

## Análisis del Empleo de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU's) como Rellenos de Terraplenes en Obras de Infraestructura Vial

**José Gabriel Cedeño Endara**

Magíster en Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, [jogaceen@hotmail.com](mailto:jogaceen@hotmail.com)

**Carola Ximena Sanhueza Plaza**

Académica, Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, [csanhuep@uc.cl](mailto:csanhuep@uc.cl)

**ABSTRACT:** El objetivo principal de la investigación fue proponer un prototipo de terraplén conformado por Neumáticos Fuera de Uso (NFU's), aplicado en obras viales chilenas. Para ello, se siguió una metodología consistente en: revisión bibliográfica de normativas, teorías de aplicación y estudios basados en el empleo de este material, como relleno en obras viales; identificación y recopilación de principales propiedades geotécnicas de los suelos y NFU's, para su posterior uso en los análisis de estabilidad; y, propuesta de un prototipo de terraplén conformado por NFU's. En este estudio se realizaron 720 cálculos mediante el uso de software, bajo tres escenarios de análisis: (i) terraplén conformado con suelo natural; (ii) incorporación de una capa de NFU's en el interior del terraplén; y, (iii) consideración de dos capas de NFU's. Como resultado de estas modelaciones, se pudo concluir que, el uso de NFU's permite obtener mejores resultados en los análisis de estabilidad (13%), en relación al caso con suelo natural. Sin embargo, su uso se justifica cuando el ángulo de fricción interno es mayor, que el del relleno de suelo convencional.

**PALABRAS CLAVES:** Neumáticos fuera de uso, terraplenes, estabilidad de taludes

**ABSTRACT:** The main objective of the research was to propose an embankment prototype made up of Tire Derived Aggregate (TDA), applied in Chilean road works. For this, a methodology consisting of: bibliographic review of standards, application theories and studies based on the use of this material as filler in road works was followed; identification and compilation of the main geotechnical properties of soils and TDA, for their subsequent use in stability analysis; and, propose a prototype embankment made up of TDA. 720 calculations and analyzes were carried out, applying three geometric models: (i) the first with natural soil; (ii) the second applying a layer of TDA inside the embankment; and, (iii) the third applying two layers of NFU's. As a result of these modelling results, it was concluded that the use of TDA improves the stability analysis results by 13%, in relation to the geometric model with natural soil. However, its use is only justified when the internal friction angle is greater than that of conventional soil fill.

**KEYWORDS:** Tire derived aggregate, embankments, slope stability.

### 1 INTRODUCCIÓN

La industria automotriz crece cada año como consecuencia del gran requerimiento vehicular en todo el mundo, ocasionando una gran acumulación de neumáticos de desecho.

Por ejemplo, los Neumáticos Fuera de Uso (NFU's) en los Estados Unidos son alrededor de 275 millones (Papakonstantinou & Tobolski, 2006) y, en la Unión Europea, 180 millones (Issa & Salem, 2013). La mayoría de estos neumáticos terminan en vertederos ilegales, lo que representa un enorme desafío mundial en la gestión de estos desechos.

En la actualidad, los neumáticos de desecho generan mucho interés, debido a su versatilidad como material de construcción y a sus propiedades de uso, como su alta permeabilidad, baja conductividad térmica y ligero peso (Aderinlewo & Okine, 2009).

Debido a ello, el uso de NFU's en la construcción de terraplenes, se ha convertido en una forma aceptada de reciclar neumáticos de desecho, debido a la escasez de recursos naturales y al aumento de los costos de eliminación de residuos (Edinçliiler et al., 2010).

### 2 ESTADO DEL ARTE DE LOS NFU'S

La Cámara de la Industria de Neumático de Chile (CINC, 2003), se refiere al NFU's como aquel que, por su estado con relación a las normas de seguridad vigentes, no es apto para uso sin la aplicación de técnicas que alarguen su vida útil.

Asimismo, considera como NFU's a los neumáticos de rechazo de fabricación y a aquellos de los que se desprenda su poseedor.

#### 2.1 *Uso de los NFU's*

Los NFU's son considerados residuos importantes debido a su utilidad en múltiples aplicaciones en la industria, principalmente, en la construcción, por ejemplo, de obras civiles y geotécnicas.

Debido a ello, existen diferentes usos y aplicaciones según la granulometría (Cano Serrano, Cerezo García, & Urbina Fraile, 2008), como, por ejemplo:

- Neumático entero: Arrecifes artificiales, macizo de suelo reforzado.
- Neumático triturado: Relleno ligeros, capa de drenaje de vertederos y carreteras.
- Neumático en polvo: Mezclas bituminosas

## 2.2 Clasificación de los NFU's

La norma ASTM hace una categorización del producto procesado de los NFU's y se refiere a ellos como "Agregados Derivados de Neumáticos", o TDA por sus siglas en inglés (Tire Derived Aggregate), en el cual se considera el material para ser utilizado en obras de ingeniería civil, dividiéndolo en dos categorías básicas, las clasificaciones de Tipo A (75mm-100mm) y Tipo B (150mm-300mm) y en dos clases de relleno asociadas a las mismas, Clase I y Clase II. Las clasificaciones Tipo A y Tipo B son en función del tamaño del NFU's para su uso en distintas aplicaciones. Mientras que, la Clase I y la Clase II, describen los espesores de elevación del relleno que oscilan entre 1 a 3 metros, según se definen en el documento ASTM D6270-08.

## 2.3 Consideraciones de Diseño y Construcción

Algunos autores (Edeskar 2006, Humphrey and Blumenthal 2010, Cheng 2016), han realizado ensayos y estudios de casos del uso de NFU's en terraplenes, tal como lo muestra Cheng (2016) en la Figura 1, que han servido como directrices para realizar un listado de consideraciones técnicas de diseño y construcción, que permitan minimizar la filtración de agua y aire; y, además, que vayan de la mano con lo estipulado en la ASTM D6270-17, para su aplicación como relleno ligero en terraplenes. Entre ellas, se mencionan las siguientes:

- Los TDA sólo se pueden colocar en el núcleo de los rellenos.
- La cara inferior de las capas de TDA debe estar situada, al menos, a 1m por encima de la cota superior del terreno natural.
- La cara superior de la capa de TDA debe estar, como mínimo, a 1m de la cara superior de la coronación del terraplén.
- Para material de TDA Clase II (Tipo B), con granulometría de 150 a 300 mm, se recomienda una altura máxima de llenado de los rellenos de neumáticos de hasta 3m.
- Las capas intermedias de material, que hacen refuerzo estructural, deben tener un espesor mínimo de 1m.
- Considerar un mínimo de 1m de cobertura de suelo de baja permeabilidad (mínimo 30% de finos, en peso, pasando el tamiz #200), para rodear cada una de las capas de TDA.
- Se recomiendan pendientes de 2:1 = H:V.
- Debe evitarse el uso de elementos de drenaje situados en la parte inferior del relleno.
- La distribución de tamaños del material TDA serán los de un material Tipo B (Clase II) de la Norma ASTM D6270-17, tal como lo menciona esta norma en el capítulo 7 de Especificaciones del Material, en donde se indica que, este tipo de material, es el más adecuado para su uso como relleno en terraplenes.
- Relación en volumen 1:1, para una mezcla de relleno NFU's - suelo.

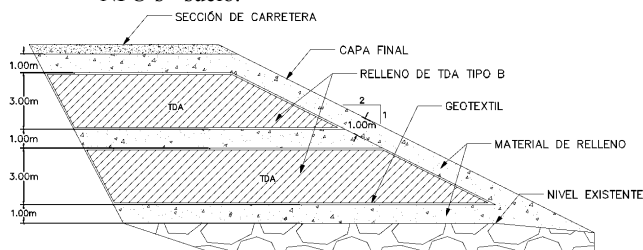


Figura 1. Corte Transversal de un talud utilizando TDA o NFU's (Cheng 2016)

Junto a las consideraciones de diseño y construcción planteadas, Humphrey and Blumenthal (2010) establecieron pautas, para limitar el calentamiento interno dentro de los terraplenes construidos con NFU's, minimizando las probabilidades de autocombustión en su interior. Estas directrices se resumen en los siguientes puntos:

- Espesores de capa en un rango entre 1m y 3m.
- Los neumáticos deben estar libres de contaminantes como aceite, grasa, gasolina y combustible diésel, entre otros, ya que podrían crear un peligro de incendio.
- Los fragmentos de neumáticos no contendrán los restos de los neumáticos sometidos a incendios.
- Los fragmentos de los neumáticos deberán estar libres de astillas y fragmentos de madera, u otras fibras de materia orgánica.
- Los NFU's no deben estar en contacto directo con el suelo y deben ser cubiertos en su totalidad por un geotextil.
- Se debe reducir al mínimo el contacto de los fragmentos de neumáticos con el aire o agua, para evitar una posible oxidación de las astillas metálicas, esto ocasionaría una posible autocombustión en el interior del terraplén.

## 2.4 Propiedades Geotécnicas de los NFU's aplicados en Terraplenes

En la Tabla 1 se presentan los parámetros geotécnicos de los NFU's que se recomiendan según diversos autores y normativas.

Tabla 1. Propiedades geotécnicas de los TDA como relleno ligero en terraplenes (Humphrey & Manion, 1992, Romero et al. 2008, Humphrey & Blumenthal 2010, Cheng 2016, Fox et al. 2018, ASTMD6270-20)

Propiedad Geotécnica	Valores
Granulometría (mm)	Tipo B 150 - 300
Peso unitario ( $\frac{KN}{m^3}$ )	4.70 - 9.10
Gravedad específica	1.05 - 1.36
Permeabilidad (m/s)	0.75 - 5
Ángulo de fricción (°)	30 - 39
Conductividad Térmica (W/m*K°)	0.19 - 0.32

## 2.5 Definición de Parámetros Geotécnicos de Diseño

En concordancia con los antecedentes teóricos y empíricos recogidos en el presente estudio, se puede verificar que, los NFU's o TDA según la normativa, corresponden a materiales de construcción ligera cuyas propiedades geotécnicas, que se muestran en la Tabla 2, son consideradas en el modelo de diseño de un terraplén, de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTMD6270-20, en la que, además, se efectúa una comparación con las características de materiales de relleno convencionales.

Tabla 2. Cuadro comparativo de los parámetros geotécnicos - TDA v/s materiales de relleno (Humphrey & Blumenthal 2010, MnDOT 2019, ASTMD6270-20)

Material	de	Peso unitario	Ángulo de fricción
----------	----	---------------	--------------------

relleno	(KN/m <sup>3</sup> )	(°)
Grava	19.62 – 23.20	> 37
Arena	19.65 – 23.25	37 - 38
Arena Limosa	19.65 – 23.40	31 - 34
TDA	4.70 – 9.10	30 - 39

Finalmente, se debe definir un Factor de Seguridad (FS) para el diseño de los taludes, bajo condiciones estáticas y dinámicas. En Chile, en este caso, se recomiendan valores mínimos de 1.50 y 1.20, respectivamente (MINVU 2018).

### 3 MODELO DE CÁLCULO DE UN TERRAPLÉN CONSTRUIDO CON NFU'S COMO MATERIAL DE RELLENO

El modelo de cálculo empleado en este estudio requiere las propiedades geotécnicas definidas durante la revisión y análisis del Estado del Arte, tanto para los NFU's, como para los materiales de relleno convencionales.

Además, deben considerarse y aplicarse todas las recomendaciones geotécnicas, de diseño y constructivas, propuestas en las normativas y referencias bibliográficas revisadas.

#### 3.1 Definición del Proyecto

Este estudio se basó en definir un prototipo estable de terraplén construido con material en base a NFU's, aplicable en obras viales, tomando en consideración todos los criterios técnicos y de diseño, que establece la norma ASTM D6270-20, además de los parámetros y recomendaciones dados por diferentes autores con experiencia en proyectos con este tipo de material.

El modelo de comportamiento que se definió corresponde al de Mohr-Coulomb, por lo que, se requiere el peso unitario y el ángulo de fricción de los materiales involucrados en el caso en cuestión. Posterior a ello, se obtuvo los valores de SPF (superficie potencial de falla) y FS (Factor de seguridad) bajo la metodología de cálculo de las dovelas, empleando seis métodos de cálculo (Fellenius, Janbú, Janbú Generalizado, Bishop, Spencer y Morgenstern-Price).

Además, se consideró una serie de esfuerzos a los que estará sometido el terraplén, tales como: (i) Cargas superficiales, tomando como referencia el peso máximo de un camión de 45t (Dirección de Vialidad 2018), lo que equivale a un valor de sobrecarga de 13.18KN/m<sup>2</sup>; y, (ii) Coeficientes de aceleración sísmica horizontal y vertical, para un suelo tipo E y zona sísmica 3, equivalentes a K<sub>h</sub> = 0.20 y K<sub>v</sub> = 0, respectivamente (NCH 433 Of.1996 Mod. 2012).

A partir de la información recopilada, se procedió a crear el prototipo de terraplén, que cumpla con todos los aspectos técnicos y de diseño, de acuerdo a las siguientes hipótesis establecidas:

- Definición de la geometría del terraplén: ancho, alto e inclinación de los taludes;
- Definición de los suelos del relleno del terraplén: tipos de suelo, sus propiedades geotécnicas y modelo de comportamiento del suelo;
- Definición de las propiedades geotécnicas y número de capas de los NFU's;
- Sobrecargas estáticas y sísmicas de diseño; y,
- Modelos de cálculo de estabilidad de taludes.

#### 3.2 Modelo Geométrico

Se definió un modelo geométrico característico de una infraestructura para una obra vial, la cual posee una altura de 6m; un ancho de coronamiento de 14m; una base de ancho 38m; y,

una inclinación de talud de 2:1 = H:V. En la Figura 2 se representa el prototipo del terraplén propuesto, teniendo en consideración las recomendaciones técnicas planteadas y los aspectos geotécnicos definidos.

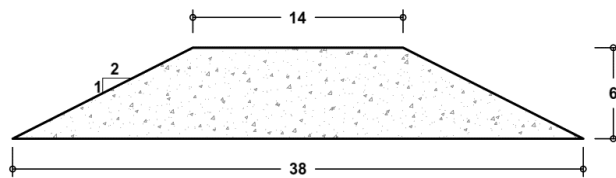


Figura 2. Modelo geométrico del prototipo de terraplén propuesto

#### 3.3 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad ejecutado consideró los siguientes 4 escenarios: (i) Caso estático y sin sobrecarga; (ii) Caso estático y con la sobrecarga de 13.18KN/m<sup>2</sup>; (iii) Caso pseudoestático y sin sobrecarga; y, (iv) Caso pseudoestático y con la sobrecarga de 13.18KN/m<sup>2</sup>. Cada escenario consideró, a su vez, el empleo de los 3 suelos siguientes: (i) Grava; (ii) Arena; y, (iii) Arena limosa.

Se efectuaron 720 cálculos de estabilidad de taludes, de los cuales 144 correspondieron al caso patrón (sin uso de NFU's), en el que se utilizó como material de relleno cada uno de los 3 tipos de suelo natural (grava, arena y arena limosa); 288 análisis de sensibilidad, en los que se empleó una capa de NFU's; y, 288, con dos capas de NFU's.

Para realizar los análisis de sensibilidad, fue necesario definir los valores, mínimos y máximos, de los parámetros geotécnicos de los suelos naturales (grava, arena y arena limosa) además de los NFU's, rangos que se encuentran en los datos mostrados en la Tabla 2.

Es importante indicar que, de acuerdo a las consideraciones de diseño y construcción planteadas por la ASTM D6270-20, el suelo para recubrir a los NFU's, debe ser de baja permeabilidad (mínimo 30% de finos, en peso, pasando el tamiz #200), es decir, según la clasificación de suelos AASHTO, corresponde a un suelo A-2-5; mientras que, según la clasificación USCS, a un suelo tipo SM o GM.

Por lo anterior, para este caso se efectuaron los análisis de sensibilidad y se analizaron los resultados obtenidos, considerando la arena limosa y los dos modelos de cálculos, alcanzando valores límites superior e inferior de los factores de seguridad (FS).

En la Tabla 4 se presentan las SPF y los FS obtenidos por el modelos de cálculo de Morgenstern-Price, utilizando los parámetros mínimos de la arena limosa con una capa de NFU's (TDA) en el interior del terraplén.

Tabla 3. SPF y FS obtenido en el análisis utilizando parámetros mínimos de la arena limosa y una capa de TDA

Pseudoestático con carga superficial	Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Ángulo fricción (°)	Factor de seguridad Morgenstern-Price
Arena Limosa	19.65	31	1.10
NFU's	4.70	30	1.10
NFU's	9.10	39	1.26

En la Tabla 4 se presentan las SPF y los FS utilizando los parámetros máximos de la arena limosa, con una capa de NFU's (TDA).

Tabla 4. SPF y FS obtenido en el análisis utilizando parámetros máximos de la arena limosa y una capa de TDA.

Pseudoestático con carga superficial	Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Ángulo fricción (°)	Factor de seguridad Morgenstern-Price
Arena Limosa	23.40	34	1.24
NFU's	4.70	30	1.19
NFU's	9.10	39	1.35

En la Figura 3 se muestra la representación de las SPF y de los FS, utilizando los parámetros geotécnicos mínimos de la arena limosa y máximos de los NFU's, empleando una capa de TDA en el interior del terraplén.

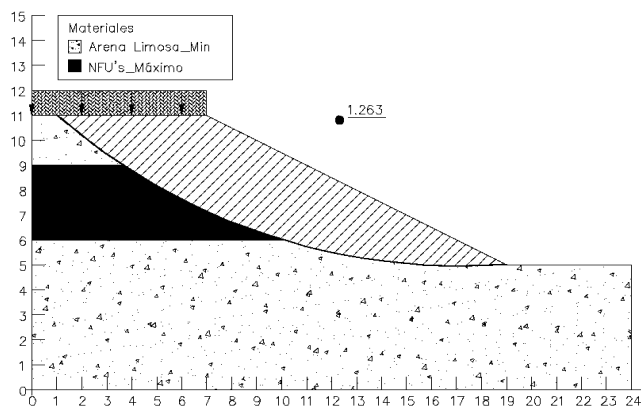


Figura 3. SPF y FS obtenido de los análisis de sensibilidad, utilizando arena limosa y una capa de NFU's

Así mismo, se muestra en la Tabla 5 las SPF y los FS obtenidos, utilizando los parámetros mínimos de la arena limosa, empleando dos capas de TDA en el interior del terraplén.

Tabla 5. SPF y FS obtenido en el análisis utilizando parámetros mínimos de la arena limosa y dos capas de TDA.

Pseudoestático con carga superficial	Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Ángulo fricción (°)	Factor de seguridad Morgenstern-Price
Arena Limosa	19.65	31	1.10
NFU's	4.70	30	1.13
NFU's	9.10	39	1.27

De la misma manera, se observa en la Tabla 6 y Figura 4 las SPF y los FS obtenidos, utilizando los parámetros máximos de la arena limosa, empleando dos capas de TDA.

Tabla 6. SPF y FS obtenido en el análisis utilizando parámetros máximos de la arena limosa y dos capas de TDA.

Pseudoestático con carga superficial	Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Ángulo fricción (°)	Factor de seguridad Morgenstern-Price
Arena Limosa	23.40	34	1.24
NFU's	4.70	30	1.15

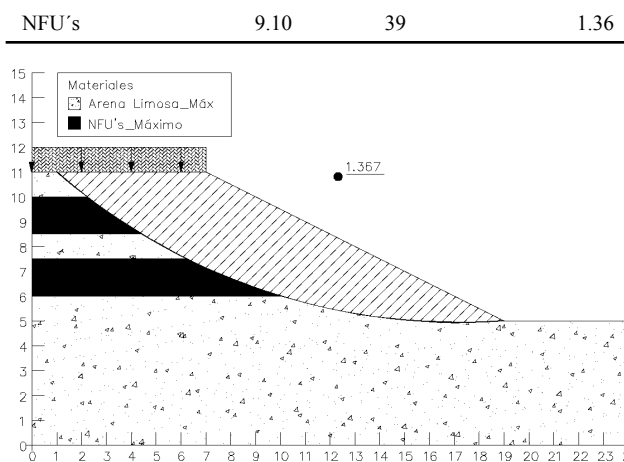


Figura 4. SPF y FS obtenido de los análisis de sensibilidad, utilizando arena limosa y dos capas de NFU's.

#### 4 RESULTADOS DE LAS MODELACIONES

Las simulaciones, estáticas y pseudoestáticas, realizadas en este estudio permitieron analizar la estabilidad de un terraplén, que considero el uso de NFU's (TDA) bajo 2 escenarios diferentes: (i) con 1 capa; y, (ii) con 2 capas; cuyos resultados fueron contrastados con el modelo patrón.

Es así como, según los datos mostrados en las tablas (Tabla 4 y Tabla 5), se puede notar un aumento en los valores de las SPF y de los FS, en función del ángulo de fricción del suelo. Es decir, a mayor ángulo de fricción, mayores valores de SPF y FS, acorde a lo esperado.

Por lo tanto, se debe considerar el uso de NFU's (TDA) como parte de la estructura del terraplén, ya sea en 1 ó 2 capas, su incidencia es notable en el aumento de los valores de las SPF y de los FS, ya que, existe una positiva influencia del ángulo de fricción propio del NFU's, contribuyendo de manera significativa en la resistencia de la estructura. Esto, siempre y cuando, el ángulo de fricción del NFU's (TDA), sea mayor al del suelo empleado en la construcción del terraplén.

En la Tabla 7 y Tabla 8 se evidencia que, con el uso de dos capas de NFU's y con el modelo de cálculo de Morgenstern-Price, se genera un aumento promedio del 9% en los valores de las SPF y de los FS, por lo que, se recomienda el empleo de las dos capas.

Tabla 7. Cuadro comparativo de FS utilizando parámetros mínimos de arena limosa, para un talud con relleno de 1 y 2 capas en el núcleo, en base a TDA v/o NFU's en condiciones pseudoestáticas con carga

Material	Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Ángulo fricción (°)	FS (Morgenstern-Price)	
			1 Capa NFU's	2 Capas NFU's
Arena limosa	19.65	31	1.10	
NFU's	4.70	30	1.10	1.13
NFU's	9.10	39	1.26	1.27

Tabla 8. Cuadro comparativo de FS utilizando parámetros máximos de arena limosa para un talud con relleno de 1 y 2 capas en el núcleo, en base

**a TDA y/o NFU's en condiciones pseudoestáticas con carga.**

Material	Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción (°)	FS (Morgenstern-Price)	
			1 Capa NFU's	2 Capas NFU's
Arena limosa	23.40	34	1.24	
NFU's	4.70	30	1.19	1.15
NFU's	9.10	39	1.35	1.36

**4.1 Análisis de Resultados**

Los análisis de resultados que se muestran a continuación consideran el escenario con las siguientes condiciones: caso pseudoestáticas y con sobrecarga. De esta manera, se puede indicar lo siguiente:

- Los resultados de la Tabla 7 y Tabla 8, muestran que, el uso de los TDA y/o NFU's se justifica cuando el ángulo de fricción interno del NFU's es mayor al del relleno de suelo; en caso contrario, la aplicación de NFU's, como material de relleno en un terraplén, no tiene relevancia.
- El FS que se debe cumplir en condiciones pseudoestáticas, según la normativa chilena en el caso de taludes, es de 1.20; por lo tanto, se evidencia el cumplimiento de esta exigencia.
- El material de relleno para cubrir los NFU's que más se ajusta, según las recomendaciones normativas (ASTMD6270-20), corresponde a la arena limosa, cuyos resultados se evidencian en la Tabla 7 y Tabla 8, donde se muestran mayores FS cuando se emplean 2 capas de relleno de NFU's.

**4.2 Recomendaciones de Diseño según Norma ASTMD6270**

La norma ASTMD6270-20 plantea una serie de recomendaciones técnicas de diseño y construcción cuando se emplean NFU's como material de relleno en un terraplén, las mismas que fueron aplicadas en esta investigación y que se complementan con los resultados de este estudio basado en un modelo conceptual (Figura 5), y que además son las bases del terraplén experimental construido con neumáticos troceados que realizó Cano, Estaire y Rodríguez (2017). De esta manera, la norma propone las siguientes recomendaciones de diseño:

- Inclinación de talud 2:1 = H:V.
- El material de TDA debe ser el Tipo B (150mm - 300mm), con altura de 1 a 3 metros, para evitar una posible autocombustión en el interior del terraplén.
- Los NFU's deben ser colocados, únicamente, en el núcleo del terraplén.
- El suelo que debe cubrir las capas de TDA tiene que ser de baja permeabilidad (30% de finos pasantes del tamiz #200), es decir, según clasificación AASHTO, serían los suelos tipo A-2-5; y, para la clasificación USCS, correspondería a SM y/o GM.
- La separación mínima entre el TDA y todas las caras externas del terraplén, incluida las capas intermedias, debe ser de 1 metro.
- Se sugiere cubrir totalmente a los NFU's con geotextil, para garantizar la permeabilidad del terraplén y evitar que las astillas metálicas, que contienen los TDA, se oxiden y desencadenen una posible autocombustión en el interior del terraplén.
- El factor de seguridad mínimo que recomienda el manual de pavimentos del MINVU, para terraplenes, es

de 1.20 en condiciones dinámicas; y, 1.50 en el caso estático. Por lo que, se consideran pertinentes estos valores.

- Para obtener mejores resultados de factor de seguridad, se recomienda el uso de dos capas de NFU's en el interior del terraplén, considerando que, cada capa debe tener una altura no mayor a 3 metros.

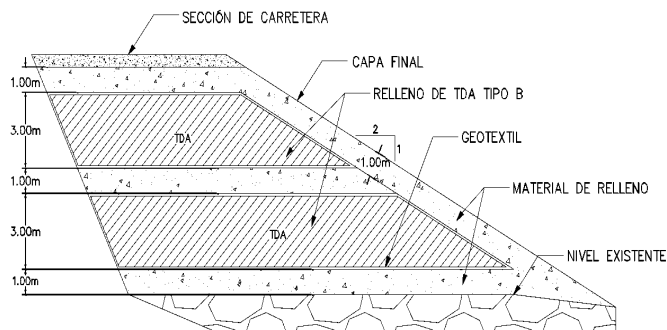


Figura 5. Recomendaciones de diseño para el uso de los NFU's en terraplenes obtenidas en este estudio .

**5 CONCLUSIONES**

De acuerdo a la investigación realizada en este estudio se obtienen las siguientes conclusiones:

**5.1 Conclusiones Bibliográficas**

A partir de la investigación y bibliografía utilizada en este estudio se puede concluir lo siguiente:

- La ASTM categoriza al producto procesado de los NFU's según su tamaño. En su norma ASTMD6270-20 los divide en dos tipos, A y B; donde, los primeros son llamados también como material para relleno de Clase I, con un tamaño de agregado de 75mm a 100mm, y para los tipos B, conocidos como relleno de Clase II, con tamaño de agregado de 150mm a 300mm.
- La altura de relleno permitida para los NFU's Tipo A (Clase I), es de 1m; mientras que, para los Tipo B (Clase II), es de 1 a 3 metros, siendo este último valor, el sugerido a utilizar en rellenos para terraplenes.
- La aplicación de los neumáticos fuera de uso en obras de ingeniería civil y geotécnica depende de su granulometría.
- Los NFU's son considerados materiales idóneos, para uso como relleno ligero en terraplenes, debido a su bajo peso unitario, convirtiéndose esta propiedad en una de sus principales características. Además, este material posee un importante valor de ángulo de fricción, incluso, comparable al de un material granular, por lo que, contribuye con la estabilidad de la estructura conformada.

**5.2 Conclusiones de los Análisis Efectuados en la Investigación.**

En relación a las modelaciones realizadas en este estudio, se puede concluir lo siguiente:

- En relación al empleo y la cantidad de capas de NFU's como material de relleno, consideradas en las modelaciones, se observa que, el uso de este material aumenta el valor del FS con respecto al caso patrón (sin NFU's); sin embargo, su aplicación se justifica cuando el ángulo de fricción interno es mayor que el del suelo

convencional empleado como relleno. Por otra parte, el empleo de 2 capas de NFU's mejora los resultados del FS en todos los casos pseudoestáticos, con respecto al caso patrón, hasta en un 8%.

- Aunque existan algunos resultados de las modelaciones, donde el FS no sea el esperado, se sigue cumpliendo con el valor mínimo exigido por la norma chilena (1.20), por lo que, el diseño sigue siendo estable. Además, es un beneficio desde el punto de vista medio ambiental, ya que, aporta en la reutilización de residuos.
- Cuando se emplea arena limosa como recubrimiento de los NFU's, de acuerdo a las definiciones establecidas en la norma ASTM D6270-20, se alcanzan mejores resultados de los FS, llegando a valores hasta de un 13% mayor, en relación al caso patrón.
- Los métodos de cálculo de estabilidad de taludes empleados en este estudio fueron los siguientes: Morgenstern-Price, Spencer y Bishop Riguroso. A partir de sus resultados, se pudieron establecer las siguientes recomendaciones de diseño para un terraplén conformado por NFU's:
  - Inclinación de taludes 2:1 = H:V.
  - El suelo que debe recubrir a los NFU's es, según la AASHTO, los suelos tipo A-2-5; y, según USCS, SM y/o GM.
  - La altura de relleno máxima de cada capa de NFU's debe ser de 3m.
  - La separación mínima entre capas de NFU's y las caras de los taludes deber ser 1m.
  - Los NFU's se deben colocar como núcleo del relleno del terraplén, distanciados 1m con respecto al nivel de terreno; y, a 1m por debajo del coronamiento del terraplén.

### 5.3 Recomendaciones para Futuras Investigaciones

Las recomendaciones, que surgen a partir de lo realizado en este estudio, son las siguientes:

- Realizar ensayos de laboratorio a los NFU's, que permitan aumentar la base de datos de este material y, a partir de ellos, realizar nuevos análisis de sensibilidad, que permitan estudiar la estabilidad de un terraplén.
- Desarrollar un manual o instructivo nacional del empleo de los NFU's en aplicaciones geotécnicas y obras civiles en general, especialmente, para su uso como material de relleno en terraplenes, considerando los factores internos y externos, que afectan a la estabilidad de un talud, tales como: los parámetros del suelo, los aspectos técnicos de diseño, las sobrecargas estáticas y sísmicas, entre otros, para distintas zonas y/o regiones.
- Finalmente, se recomienda monitorear las variaciones térmicas y de humedad, que ocurren en el interior del terraplén, para así controlar el posible riesgo de autocombustión, que existen en proyectos ejecutados con este tipo de material.

### 5.4 Limitaciones del Estudio

Este estudio se realizó en la época de contingencia sanitaria mundial, razón por la cual no se pudo llevar a cabo un desarrollo continuo de la investigación. Además, existió la limitación en la ejecución de los respectivos ensayos en laboratorio a los materiales del relleno, dificultando la obtención de parámetros geotécnicos más precisos.

## 6 REFERENCIAS

- Aderinlewo, O., & Okine, N. A. (2009). Sensitivity analysis of a scrap tire embankment using Bayesian influence diagrams. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1446–1455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.003>
- Cano, Herminia, José Estaire, and Rafael Rodríguez. 2017. "Terraplén Experimental Construido con Neumático Troceado." (September).
- Cano Serrano, E., Cerezo García, L., & Urbina Fraile, M. (2008). *Valorización Material Y Energética De*.
- Cheng, DingXin, (Departamento de Reciclaje y Recuperación de Recursos del Estado de California). (2016). *Guía de uso Guía de uso Agregado Derivado de Neumático*. 0–1.
- (CINC), C. (2013). *Evaluación de Impacto APL Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso*. Ministerio de Medio Ambiente. Gobierno de Chile, 0–64. <http://chilerecicla.gob.cl/wp-content/uploads/2018/10/3--A-PL-de-prevencion-y-valorizacion-de-NFU-CINC-2012.pdf>
- Conditions, Consolidated Drained, Organic Matter, Other Organic Soils, and Subgrade Soils. 2011. "Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications 1." 98(Reapproved):1–22. doi: 10.1520/D6270-08E01.2.
- Conditions, C. D., Matter, O., Soils, O. O., & Soils, S. (2017). *Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications 1*. 1–22. <https://doi.org/10.1520/D6270-17.2>
- Conditions, C. D., Matter, O., Soils, O. O., & Soils, S. (2020). *Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications 1*. 1–22. <https://doi.org/10.1520/D6270-20.2>
- Cosgrove, T. A. (1995). "Interface strength between tire shreds and geomembrane for use as a drainage layer in a landfill cover." *Proc., Geosynthetics '95, Industrial Fabrics Association, St. Paul, Minn., Vol. 3*, 1157–1168.
- Dirección de Vialidad. (2018). *TRANSPORTES ESPECIALES VERSION 2018*.
- Edeskar, T. (2006). *Use of tyre shreds in civil engineering applications: technical and environmental properties*. Theses. <http://epubl.ltu.se/1402-1544/2006/67/index-en.html>
- Edinçliler, A., Baykal, G., & Saygili, A. (2010). Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction. *Waste Management*, 30(6), 1073–1080.
- Fox, P. J., Thielmann, S. S., Sanders, M. J., Latham, C., Ghaaowd, I., & McCartney, J. S. (2018). Large-scale combination direct shear/simple shear device for tire-derived aggregate. *Geotechnical Testing Journal*, 41(2), 340–353. <https://doi.org/10.1520/GTJ20160245>
- Humphrey, D., & Blumenthal, M. (2010). The use of tire-derived aggregate in road construction applications. *Green Streets and Highways 2010: An Interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes - Proceedings of the Green Streets and Highways 2010 Conference*, 389, 299–313.
- Humphrey, D. N., and Manion, W. P. (1992). "Properties of tire chips for light-weight fill." *Proc., Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics*, Vol. 2, ASCE, New

- York, 1344–1355.
- I.N.N. (2012). NCh433 Of.1996 Mod.2012 - Diseño sísmico de edificios. NCh 433 Of.1996 Mod. 2012, 77.
- Issa, C.A., Salem, G., 2013. Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design, *Constr. Build. Mater.* 42, 48-52.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU). 2018. Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación. Vol. 53.
- Minnesota Department of Transportation. (2019). Manual - MnDOT Pavement Design. Minnesota Department of Transportation.  
<http://www.dot.state.mn.us/materials/pvmtdesign/manual.html>
- Papakonstantinou, C.G., Tobolski, M.J., 2006. Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cem. Concr. Res.* 36 (9), 1686-1691.
- Romero, E., Sanmartin, I., Arroyo, M., Lloret, A., 2008. Precise hydraulic conductivity measurements on tire derived aggregate, Fourth European Geosynthetics Conference, Edinburgh, UK, September 2008, paper 283, International Geosynthetics Society.

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*