Editor APHA \_AWWA\_WEF, 23 st ed: 15th Street, NW Washington, DC, United States of America, 2017, pp. 244-540.

API RP 13B-2., Recommended Practice for Field Testing of Oil-based Drilling Fluids (fourth edition), 2005, pp. 28-34.

ASTM D 1557:12.(2018). Métodos de ensayo estándar para la determinación de las características de compactación de suelos en el laboratorio utilizando esfuerzo modificado, *American Society for Testing And Materials* (ASTM): Washington, DC, *United States of America*,. p. pp.34-39.

ASTM D1883 – 07. Práctica estándar para la corrección del peso unitario y el contenido de humedad en suelos que contienen partículas de gran tamaño. American Society for Testing And Materials Washington, DC, United States of America, 2018, 39 pp.

NC 334.(2004). Carreteras—pavimentos flexibles— Método de cálculo. Oficina Nacional de Normalización (NC): La Habana, Cuba. p. 34 pp.

NC:261. Determinación del contenido óptimo de asfalto empleando el equipo Marshall.Cuban National Bureau of Standards. La Habana, Cuba., 2005, 30 pp

NC: 819. Manejo de fondaje de tanques de almacenamiento de petróleo y sus derivados, Cuban National Bureau of Standards, La Habana, Cuba, 2017, 4 - 20 pp.

NC: 20. Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos. La Habana, Cuba. 1999, 22 pp.

NC 58.(2000). Geotecnia. Determinacion del limite liquido, limite plastico e indice de plasticidad de los suelos. Oficina Nacional de Normalización .La Habana, Cuba. p. 20 pp.

NC:161.Carreteras. Bases y sub-bases de caliza blanda. Oficina Nacional de Normalización La Habana, Cuba, 2002, 11 pp.

NC-32. Normalización, Calidad del suelo. Determinación del pH y la conductividad eléctrica en el extracto de saturación., Cuban National Bureau of Standards, La Habana, Cuba, 2009, pp. 6-11.

NC 759. Áridos para mezclas asfálticas — requisitos. Oficina Nacional de Normalización La Habana, Cuba 2010, 17 pp.

Resolución 136:2009., Reglamento para el manejo integral de desechos peligrosos. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), 2009, pp. 14-30.

**Anexos**

**Anexo 1** **Tabla 1.** Características de los cortes de perforación

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Muestra** | **HCTP** | **G y A** | **Humedad** | **pH**  **(25 ℃)** | **Conductividad (25℃)** |
| **mg/kg o** | | **%** |  | **mS/cm** |
| Corte seco | 32 060 | 47 220 | 9,42 | 8,6 | 17,03 |
| Corte húmedo | 61 380 | 147 200 | 15,44 | 8,98 | 5,32 |
| **LMP** | **10 000** | | **-** | **6-8** | **200** |
| **CITMA** | **-** | | **5** | **-** | **-** |

LMP: Límite máximo permisible (NC 819: 2017)

CITMA: Ciencia Tecnología y Medio Ambiente

(-) No se especifica

**Anexo 2** **Tabla 2.** Densidad de las probetas

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Probetas** | **Altura (cm)** | **Densidad (g/cm3)** | **Peso (g)** |
| S1 | 5,9 | 2,506 | 1 161,4 |
| S2 | 6,3 | 2,501 | 1 178,4 |
| S3 | 5,7 | 2,666 | 1 151,5 |
| S4 | 6,4 | 2,419 | 1 177,8 |
| S5 | 7 | 2,019 | 1 110,1 |
| S6 | 5,3 | 2,642 | 1 182,9 |
| S7 | 5,6 | 2,773 | 1 1766 |

**Anexo 3 Tabla 3.** Resultados de ensayo de estabilidad

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Probetas** | **Factor de corrección** | **Carga (kN)** | **Estabilidad Marshall**  **(kN)** |
| S1 | 1,4 | 57 | 11,20 |
| S2 | 1,0 | 57 | 9.82 |
| S3 | 1,19 | 49 | 10,05 |
| S4 | 1 | 72 | 12,41 |
| S6 | 1,39 | 50 | 11,98 |
| S7 | 1,25 | 44 | 9,48 |