



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

UTILIZACIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU'S) PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS, COMO ALTERNATIVA PARA SU DISPOSICIÓN
FINAL.

POR: TRINIDAD ANDREA ORMAZÁBAL AVENDAÑO

Memoria presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Desarrollo
para optar al título profesional de Ingeniera Civil en Obras Civiles.

PROFESOR GUÍA:

Sr. GONZALO JARA MORI

Julio
SANTIAGO

A toda mi familia, en especial mis padres
Claudia y Marcelo, por su apoyo incondicional
a lo largo de mi formación personal y
profesional.

A mis amigos y mi equipo de basquetbol, mi
segunda familia.

AGRADECIMIENTO

A mi profesor Gonzalo, por la motivación y apoyo a lo largo del desarrollo de esta memoria.

A mi familia, porque siempre confía en mí y me motiva a superarme cada día. Nada de esto hubiese sido posible sin ustedes.

A mis amigos, por su preocupación y apoyo en mi formación académica y personal.

RESUMEN

La búsqueda de nuevos métodos de valorización de los neumáticos fuera de uso (NFU's) surge de la necesidad e importancia de reducir los niveles de contaminación generados por este material. Si bien presenta diversas características que lo hacen llamativo para ser utilizado en obras de carácter geotécnico como son los terraplenes, es importante que cumpla con parámetros que garanticen la estabilidad de los taludes como es el factor de seguridad. A pesar de la diversidad de variaciones que pueden surgir a la hora de proponer un modelo de terraplén, es importante considerar ciertos eventos a los que se verán enfrentados, como son los sismos y las sobrecargas generadas por tránsito de vehículos.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento del factor de seguridad en terraplenes con rellenos de NFU's, los cuales fueron sometidos a variaciones de altura, tipo de relleno y magnitud de sobrecarga. El análisis de estabilidad realizado es llevado a cabo a través del software GSlope mediante la aplicación de modelos de equilibrio límite. Los resultados obtenidos reflejan limitantes tanto en la altura que pueden alcanzar los terraplenes como en la magnitud de sobrecarga capaz de admitir tanto para los análisis estáticos como pseudo-estáticos.

Dado los resultados obtenidos en la presente investigación, se recomienda como una alternativa de valorización de NFU's el uso de este producto como troceados, debido a que se cuenta con información más detallada de caracterización geotécnica y experiencias previas del uso de este material en obras de relleno tipo terraplén. Tomando en consideración los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad, se recomienda además la implementación de esta solución en rellenos con taludes H:V de 2:1 y con altura total de relleno de 4 m para una sobrecarga máxima de 35 kPa y de hasta 6 m para sobrecarga máxima de 20 kPa.

Palabras clave: neumáticos fuera de uso, estabilidad de taludes, factor de seguridad

ABSTRACT

The search for new methods of valorization of tires out of use arises from the need and importance of reducing the levels of pollution generated by this material. Although it has several characteristics that make it attractive to be used in geotechnical works such as embankments, it is important that it complies with parameters that guarantee the stability of the slopes, such as the safety factor. Despite the diversity of variations that may arise when proposing an embankment model, it is important to consider certain events that will be faced in reality, such as earthquakes and overloads generated by vehicle traffic.

In the present work, the behavior of the safety factor in embankments with NFU's fillings was studied, which were subjected to variations in height, type of fill and magnitude of overload. The stability analysis carried out was carried out through the GSlope software by applying limit equilibrium models. The results obtained reflect limitations both in the height that the embankments can reach and in the magnitude of overload capable of admitting both for static and pseudo-static analyzes.

Given the results obtained in the present investigation, the use of this product as chopped is recommended as an alternative for the valorization of NFUs, due to the fact that there is more detailed information on geotechnical characterization and previous experiences of the use of this material in filling works type embankment. Taking into account the results obtained in the stability analysis, it is also recommended to implement this solution in fills with H: V slopes of 2: 1 and with a total fill height of 4 m for a maximum overload of 35 kPa and up 6 m for maximum overload of 20 kPa.

Keywords: tires out of use, slope stability, safety factor

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVO GENERAL	3
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3.	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	4
2.	USO DE NFU'S EN APLICACIONES GEOTÉCNICAS.....	5
2.1.	¿QUÉ SON LOS NFU'S?.....	5
2.2.	SITUACIÓN ACTUAL DE LOS NFU'S EN CHILE.....	8
2.3.	MÉTODOS DE VALORIZACIÓN DE LOS NFU'S.....	10
2.3.1.	<i>Trituración de neumáticos.....</i>	<i>11</i>
2.3.2.	<i>Valorización energética</i>	<i>12</i>
2.3.3.	<i>Reutilización directa</i>	<i>13</i>
2.4.	APLICACIONES GEOTÉCNICAS PARA LOS NFU'S.....	13
2.4.1.	<i>Sistemas de drenaje.....</i>	<i>14</i>
2.4.2.	<i>Sistemas de contención.....</i>	<i>14</i>
2.4.3.	<i>Relleno de terraplén.....</i>	<i>16</i>
3.	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS NFU'S	18
3.1.	NFU'S COMO MATERIAL DE RELLENO EN OBRAS DE TERRAPLÉN	21
3.2.	PROPIEDADES FÍSICAS	23
3.2.1.	<i>Granulometría de los NFU's.....</i>	<i>24</i>
3.2.2.	<i>Permeabilidad</i>	<i>25</i>
3.2.3.	<i>Densidad.....</i>	<i>28</i>
3.3.	PROPIEDADES MECÁNICAS	32
3.3.1.	<i>Compresibilidad</i>	<i>35</i>
3.3.2.	<i>Resistencia al corte</i>	<i>36</i>
4.	EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE RELLENOS CONFORMADOS POR NFU'S	41

4.1.	NORMATIVA APLICABLE PARA EL USO DE NFU'S EN RELLENOS	43
4.2.	MODELOS DEFINIDOS PARA LOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	44
4.3.	EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL RELLENO MEDIANTE EL USO DE NFU'S.....	46
4.4.	RESULTADOS OBTENIDOS	49
4.4.1.	<i>Relleno de balas de NFU's</i>	49
4.4.2.	<i>Relleno de NFU's troceados.....</i>	54
5.	CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES	60
6.	BIBLIOGRAFIA	64

ÍNDIE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Composición de materias primas por tipo de neumáticos</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2. Toneladas de NFU's generadas en Chile entre 2011 y 2019 según su uso.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 3. Metas REP en toneladas de NFU.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 4. Conductividad hidráulica para diferentes tamaños de tiras de neumáticos</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5. Valores típicos que presentan los NFU's.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Densidad seca para diferentes tamaños de tiras de neumáticos – NFU's troceados</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 7. Valores de compresibilidad de NFU's troceados</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 8. Parámetros de resistencia al corte para NFU's troceados.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 9. Parámetros de resistencia al corte para NFU's en balas</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10. Parámetros geotécnicos del terraplén</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 11. Factores de seguridad utilizados para análisis de estabilidad de taludes</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 12: Resumen de los FS obtenidos para rellenos con balas de NFU's.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 13: Resumen de los FS obtenidos para rellenos con NFU's troceados.....</i>	<i>57</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Estructura de un neumático.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Gránulos de caucho.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. Drenaje agrícola con NFU's</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. Muro de contención con NFU's.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5. Balas de NFU's.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6. NFU's troceados dispuestos para ser usados en una obra de terraplén</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7. NFU's troceados.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8. Planta y máquina para la trituración de NFU's</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9. Ejemplo de bala de NFU's</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10. Conformación de un terraplén</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11. Granulometrías típicas de NFU's troceados utilizadas como material de relleno</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12. Relación entre la tensión vertical y la densidad de campo, para distintas tiras de NFU's.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 13. Configuración de una bala de NFU's (dimensiones aproximadas)</i>	<i>32</i>
<i>Figura 14. Equipo triaxial y probeta de ensayo, para pruebas en NFU's troceados</i>	<i>33</i>
<i>Figura 15. Esquema equipo utilizado para pruebas de NFU's en balas</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16. Edómetro utilizado para la ejecución de pruebas de compresibilidad, NFU's troceados</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17. Ejemplo de relleno (terraplén) para la aplicación de NFU's</i>	<i>42</i>
<i>Figura 18. Modelo 1 – 1 capa de relleno</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19. Modelo 2 – 2 capas de relleno.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 20: Análisis pseudo-estático con 35kPa de sobrecarga para balas de NFU's</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21: Análisis estático con carga para relleno de balas de NFU's</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22. Análisis pseudo-estático con carga para relleno de balas de NFU's.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 23: Análisis pseudo-estático con 35 kPa de sobrecarga para NFU's troceados</i>	<i>55</i>
<i>Figura 24: Análisis estático con carga para relleno de NFU's troceados.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 25. Análisis pseudo-estático con carga para relleno de NFU's troceados.....</i>	<i>56</i>

1. INTRODUCCIÓN

En Chile anualmente se introducen en el mercado automotriz alrededor de 7 millones de unidades nuevas de neumáticos, que se distribuyen entre vehículos livianos, buses, camiones y equipos que operan en proyectos mineros. Un gran porcentaje de estos (aproximadamente un 75%) (Decreto 8 de 2019) corresponden a neumáticos de reposición, mientras que el restante forma parte de los vehículos nuevos que ingresan al mercado.

Una vez que los neumáticos cumplen su vida útil de servicio, que en promedio es de 100.000 km, pasan a denominarse Neumáticos Fuera de Uso (NFU's), los cuales en general son desechados y enviados a vertederos incontrolados, generando una gran contaminación en los lugares donde estos son dispuestos. De acuerdo con un estudio realizado en 2019 por la Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G. (CINC), cada año se generan en Chile en torno a 130.000 toneladas de NFU's, de los cuales solo un 17% (Decreto 8 de 2019) se procesa ambientalmente.

Existen técnicas de valorización ambiental para desarrollar opciones de reciclaje y reutilización de los NFU's una vez que estos son desechados, utilizándose actualmente en Chile, las siguientes:

- Trituración de neumáticos, para la obtención de gránulos de caucho de diversa granulometría para su uso en césped sintético, pistas de atletismo, sistemas de aislación térmica y auditiva, entre otros.

- Valorización energética, mediante sistema de combustión en horno rotatorio para la fabricación de cemento, o pirólisis para la obtención de subproductos como el alambre y el pyro-oil.
- Reutilización directa, mediante la utilización de neumáticos en la estabilización de laderas, cobertura de geomembrana en rellenos sanitarios, barreras de contención, entre otros.

Por otra parte, en el año 2016 se promulgó la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que establece el marco de referencia *para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomenta el reciclaje, reutilización y valorización de residuos que han sido definidos como prioritarios*, entre los que se encuentran los neumáticos. A través de esta ley, se obliga a los productores de productos prioritarios, a hacerse cargo de los residuos al término de su vida útil y tener una mejor gestión, fortaleciendo la mejora del sistema de recolección, almacenamiento y valorización de los materiales.

Esta ley contempla como metas alcanzar un 100% de valorización de los neumáticos de uso en carretera en 2027 y el 100% de los neumáticos de la minería en 2026. De acuerdo con lo establecido por esta Ley, el primer producto prioritario al cual aplicará la REP corresponde a los neumáticos, entrando en vigor en el año 2021, donde se espera que sean valorizados alrededor del 25% del total de NFU's que son generados anualmente.

Las metas definidas en la Ley REP presentan un desafío importante para identificar nuevas alternativas orientadas a la valorización de los NFU's, a través de opciones que permitan

un mayor consumo de este material respecto a las aplicaciones actualmente utilizadas. En este sentido, el uso de NFU's en aplicaciones geotécnicas se presenta como una alternativa de valoración para cumplir con los requerimientos establecidos en la Ley REP, esto porque se requiere de grandes volúmenes de neumáticos para implementar obras como por ejemplo son los rellenos y permiten darle una solución ambiental a este producto que actualmente tiene un destino final no conocido.

1.1.Objetivo general

Estudiar la utilización de NFU's como material de relleno para su aplicación en obras de carretera en Chile, que permitan desarrollar nuevas alternativas de valoración y disposición final para este residuo.

1.2.Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se han definido para llevar a cabo el siguiente trabajo de tesis, han sido los siguientes:

- Establecer el estado del arte del uso de NFU's en aplicaciones geotécnicas.
- Determinar las propiedades geotécnicas que presentan los NFU's, obtenidos a partir de antecedentes bibliográficos y que permitan verificar su potencial utilización como material de relleno en obras de terraplén.
- Proponer un prototipo de relleno mediante el uso de NFU's, como alternativa de valoración a las técnicas actualmente utilizadas en Chile.

1.3. Metodología de trabajo

Para el desarrollo de esta memoria de título, se ha establecido la siguiente metodología de trabajo:

Capítulo II: Uso de NFU's en aplicaciones geotécnicas. En este capítulo se ha establecido el estado del arte de los NFU's, para esto, se realiza un estudio de su estructura general, bajo que normas se rigen actualmente y cuáles son los distintos métodos de valorización que se utilizan actualmente.

Capítulo III: Caracterización geotécnica de los NFU's, se estudian las diferentes propiedades y parámetros geotécnicos que influyen directamente al momento de utilizar este material como relleno en obras de terraplén.

Capítulo IV: Evaluación de la estabilidad de rellenos conformados por NFU's, se establecen diferentes modelos de terraplén y se estudia la factibilidad de poder ser utilizados en obras de carretera en Chile.

Capítulo V: Conclusiones, con los diferentes análisis realizados, se establecen las conclusiones y recomendaciones principales a tener en consideración al momento de llevar a cabo una obra geotécnica de características similares a la estudiada.

2. USO DE NFU's EN APLICACIONES GEOTÉCNICAS

2.1.¿Qué son los NFU's?

Los neumáticos son diseñados para cumplir una vida útil de servicio, que en promedio es de 100.000 km y cumplido este período, son desechados pasando a denominarse Neumáticos Fuera de Uso (NFU's), de los cuales un 83% (Decreto 8 de 2019) tiene un destino final desconocido, generalmente dispuestos en vertederos ilegales, sitios eriazos y quebradas.

El neumático está compuesto por distintos materiales, dentro de los que destacan:

- Caucho (natural y sintético) – 41%.
 - Negro de humo – 28%.
 - Acero – 15%.
 - Otros componentes – 16%.
- (UNEP/CHW.9/18, 2008)

El caucho es el elemento principal que compone la estructura de un neumático. La Figura 1 muestra una sección de un neumático, donde se detallan los distintos materiales de los que está compuesto y la Tabla 1 presenta un resumen de los contenidos en peso (determinados en porcentajes), de la proporción de cada uno de los componentes del neumático.

Tabla 1. Composición de materias primas por tipo de neumáticos

Material	Automóvil	Buses y Camiones
Caucho natural	14%	27%
Caucho sintético	27%	14%

Material	Automóvil	Buses y Camiones
Negro de humo	28%	28%
Acero	14 - 15%	14 - 15%
Textiles	16 - 17%	16 - 17%
Óxido de Zinc		
Aditivos		
Sulfuro		
Peso promedio	8,6 Kg	45,4 Kg
Volumen	0,06 m3	0,36 m3

(Porcentajes en peso) Fuente: UNEP/CHW.9/18, 2008.

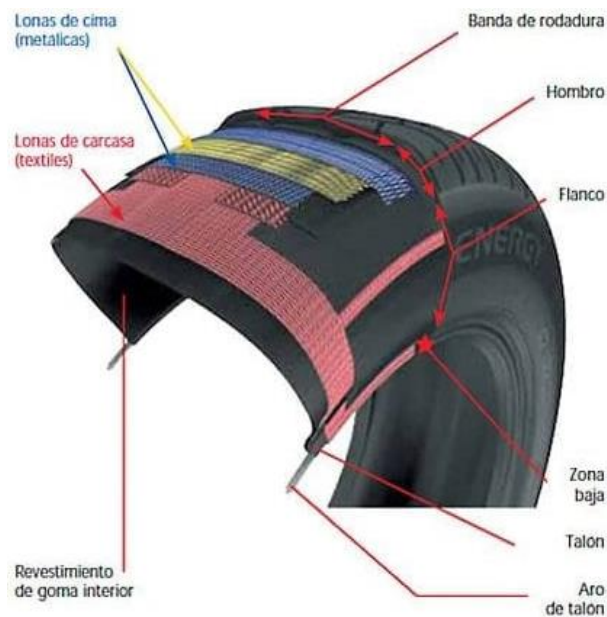


Figura 1. Estructura de un neumático

Fuente: Partes de un neumático - Euromaster. (s.f.).euromaster-neumaticos.es.

(<https://www.euromaster-neumaticos.es/neumaticos/informacion/partes-de-un-neumatico>)

La banda de rodadura, hombro y flanco forman lo que se denomina el perfil del neumático, y es la zona que está en contacto con el pavimento. Esta área está compuesta de caucho, el cual presenta propiedades como:

- Impermeabilidad, para evitar que tanto el agua como el aire ingresen al interior del neumático, y
- Capacidad de adhesión, la cual es vital, ya que es la zona que se encuentra en contacto con el pavimento y otorga seguridad al vehículo.

El caucho se utiliza para la fabricación de neumáticos tanto en forma natural como sintética, ya que la primera aporta elasticidad y resistencia a la tracción, mientras que la segunda presenta una mayor resistencia térmica que el caucho natural.

En su interior existen textiles de lonas y cables de acero que refuerzan el neumático, los cuales le dan mayor rigidez a la estructura y aumentan su estabilidad. Finalmente, en la parte interna se incluye un revestimiento de goma que permite reducir o evitar las filtraciones de agua hacia su interior.

Existen distintos tipos y tamaños de neumáticos, lo que agrega una complicación adicional cuando estos son desechados. Un neumático de vehículo liviano pesa en promedio entre 6,5 y 10 kg, los cuales pueden ser manipulados de manera relativamente sencilla. Por otro lado, los neumáticos de camiones pueden superar los 50 kg, mientras que los neumáticos de vehículos agrícolas bordean los 100 kg, lo que conlleva un problema de manipulación mayor y un gasto energético para destruirlos muy grande.

El recauchaje es un proceso que permite extender la vida útil de los neumáticos, el cual consiste en cambiar la banda de rodadura, sin embargo, llega un punto en que este método no puede seguir realizándose y como resultado de ello, el neumático debe ser dado de baja

al dejar de aportar seguridad, transformándose en un NFU. La Tabla 2 muestra un resumen de la generación de NFU's en Chile desde el año 2011 al año 2019, donde se puede observar que el aumento en este período ha sido del orden de un 42%.

Tabla 2. Toneladas de NFU's generadas en Chile entre 2011 y 2019 según su uso

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
AGRICOLA FORESTAL E INDUSTRIAL	6.135	6.756	5.705	5.568	6.088	6.819	6.732	6.864	6.533
AUTO Y CAMIONETA	26.557	27.499	33.069	35.502	40.994	40.788	44.846	41.545	40.912
CAMION Y BUS	34.027	42.923	45.751	39.057	51.350	48.406	46.257	47.074	49.894
MINERIA Y CONSTRUCCION	34.591	37.746	47.696	36.897	33.308	25.081	35.184	38.098	46.271
OTROS	1.266	1.807	1.558	1.683	1.734	1.663	1.840	1.548	1.410
Total generación de NFU's	102.576	116.732	133.779	118.707	133.457	122.757	134.860	135.129	145.020

Fuente: Generación de Neumáticos Fuera de USO (julio 2020). CINC.
(www.cinc.cl)

El volumen que estos presentan, combinado con su estructura los convierte en un material inestable al momento de ser apilados, por lo que su depósito en rellenos sanitarios está prohibido actualmente, provocando que finalmente estos sean llevados a vertederos ilegales en los que en muchas ocasiones son incinerados, provocando a consecuencia de ello, contaminación ambiental.

2.2.Situación actual de los NFU's en Chile

En el año 2016 se promulgó en Chile la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), la cual establece un marco jurídico para *la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento al reciclaje*. Esta Responsabilidad Extendida del Productor ya había sido implementada en diversos países como Estados Unidos, Canadá,

Alemania, España, Japón, Brasil, entre otros, con el propósito de poner bajo la responsabilidad de los productores, la organización y financiamiento de los residuos de productos que comercialicen en el país definidos como prioritarios.

Uno de los grandes objetivos que persigue esta ley es que los productores se hagan cargo de los residuos una vez que finalice su vida útil y que junto con esto, se cumplan ciertas metas de recolección y valorización establecida por el Ministerio del Medio Ambiente, para así incentivar la prevención en la generación de residuos y fomentar su reutilización y reciclaje.

Se entiende por productores todas aquellas personas que introducen por primera vez un producto prioritario en el mercado nacional, como fabricantes o importadores. Por otro lado, los gestores de residuos son quienes se encargan del proceso de tratamiento de los productos una vez que estos alcanzan su vida útil, donde se abarca desde la valorización de estos residuos, hasta la eliminación de ellos.

Los neumáticos son uno de los nueve productos que se encuentran dentro de la lista de productos prioritarios para los cuales rige la ley REP en Chile, donde características como su volumen, peligrosidad o presencia de recursos aprovechables son las que los hacen participar de esta lista una vez que terminen su etapa de vida útil y se transforman en residuos. La Tabla 3 presenta las metas establecidas por la Ley REP para el tratamiento que se debe dar a los NFU's en Chile.

Tabla 3. Metas REP en toneladas de NFU

Toneladas NFU						
Categoría "A"					Categoría "B"	
Año	Recolección	Valorización	Valorización	Eliminación	Recolección	Valorización
	n	n Material	n Energética	n o acopio	n	n
2022	71.160	21.348	14.232	35.580	7.220	7.220
*						
2023	73.295	26.386	17.591	29.318	7.437	7.437
2024	75.494	31.707	21.138	22.648	7.660	7.660
2025	124.413	55.986	37.324	31.103	7.889	7.889
2026	128.146	57.666	38.444	32.037	24.378	24.378
2027	131.991	79.194	52.796	0	25.109	25.109
2028	135.950	81.570	54.380	0	25.863	25.863
2029	157.532	94.519	63.013	0	35.519	35.519

*Fecha estimada de entrada en vigencia.

Fuente: Metas REP en toneladas de NFU. (2020, febrero). CINC.

(www.cinc.cl)

2.3. Métodos de valorización de los NFU's

La valorización consiste en una serie de técnicas y procesos mediante los cuales se desarrollan opciones de reciclaje y reutilización de los NFU's, una vez que estos son desechados tras alcanzar su vida útil. La idea es que, mediante estas alternativas, se

reduzca o elimine el envío de NFU's a vertederos incontrolados y con ello, la contaminación ambiental que esto genera.

La gestión de los NFU's es la menos desarrollada en Chile y la demanda por este material en el mercado ha sido muy baja. Actualmente las alternativas de valorización son muy escasas en el país y la disponibilidad de NFU's supera ampliamente la demanda de subproductos, que actualmente se procesan para distintas aplicaciones, donde destacan:

- Trituración de neumáticos, para la obtención de gránulos de caucho;
- Valorización energética, mediante sistema de combustión en alto horno, y
- Reutilización directa de los neumáticos.

A continuación, se entrega una descripción más detallada de cada una de estas técnicas de valorización de NFU's.

2.3.1. Trituración de neumáticos

En este proceso los trozos triturados se separan en distintas medidas, además, se hace una separación de los tres componentes principales que presenta. Por un lado, el acero se extrae mediante la utilización de imanes y por otra parte la fibra textil es extraída por aspiración, para que finalmente el caucho sea separado en sacos según las diferentes medidas de gránulos que se obtienen.

Según el diámetro que se obtenga de las partículas, dependerá el uso que se da a este material, entre las que se encuentran:

- Pistas de atletismo.
- Césped sintético.
- Parques.
- Pavimentos.

- Solerillas.
- Tapetes.
- Aislación térmica y acústica.

Es importante destacar que tanto el acero como la fibra textil extraídos durante el proceso de trituración, también son reciclados. La Figura 2 muestra el producto final que es obtenido como resultado del proceso de trituración de los NFU's, el cual en general presenta un tamaño de partículas similar al de una arena gruesa.



Figura 2. Gránulos de caucho

Fuente: POLAMBIENTE | PRODUCTOS | aislación-pisos deportivos. (s.f.). polambiente

(<https://www.polambiente.com/productos>)

2.3.2. Valorización energética

La finalidad de este proceso de valorización es utilizar los NFU's como combustible, siendo una alternativa a los productos de uso tradicional como son el petróleo y el carbón, debido al gran poder calorífico que estos presentan. Este proceso se lleva a cabo en general en sistemas de horno rotatorio, utilizado ampliamente en la industria de fabricación del cemento.

Otro de los procesos de valorización energética corresponde a la pirolisis, en donde los NFU's son sometidos a aplicación de calor, pero en ausencia de oxígeno, de esta manera

el neumático se descompone en tres nuevos productos, los que se presentan en estado líquido, sólido y gaseoso, siendo todos estos componentes reutilizables. El producto que se rescata con un mayor porcentaje en este proceso es el sólido, conocido como carbón negro o negro de humo, el cual puede ser usado posteriormente en la manufactura de nuevos neumáticos o también, filtros cerámicos y separadores electrostáticos.

2.3.3. Reutilización directa

En este tipo de valorización los neumáticos tienen variados usos, como, por ejemplo, la estabilización de laderas, barreras de contención, coberturas de geomembranas en rellenos sanitarios, entre otras.

2.4. Aplicaciones geotécnicas para los NFU's

Uno de los grandes problemas de los NFU's es que las cantidades que se generan de ellos son superiores a las requeridas por los distintos métodos de valorización anteriormente señalados, y considerando las metas establecidas por la ley REP, el uso de NFU's en aplicaciones geotécnicas juegan un papel fundamental, ya que en general se requiere de grandes volúmenes de este material para poder llevar a cabo este tipo de obras, no así por ejemplo el desarrollo de una cancha de atletismo, que no demanda grandes cantidades de neumáticos.

Las aplicaciones geotécnicas con el uso de NFU's que se han desarrollado a la fecha, cubren distintos ámbitos de la ingeniería, entre las que se pueden destacar obras de drenaje y de contención, tal como las que se indican a continuación.

2.4.1. Sistemas de drenaje

Dado que el principal componente de los neumáticos es el caucho y que este se caracteriza por ser un material impermeable, se ha aprovechado esta capacidad para implementar el uso de NFU's en sistemas de drenaje. Este sistema se ha incorporado con éxito para riegos agrícolas, en los cuales se destaca la disminución de la saturación del suelo gracias a los drenes, lo que a su vez contribuye a la disminución de plagas y enfermedades por exceso de agua acumulada.



Figura 3. Drenaje agrícola con NFU's

Fuente: https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/drenaje_agricola_con_neumaticos_fuera_de_uso_bis.pdf

2.4.2. Sistemas de contención

Otra de las aplicaciones geotécnicas donde se destaca considerablemente el uso de NFU's es como sistema de contención de tierras. Estos casos son muy utilizados en la región de Valparaíso y en otras partes del mundo, incluso se conoce de este tipo de aplicación en proyectos mineros. Para llevar a cabo este sistema, los NFU's se rellenan de suelo el cual

se compacta en su interior, los que posteriormente se van superponiendo, creando así un muro de contención tal como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Muro de contención con NFU's.

Fuente: https://www.ndf.fi/sites/ndf.fi/files/attach/01._manual_de_muro_llantas.pdf

Otra alternativa para la contención de taludes y que se ha desarrollado principalmente en Estados Unidos, es utilizar como sistema de contención los NFU's mediante la técnica de balas¹ (Tire bales in highway applications: feasibility and properties evaluation, 2005). Esta alternativa permite fabricar estructuras con una importante cantidad de NFU's, los cuales se amarran con elementos geosintéticos o de acero, formando elementos prismáticos similares a los gaviones, que se caracterizan por su elevado peso que le da finalmente la estabilidad a la estructura de contención (1 ton aproximadamente de peso por bala).

La Figura 5 muestra la configuración de una bala de NFU's.

¹ Balas: También conocidos como fardos de neumáticos, corresponden a neumáticos enteros, comprimidos y amarrados con alambre galvanizado inoxidable.



Figura 5. Balas de NFU's

Fuente: Mechanical Properties of Tire Bales for Highway Applications. (2009, diciembre).

2.4.3. Relleno de terraplén

Países como Estados Unidos o España actualmente realizan obras de terraplén en las que utilizan NFU's troceados como material de relleno. Dentro de las principales ventajas que presenta esta alternativa, es su reducido peso, debido a la baja densidad que presentan los NFU's troceados cuando son utilizados como material de relleno. Como resultado de ello, la carga que transmiten al suelo de fundación es baja y recomendable para aquellos sitios que presentan baja capacidad de soporte.

Para realizar este proceso los neumáticos deben ser troceados previamente, y deben ser protegidos con una geomembrana, con el propósito de evitar potenciales filtraciones de agua al núcleo del terraplén.



Figura 6. NFU's troceados dispuestos para ser usados en una obra de terraplén

Fuente: <https://canalinnovacion.sacyr.com/-/neumaticos-con-una-segunda-vida-sostenible>

3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS NFU's

Las aplicaciones de NFU's en obras de relleno se realizaban de manera inicial, con neumáticos enteros, sin llevar a cabo un tratamiento previo para su colocación. Esta forma de disponer los NFU's presenta problemas principalmente en su compactación y colocación al interior de los rellenos. En este sentido, a partir de la década de los 90 se comenzaron a desarrollar en Estados Unidos nuevas alternativas de disposición de los NFU's para ser utilizados en obras de relleno, dentro de las que se destacan:

- NFU's troceados
- Balas compuestas por NFU's enteros

Para el caso de los NFU's troceados, se utilizan trituradoras que permiten reducir el tamaño de los neumáticos según la aplicación a la que se destine el residuo, donde la mayor o menor intensidad de la trituración permite obtener distintos tamaños de partículas de este producto. Para el caso particular de NFU's a aplicar en obras de relleno, según lo señalado por la norma ASTM 6270, se distinguen entre tiras (shreds) cuyos tamaños de partículas oscilan entre 50 y 300 mm, y trozos (chips) cuyos tamaños de partículas oscilan entre 10 y 50 mm. La Figura 7 muestra un ejemplo de NFU's troceados.

Los neumáticos troceados, como los mostrados en la Figura 7, quedan en general con alambres expuestos, los cuales, al entrar en contacto con la humedad, se oxidan, lo que puede generar una reacción exotérmica que puede provocar la incineración de los neumáticos. Esta es una de las principales desventajas que presenta este tipo de solución

para su uso en obras de relleno, lo cual ha sido solucionado protegiendo los NFU's troceados con sistemas de impermeabilización tipo geomembranas.



Figura 7. NFU's troceados

Para la trituración de NFU's no existe un procedimiento estandarizado para su trituración, en general las plantas de procesado cuentan con una etapa primaria de triturado, formada por molinos rotatorios con cortadores que son refrigerados por agua, para posteriormente pasar a una etapa secundaria de triturado, donde se alcanza el tamaño final deseado. Además, en el caso de requerir un tamaño menor del material, por ejemplo, gránulos de caucho, las plantas cuentan con pasadas de imanes y tamizado, que permiten eliminar los alambres y textiles con que cuentan los neumáticos. La Figura 8 muestra una planta típica de troceado de NFU's.



Figura 8. Planta y máquina para la trituración de NFU's

Fuente: Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering applications (Edeskär, 2004)

En cuanto a los NFU's formados por balas de neumáticos, las principales aplicaciones han estado orientadas en la estabilización de taludes, como sistemas de refuerzo al pie que permiten otorgar estabilidad a este tipo de obras y una solución ambiental para los neumáticos. Una de las ventajas que presenta esta aplicación con respecto al troceado, es que se elimina el proceso de trituración y como consecuencia de ello, se reduce la reacción exotérmica dada la interacción de los alambres expuestos con la humedad ambiente.

Las balas de neumáticos son fabricadas a partir de una máquina que es capaz de comprimir del orden de 100 NFU's formando una estructura prismática de 1.5 m^3 de volumen y de 1.1 a 1.3 ton de peso. Una vez formada la bala de NFU's, esta es amarrada mediante cables de acero galvanizado o inoxidable, tal como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Ejemplo de bala de NFU's

Fuente: Engineering properties of tire bales for soil repairs and embankment construction (Zornberg y LaRocque, 2006).

A continuación, se presentarán las principales propiedades geotécnicas de los NFU's, sean troceados y como sistema de balas, que permitan un mayor entendimiento de su comportamiento geotécnico para su uso como material de relleno.

3.1.NFU's como material de relleno en obras de terraplén

En ocasiones el terreno en el cual se desarrollará una obra de ingeniería es irregular, presenta desniveles, lo cual implica primero trabajar el terreno para posteriormente materializar la obra. Si se presenta un terreno de cota muy elevada respecto a lo establecido en el diseño, se debe extraer material, proceso conocido como desmonte o corte. Por otro lado, si la cota del terreno está por debajo de lo requerido se debe construir un relleno, obra que es conocida como terraplén.

La construcción de un terraplén implica disponer de una obra que debe ser capaz de otorgar propiedades de estabilidad, deformaciones tolerables a corto y largo plazo y una

puesta en obra en condiciones aceptables, la cual deberá soportar las solicitaciones a las que se verá expuesta, tanto en condiciones estáticas como sísmicas (caso particular de países como Chile).

Generalmente para los terraplenes se utilizan materiales provenientes de empréstitos próximos a la obra, sin embargo, estos no siempre se pueden utilizar como relleno ya que en ocasiones no cumplen con las características geotécnicas necesarias para otorgar al relleno las propiedades básicas anteriormente mencionadas. Además, la explotación de sitios de empréstito genera un impacto ambiental el cual puede ser resuelto utilizando métodos alternativos de rellenos, como es el caso de los NFU's.

Un relleno tipo terraplén está conformado de la siguiente manera (ver Figura 10):

- **Coronación:** Corresponde a la parte superior del terraplén, está inmediatamente arriba del núcleo y es la que tendrá contacto con la obra de ingeniería que se realice.
- **Núcleo:** Es el relleno del terraplén, se encuentra bajo la coronación y descansa sobre el cimiento, mientras que lateralmente es cubierto por el espaldón.
- **Espaldón:** Corresponde a la parte exterior del terraplén, encargada de cubrir el núcleo por sus costados.
- **Cimiento:** Es la parte inferior del terraplén y la que tendrá contacto directo con el terreno.

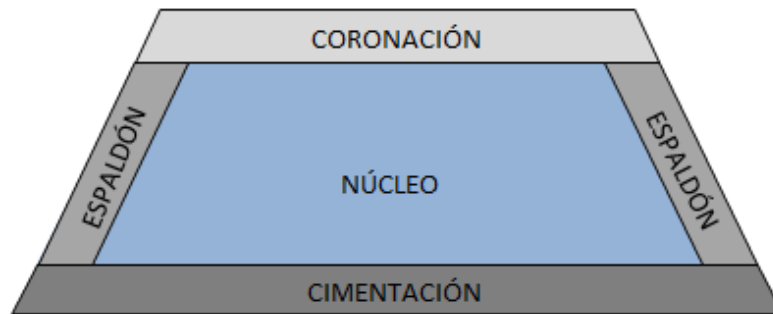


Figura 10. Conformación de un terraplén

Existen diversas propiedades que transforman a los neumáticos en un material con alto potencial para ser utilizado como relleno en terraplenes, ya sea por propiedades físicas, el peso y volumen que presentan, así como también por sus propiedades mecánicas.

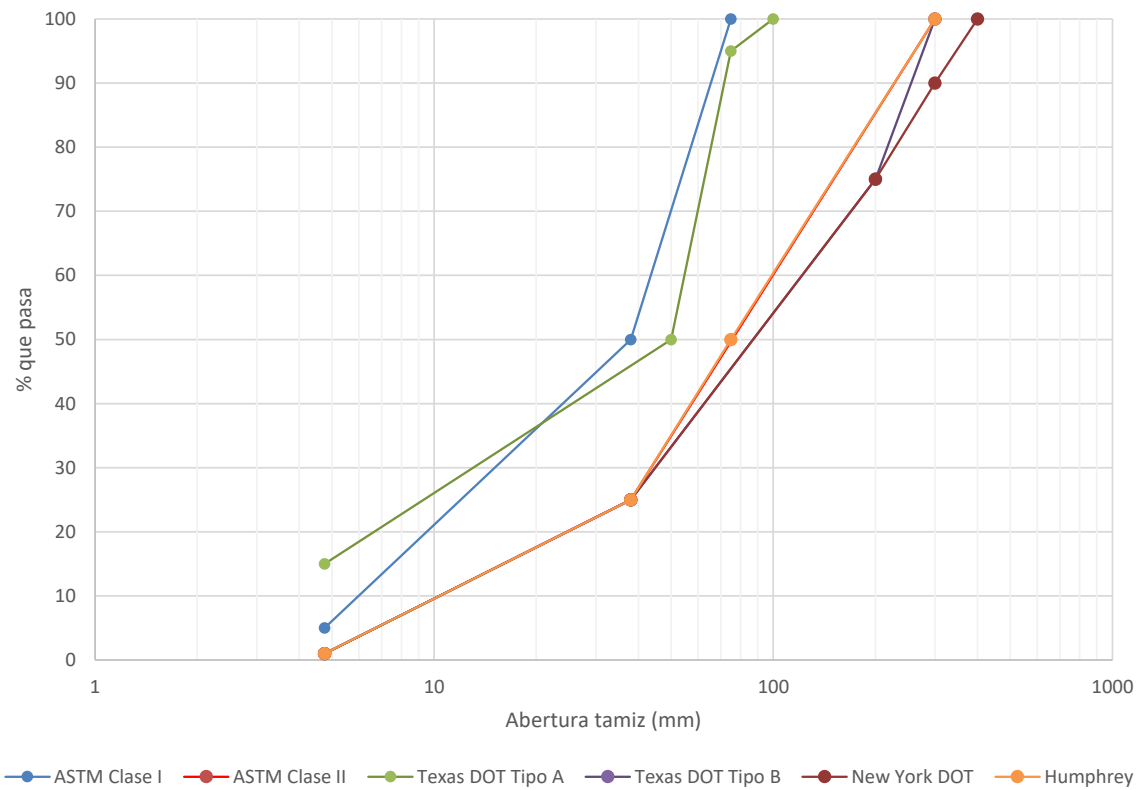
Tal como fue mencionado con anterioridad, la baja densidad de los neumáticos lo transforman en un material atractivo para ser utilizado cuando el suelo de fundación es compresible y tiene una baja capacidad de soporte, además, dadas las dimensiones de este tipo de obras, la cantidad de NFU's que se requiere es elevada comparada con otros métodos de valorización usados actualmente, lo que ayudaría por un lado cumplir con los requerimientos que imponen la Ley REP y por otro lado, darle a los neumáticos un destino conocido reduciendo el impacto ambiental que los vertederos incontrolados provocan.

3.2.Propiedades físicas

3.2.1. Granulometría de los NFU's

Los NFU's troceados que son utilizados en aplicaciones de ingeniería y en especial como material de relleno en terraplenes, presentan granulometrías con tamaños máximos que oscilan entre 75 y 400 mm, y con un tamaño menor de partículas restringido a la malla #4 (4.76 mm de abertura). La Figura 11 muestra distintas curvas granulométricas de NFU's troceados, que son utilizadas para estos fines. La distribución de las curvas es bastante uniforme, con coeficientes de uniformidad (Cu) cercanos a 10.

El limitar el tamaño mínimo de los NFU's troceados a la malla #4 y el contenido de material que pasa a través de esta malla (entre un 1% y 5%), se debe a que mientras menor sea el tamaño de las partículas, aumenta la posibilidad de auto combustión de los neumáticos. En general este fenómeno se produce por la oxidación del caucho, debido principalmente a que cuando los neumáticos se cortan, las cadenas poliméricas se rompen y con ello, las superficies de corte se oxidan para recuperar su equilibrio térmico.



Nota: ASTM Clase I y II corresponden a variaciones en el diseño de las pesas utilizadas en los ensayos.

Nota: DOT: Department of Transportation.

Nota: Humphrey: Dana N. Humphrey, Ingeniero Civil y Ambiental.

Figura 11. Granulometrías típicas de NFU's troceados utilizadas como material de relleno

3.2.2. Permeabilidad

La conductividad hidráulica representa el flujo de agua bajo condiciones de flujo laminar que pasa a través de una sección de un medio poroso, bajo un gradiente hidráulico unitario y condición estándar de temperatura. Para el caso de NFU's en la literatura se cuenta con información de ensayos de permeabilidad llevados a cabo por distintos investigadores, principalmente para el caso de NFU's troceados, en función del tamaño de las tiras y/o trozos.

La Tabla 4 presenta un resumen de los ensayos de permeabilidad sobre NFU's troceados.

Los ensayos han sido ejecutados considerando las siguientes condiciones:

- Ensayos ejecutados en permeámetros de diámetros en un rango entre 8" y 12".
- Carga vertical en algunos ensayos, simulando condiciones de esfuerzo a los que se pueden ver expuestos los NFU's.
- Tamaño de las tiras de NFU's, comprendidos entre 0,18" y 5,5".

En general los NFU's troceados presentan buena conductividad hidráulica, con valores comprendidos entre 0.0005 a 59.3 cm/s. Los menores valores se obtienen para tiras de NFU's con tamaño de 0.18" de acuerdo con los resultados obtenidos por Masad et al (1996). Por otro lado, se observa que a mayor tamaño de tiras de NFU's, la conductividad aumenta. En cuanto a la tensión vertical, la conductividad hidráulica disminuye con el aumento de la carga que se transmite hacia los NFU's, lo que puede ser un dato importante cuando estos son utilizados como material de relleno.

Tabla 4. Conductividad hidráulica para diferentes tamaños de tiras de neumáticos

Referencia	Tamaño de las tiras (pulg.)	Conductividad Hidráulica (cm/s)	Condiciones Específicas del Ensayo
Bressette, 1984	1-2.5	2.9-23.5	-
ASTM, 1998	0.2-2.0	3.8-59.3	-
Hall, 1991	1.5	1.43-2.64	Sobrecarga simulada de 0 a 10.5 m de altura
	0.75	0.79-2.74	Sobrecarga simulada de 0 a 7.5 m de altura
Humphrey et al., 1992 Humphrey and Sanford, 1993 ASTM, 1998	0.4-2	7.7	e = 0.925
	0.4-2	2.1	e = 0.488
	0.75-3	15.4	e = 1.114
	0.75-3	4.8	e = 0.583
	0.4-1.5	6.9	e = 0.833
Edil et al., 1992 Edil and Bosscher, 1994	2-3	1.5	e = 0.414
		0.6	0 kg/cm ²
		0.45	0.7 kg/cm ²

Referencia	Tamaño de las tiras (pulg.)	Conductividad Hidráulica (cm/s)	Condiciones Específicas del Ensayo
		0.4	1.41 kg/cm ²
Ahmed and Lovell, 1993	0.5-1.5	0.58	-
Duffy, 1995	2	0.7	1.22 kg/cm ²
		0.53	2.44 kg/cm ²
		0.25	4.88 kg/cm ²
		0.12	7.32 kg/cm ²
Narejo and Shettima, 1995	2.4-4.0	55.0	0.92 kg/cm ²
		20.0	1.53 kg/cm ²
		10.0	3.57 kg/cm ²
		6.0	5.61 kg/cm ²
Adrews and Guay, 1996	1-2	1.0	-
Masad et al., 1996	0.18	0.002	1.53 kg/cm ²
		5x10 ⁻⁴	3.57 kg/cm ²
Cecich et al., 1996	0.2-0.6	0.03	ASTM D2434
Bernal et al., 1996	2	1.2	-
Zimmerman, 1997	8-16	0.9	e = 2.770
		3.2	e = 1.530
		1.8	e = 0.780
Lawrence et al., 1998	0.5-1.5	7.6	e = 0.693
	0.5-1.5	1.5	e = 0.328
	0.5-3	16.3	e = 0.857
	0.5-3	5.6	e = 0.546
Chu, 1998	0.25-0.5	0.16	-
	0.5-1.0	0.18	-
	1.0-1.5	0.18	-
Reddy and Saichek, 1998	0.5-5.5	0.65	1.66 kg/cm ² , Compresión 50%
	0.5-5.5	0.01	10.3 kg/cm ² , Compresión 65%

Nota: e: proporción de vacíos.

Fuente: "Properties of different size scrap tire shreds: Implications on using as drainage material in landfill cover systems", por K. R. Reddy, & A. Marella, 2001, Chicago: University of Illinois, p. 6.

3.2.3. Densidad

Una de las principales propiedades que presentan los NFU's, tanto troceados como los sistemas de balas de neumáticos, es su baja densidad, esto debido principalmente a la gravedad específica que presentan estos materiales. La Tabla 5 presenta valores típicos de gravedad específica para distintos tipos de NFU's, valores que están muy por debajo de los habitualmente utilizados para suelos, los que dependen principalmente de la cantidad de fibras y tiras de acero que tengan en su composición.

Tabla 5. Valores típicos que presentan los NFU's

Referencia	Gs	Material
LaRocque (2005)	1.14-1.23	Bala de NFU
Zornberg et al (2004)	1.07-1.14	Bala de NFU
Humphrey & Manion (1992)	1.05	Trozos de NFU
Moo-Young et al (2003)	1.06-1.1	Tiras de NFU

Fuente: "Mechanical properties of tires bales for highway applications", por B. Freilich & J. G, Zornberg, 2009, p. 5.

Adicionalmente, la Tabla 6 presenta un resumen de valores de densidad seca reportados en la literatura, para NFU's troceados, los cuales varían en función del tamaño máximo de las tiras y de las condiciones específicas de los ensayos realizados. En general los valores se mueven en un rango comprendido entre 2.4 y 8.3 kN/m³, obteniéndose los mayores valores cuando estos materiales son compactados.

Tabla 6. Densidad seca para diferentes tamaños de tiras de neumáticos – NFU’s troceados

Referencia	Tamaño de las tiras (pulg)	ρ_d (kN/m ³)	Condiciones Específicas del Ensayo
Bressette, 1984 ASTM, 1998	0.2 - 2.5	4.0-6.0	-
Humphrey et al., 1992 Humphrey and Manion, 1992 Manion and Humphrey, 1992 Humphrey and Sandford, 1993 ASTM, 1998	0.08 - 3 0.08 - 2 0.08 - 1	3.4 4.0-4.7 4.9	No compacto
Ahmed, 1993 Ahmed and Lovell, 1993 ASTM, 1998	0.5 - 2	4.6	No compacto
	0.5 - 1	4.8	No compacto
	0.5 - 1	4.9	ASTM D 4253
	0.5	4.7	ASTM D 4253
	0.5 - 2	6	50% compactación estándar
	0.5 - 1	6.3	
Humphrey et al., 1992 Humphrey and Manion, 1992 Manion and Humphrey, 1992 Humphrey and Sandford, 1993 ASTM, 1998	0.08 - 3 0.08 - 2 0.08 - 1	6.1 6.2-6.4 2.4	60% compactación estándar
Ahmed, 1993 Ahmed and Lovell, 1993 ASTM, 1998	0.4 - 2	6.3	Energía de compactación estándar
	0.5 - 1.5	6.4	
	0.5 - 1	6.5	
	0.5	6.3	
Edil and Bosscher, 1992	0.75 - 3	5.8	Molde de 6 pulgadas de diámetro compactado por Apisonador de 10 libras cayendo 12 pulgadas
Edil and Bosscher, 1994 ASTM, 1998	0.75 - 3	5.5	Molde de 12 pulgadas de diámetro compactado por Apisonador de 60 libras cayendo 18 pulgadas

Referencia	Tamaño de las tiras (pulg)	ρ_d (kN/m ³)	Condiciones Específicas del Ensayo
Humphrey and Manion, 1992 Manion and Humphrey, 1992 ASTM, 1998	0.08 - 2	6.5	Compactación modificado
Ahmed, 1993	0.5 - 2	6.6	
Ahmed and Lovell, 1993 ASTM, 1998	0.5 - 1	6.7	
Upton and Machan, 1993	2	3.8-5.2	Suelta
		7.1	Compactada
		8.2-8.3	Sobrecarga de 0.9 m de suelo, con pavimento y carga de tráfico
Newcomb and Descher, 1994	0.78 - 1.8	4.9-5.5	
Black and Shakoor, 1994	<0.04 - 0.27	5.2	-
Duffy, 1995	2.0	4.7-7.7	-
Masad et al., 1996	0.18	6.2	
Cecich at al., 1996	0.2 - 0.6	5.5-5.9	ASTM D 1557
Adrews and Guay, 1996	1-2	6.3	-
Wu et al., 1997	<0.08	5.2	Trozos de neumáticos sin acero
	<0.37	5.0-5.9	
	<0.74	5.6	
	<0.15	5.9	
Tweedie et al., 1998	1.5	7	Pruebas de campo a gran escala
	3	6.8	
Chu, 1998	0.25 - 1.5	6.8-6.9	-
Reddy and Saichek, 1998	0.5 - 0.55	4.1	No compacto

Recuperado de: "Properties of different size scrap tire shreds: Implications on using as drainage material in landfill cover systems", por K. R Reddy & A. Marella, 2001, Chicago: University of Illinois, p. 3.

Por otro lado, Edeskär (2004) ha reportado una serie de resultados de densidad de campo y como esta varía en función de la tensión vertical que es aplicada sobre los rellenos formados por tiras de NFU's. La Figura 12 muestra los resultados obtenidos en estas pruebas, donde se puede observar que la densidad de campo no se ve influenciada de

manera significativa con la tensión vertical, con valores que se mueve en un rango comprendido entre 600 y 800 kg/m³ (5.9 a 7.8 kN/m³).

Además, para un mismo valor de tensión vertical, no existe una diferencia significativa en el valor de la densidad si comparamos distintos tamaños de tiras de NFU's. Esta propiedad permite, para el caso de rellenos, construir obras que transmiten una reducida carga hacia el suelo de fundación, siendo una alternativa interesante para su aplicación en proyectos donde se cuente con terrenos blandos y compresibles.

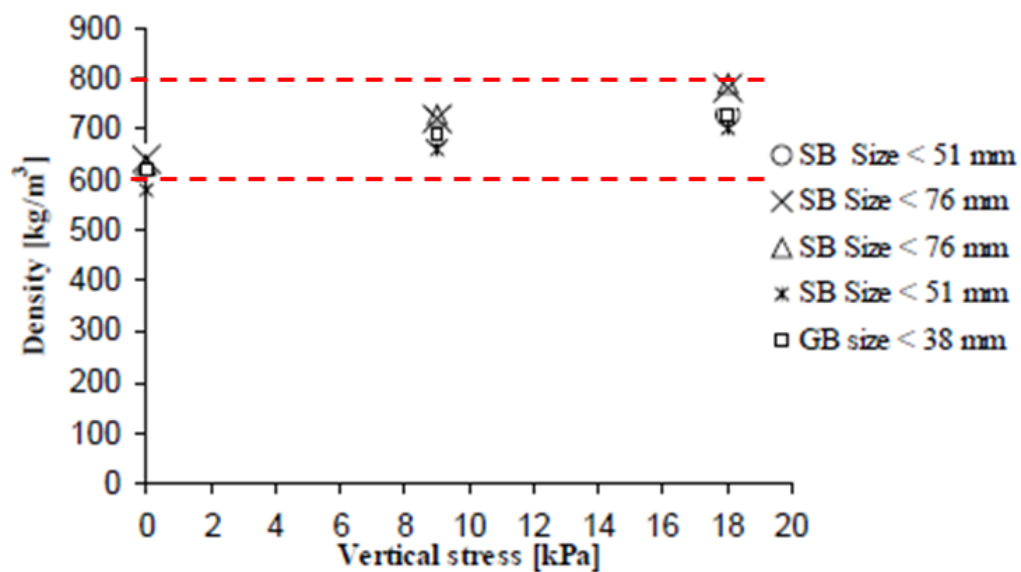


Figura 12. Relación entre la tensión vertical y la densidad de campo, para distintas tiras de NFU's

Fuente: Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering applications (Edeskär, 2004)

En cuanto a los NFU's utilizados para la confección de balas, en general la configuración geométrica y dimensiones que estos elementos tienen, corresponden a los mostrados en la Figura 13. Considerando que estas balas tienen un peso aproximado de 1.1 a 1.3 ton, la

densidad aproximada que se puede adoptar para propósitos de estudios es de 7.0 a 8.3 kN/m^3 .

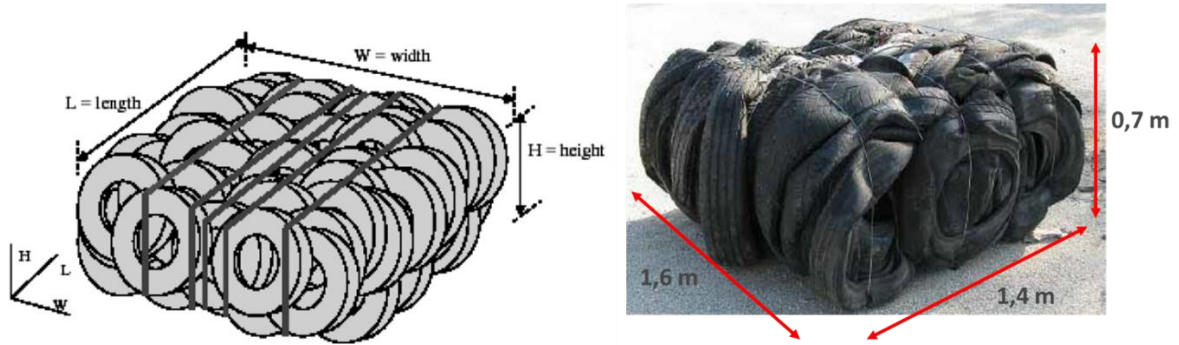


Figura 13. Configuración de una bala de NFU's (dimensiones aproximadas)

3.3. Propiedades mecánicas

Dentro de las principales propiedades de comportamiento mecánico que estudiado para NFU's troceados y en balas, se encuentra la compresibilidad y los parámetros de resistencia al corte. Para ello y de acuerdo con lo presentado en la literatura técnica, se han desarrollado ensayos en equipos de gran escala y con algunas modificaciones requeridas para evaluar los NFU's, tanto troceados como en balas.

En los resultados reportados, los equipos que habitualmente han sido utilizados corresponden al equipo de corte directo y al equipo triaxial. En el caso particular de los ensayos de corte directo, se han empleado equipos tradicionales que son utilizados en la caracterización geotecnia de suelos, donde se han efectuado ensayos sobre materiales de menor tamaño, como así también se han empleado equipos de corte directo de grandes dimensiones.

Para el caso de los ensayos triaxiales, en general se han desarrollado pruebas en equipos de grandes dimensiones y utilizando como elemento de confinamiento para la confección de las probetas, membranas de caucho, que han permitido resolver los problemas en los NFU's troceados por la presencia de alambres.

Finalmente, en el caso de las balas se han desarrollado pruebas de gran escala similares a un ensayo de corte directo, utilizando como elementos de trabajos vigas y gatos hidráulicos para llevar a cabo el movimiento relativo entre distintas balas de NFU's. Este tipo de pruebas han permitido determinar parámetros de resistencia al corte que en general, están controlados por la resistencia en la interfaz que se producen en el contacto entre balas de NFU's.

Las siguientes figuras muestran las características de los equipos que han sido utilizados para la evaluación de la resistencia al corte de estos materiales como para la compresibilidad.



Figura 14. Equipo triaxial y probeta de ensayo, para pruebas en NFU's troceados

Fuente: Caracterización de NFU's para su reciclado en obra civil (San Martín, 2009)

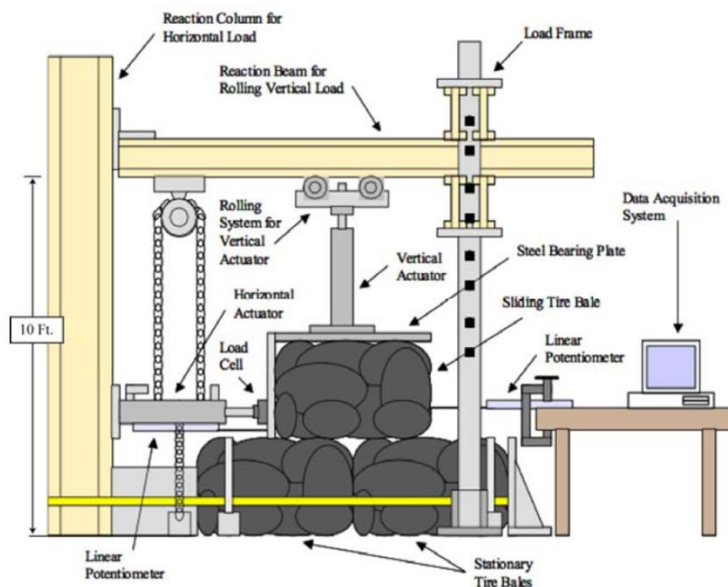


Figura 15. Esquema equipo utilizado para pruebas de NFU's en balas

Fuente: Engineering properties of tire bales for soil repairs and embankment construction (Zornberg y LaRocque, 2006).



Figura 16. Edómetro utilizado para la ejecución de pruebas de compresibilidad, NFU's troceados

Fuente: Caracterización de NFU's para su reciclado en obra civil (San Martín, 2009)

3.3.1. Compresibilidad

Datos de compresibilidad se reportan en la literatura técnica, los cuales se presentan en la Tabla 7, en función del tamaño de las tiras y la presión normal aplicada para el desarrollo del ensayo, los cuales son ejecutados en edómetros como el mostrado en la Figura 16. En general los NFU's presentan una alta compresibilidad con valores que se mueven en un rango comprendido entre un 18 y un 65%.

Los valores de compresibilidad presentados en la Tabla 7, en general muestran un aumento con el incremento de la tensión normal, sin embargo, no se ve una relación directa con el tamaño de las tiras de NFU's. Por otro lado, la condición inicial de compactación (suelto o compacto), presenta una relación directa con la compresibilidad de las tiras, obteniéndose mayor compresibilidad cuando los NFU's están en estado suelto, es decir, simplemente siendo depositados.

Tabla 7. Valores de compresibilidad de NFU's troceados

Referencia	Tamaño tiras (pulg.)	Compresibilidad (%)	Condiciones específicas del Ensayo (tensión normal)
Hall, 1991	0.75-1.5	30	70 kPa
Humphrey et al., 1992	0.08-2	33-37	200 kPa (compactado)
	0.08-2	52	200 kPa (suelto)
ASTM, 1998	0.08-1	33-35	200 kPa (compactado)
	0.08-1	45	200 kPa (suelto)
Manion and Humphrey, 1992	0.08-3	38-41	200 kPa (compactado)
ASTM, 1998	0.08-2	29-37	200 kPa (compactado)
Ahmed and Lovell, 1993	0.5-1.5	27	-

Referencia	Tamaño tiras (pulg.)	Compresibilidad (%)	Condiciones específicas del Ensayo (tensión normal)
Newcomb and Drescher, 1994	1.18	25	5 kPa
		40	409 kPa
Edil and Bosscher, 1994	2-3	37	690 kPa
Zimmerman, 1997	8-16	55	38 kPa
Nickels and Humphrey, 1997 ASTM, 1998	3	18-28	25 kPa
Reddy and Saichek, 1998	0.5-5.5	31	32 kPa
	0.5-5.5	50	163 kPa
	0.5-5.5	65	1005 kPa

Recuperado de: "Properties of different size scrap tire shreds: Implications on using as drainage material in landfill cover systems", por K. R. Reddy, & A. Marella, 2001, Chicago: University of Illinois, p. 9.

De los resultados presentados en la Tabla 7 se puede establecer que para el caso del uso de NFU's como material de relleno en terraplenes, donde se pueden presentar cargas en un rango comprendido entre 25 y 70 kPa, la compresibilidad de las tiras de NFU's puede alcanzar un grado de compresibilidad comprendido entre un 15% y un 30% aproximadamente. Estos datos son importantes de tomar en cuenta para la compresión post construcción que se puede presentar en un relleno conformado por este material, una vez que entran en operación y durante toda su vida útil de funcionamiento.

3.3.2. Resistencia al corte

La evaluación de la resistencia al corte en NFU's se ha llevado a cabo tanto en equipos de corte directo como en ensayos triaxiales, en algunos casos con ensayos de gran escala, para representar de mejor manera las condiciones de los materiales que son posteriormente puestos en obra.

La Tabla 8 presenta un resumen de los parámetros de resistencia al corte presentados en la literatura técnica para NFU's troceados. Los factores que influyen en los parámetros de resistencia al corte son los siguientes:

- Tamaño de los trozos de NFU's
- Forma y orientación de las tiras
- Presencia o no de alambres
- Tensión de confinamiento aplicada para la realización de los ensayos

Tabla 8. Parámetros de resistencia al corte para NFU's troceados

Referencia	Tamaño (pulg)	c (kPa)	ϕ (°)	Condiciones específicas del Ensayo
Bresette, 1984	2 pulg cuadradas	26	21	-
	2 pulg en tiras	32	14	
Ahmed and Lovell, 1993	0.5	36	20.5	Proctor estándar y 20% de deformación en la falla
	1.0	39	24.6	Proctor modificado y 20% de deformación en la falla
		33	25.3	Proctor estándar y 20% de deformación en la falla
		37	22.6	50% proctor estándar y 20% de deformación en la falla
Humphrey et al., 1993	<1.5	9	25	Rango tensión normal: 19-72 kPa
	<2.0	4.0-8.0	21.26	
	<3.0	12	19	
Foose, 1993 Foose et al., 1996	<2	0.0-3.0	30	Rango tensión normal: 7-70 kPa
	2-4			
	4.6			
Edil and Bosscher, 1994	2-3	-	37-43	0
		-	85	Condición compacta

Referencia	Tamaño (pulg)	c (kPa)	ϕ (°)	Condiciones específicas del Ensayo
Black and Sharkoor, 1994	<0.04	5	30	Densidad seca 5 kN/m ³
	0.04-0.16	3.4	31	
	0.16-0.27	6.2	27	
Duffy, 1995	2	7	27	-
Cosgrove, 1995	1.5	3.3	38	Muestra saturada
	3	4.3	32	
Bernal et al., 1996	2	0	17-35	17° a 5% de deformación 35° a 20% de deformación
Masad et al., 1996	0.18	70	6	10% de deformación
		71	11	15% de deformación
		82	15	20% de deformación
Cecich et al., 1996	0.2-0.6	7	27	ASTM D3080
Andrews and Guay, 1996	1-2	4	27.5	-
Wu et a., 1997	<0.08	0	45	Rango tensión normal: 35-55 kPa
	<0.37	0	47-60	
	<0.74	0	54	
	<1.5	0	57	
Gebhardt, 1997	1.5-55.1	3	38	5.5-28 kPa psf Criterio de falla peak
	1.5-55.1	0	38	5.5-28 kPa Criterio de falla del 10%

Recuperado de: "Properties of different size scrap tire shreds: Implications on using as drainage material in landfill cover systems", por K. R. Reddy & A. Marella, 2001, Chicago: University of Illinois, p. 11.

De acuerdo con las investigaciones hechas por Humphrey et al (1993), los valores de resistencia al corte se ven principalmente influenciados por la forma irregular que adoptan los NFU's cuando estos son troceados (ver Figura 7), lo que produce una mayor trabazón entre las distintas partículas produciendo un aumento de la fricción interna en este tipo de materiales. Adicionalmente, la mayor presencia de alambres expuestos produce un

aumento en la cohesión, pero estos autores recomiendan que para efectos de diseño este valor sea muy cercano a 0.

De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 8, el ángulo de fricción interna se mueve en general en un rango comprendido entre 15° y 40°, con valores superiores e inferiores a este rango, que puede deberse a condiciones particulares de los ensayos ejecutados, mientras que el valor de la cohesión se mueve en un rango comprendido entre 0 y 82 kPa. Otro aspecto importante para destacar es que el ángulo de fricción interna aumenta con la densidad que alcanza el material y con la tensión de confinamiento aplicada, lo que permite inferir que, aunque la variación de la densidad por efecto de la compactación de los NFU's no sea importante, si permite mejorar la resistencia al corte del material.

Para los NFU's que son utilizados como sistemas de balas, Freilich & Zornberg (2009) reportan resultados de parámetros de resistencia al corte de acuerdo con lo presentado en la Tabla 9. Estos resultados han sido obtenidos mediante ensayos ejecutados en equipos como el mostrado en la Figura 15, donde se simula un ensayo de corte directo de gran escala y se evalúa el ángulo de fricción interna y cohesión en un plano determinado de falla.

Tabla 9. Parámetros de resistencia al corte para NFU's en balas

Referencia	c (kPa)	ϕ (°)
Simm et al (2004)	0	35
Zornberg et al (2005)	2.4	25-30
LaRocque (2005)	1.4	36

Fuente: "Mechanical properties of tires bales for highway applications", por B. Freilich & J. G, Zornberg, 2009, p. 7.

Los resultados obtenidos permiten determinar que el ángulo de fricción interna de las partículas se mueve en un rango comprendido entre 25° y 36° , mientras que la cohesión alcanza valores bajos, en un rango comprendido entre 0 y 2.4 kPa.

4. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE RELLENOS CONFORMADOS POR NFU´s

Con el propósito de evaluar la aplicabilidad de los NFU´s como material de relleno en obras de terraplén, se ha llevado a cabo un análisis de estabilidad mediante la aplicación de modelos de equilibrio límite, a través del software GSlope versión estudiantil, como una primera aproximación para estudiar el comportamiento geotécnico de estas obras.

Para propósitos de esta investigación, se han definido dos modelos a estudiar, sobre la base de los antecedentes presentados en los capítulos anteriores, correspondientes a:

- Relleno conformado por NFU´s troceados.
- Relleno conformado por NFU´s en balas.

Para cada uno de estos modelos, los análisis efectuados han considerado las siguientes variables:

- Ángulo de talud del relleno H:V de 1:1 y 2:1.
- Ambos modelos consideran el uso de material de relleno (suelo) en espaldones y coronamiento.
- 1 y 2 capas de relleno intermedia, conformadas por suelo de las mismas características del empleado en espaldones y coronamiento.
- Altura de rellenos de NFU´s variable y correspondientes a 2, 3 y 4 m de altura (relleno con NFU´s dispuesto en el (o los) núcleo(s) del terraplén).

La Figura 17 presenta un ejemplo de terraplén en el que puede ser aplicado el uso de NFU´s como material de relleno.



Figura 17. Ejemplo de relleno (terraplén) para la aplicación de NFU's
Los análisis de estabilidad han sido desarrollados tanto para condiciones estáticas como pseudo- estáticas, aplicando el modelo de Morgenstern & Price.

4.1. Normativa aplicable para el uso de NFU's en rellenos

Actualmente el uso de neumáticos en obras de ingeniería se rige por la norma ASTM D 6270 – 98 (2004): “Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications”. En ella se detallan recomendaciones sobre la geometría y los parámetros geotécnicos óptimos para ser utilizados. Esta norma se enfoca principalmente en el uso de NFU's troceados para obras de ingeniería.

Dentro de las principales recomendaciones que entrega la ASTM D 6270-98 se encuentran las siguientes:

- 1- Se considera un espesor de núcleo de NFU's máximo de 3 m. Tomando como base experiencias de terraplenes ya construidos con estos espesores, donde no se ha evidenciado un calentamiento perjudicial para la obra, efecto causado principalmente por la oxidación del acero y/o caucho.
- 2- El coronamiento del terraplén, el cual será considerado apto para tráfico, debe poseer un espesor entre 1 y 2 m, con el propósito de evitar tanto las deflexiones del pavimento como también el contacto con la superficie de alambres de acero expuestos tras el proceso de trituración (si aplica). Para los modelos propuestos, el espesor de la coronación se ha considerado de 1 m.
- 3- Con respecto al tamaño de los trozos de neumáticos triturados, estos deben tener máximo un 25% (en peso) pasando por el tamiz de 38 mm y máximo un 1% (en peso) pasando por el tamiz 4,75mm. Se consideran estos porcentajes, ya que la presencia excesiva de trozos de caucho muy pequeños favorece el calentamiento de la obra.
- 4- Con respecto a los trozos de metal expuestos luego del proceso de triturado de los neumáticos, estos no deben sobresalir más de 25 mm del borde en el 75% en los trozos ni más de 50 mm en el 100% de ellos.
- 5- Es importante procurar que los neumáticos utilizados estén libres de contaminantes, de lo contrario estos pueden liberar productos de petróleo líquido causando un incendio al interior de la obra.

4.2. Modelos definidos para los análisis de estabilidad

Modelo 1: este modelo considera una sola capa de NFU's en el núcleo del terraplén, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 18. El suelo de fundación se ha definido como material competente y no deformable, y en el entorno del núcleo de NFU's se ha considerado la colocación de suelo compactado, tanto para la zona de espaldones como coronamiento, con un espesor de 1 m en todos los casos.



Figura 18. Modelo 1 – 1 capa de relleno

Para este primer modelo, los análisis efectuados en términos de geometría y del núcleo de NFU's, ha considerado los siguientes:

- Talud 1:1 con un relleno de NFU's de 4 m de altura.
- Talud 1:1 con un relleno de NFU's de 3 m de altura.
- Talud 1:1 con un relleno de NFU's de 2 m de altura.
- Talud 2:1 con un relleno de NFU's de 4 m de altura.
- Talud 2:1 con un relleno de NFU's de 3 m de altura.
- Talud 2:1 con un relleno de NFU's de 2 m de altura.

Modelo 2: este modelo considera dos capas de NFU's en el núcleo del terraplén, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 19. El suelo de fundación se ha definido como material competente y no deformable, y en el entorno del núcleo de NFU's se ha considerado la colocación de suelo compactado, tanto para la zona de espaldones como coronamiento, con un espesor de 1 m en todos los casos.

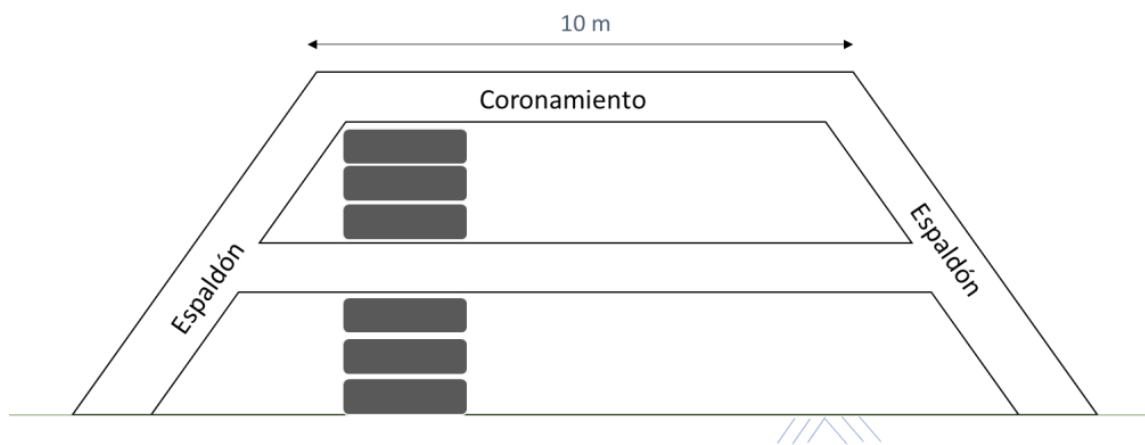


Figura 19. Modelo 2 – 2 capas de relleno

Para este segundo modelo, los análisis efectuados en términos de geometría y del núcleo de NFU's, ha considerado los siguientes:

- Talud 1:1 con dos capas de NFU's de 3 m de altura cada una.
- Talud 1:1 con dos capas de NFU's de 2 m de altura cada una.
- Talud 1:1 con una capa inferior de 3 m y una capa superior de 2 m de altura.
- Talud 2:1 con dos capas de NFU's de 3 m de altura cada una.
- Talud 2:1 con dos capas de NFU's de 2 m de altura cada una.
- Talud 2:1 con una capa inferior de 3 m y una capa superior de 2 m de altura.

Para ambos modelos no se ha considerado la presencia de nivel freático al interior del relleno ni en la fundación de cada modelo.

4.3. Evaluación de la estabilidad del relleno mediante el uso de NFU's

Para evaluar la estabilidad de los diferentes modelos y geometrías definidos en la sección anterior, se ha utilizado el programa Slope/W versión estudiantil de Geostudio 2021 R2, el cuál desarrolla análisis basados en las teorías de equilibrio límite. Todos los análisis que han sido llevados a cabo como parte de este trabajo, fueron desarrollados mediante el método de Morgenstern & Price.

En base a lo presentado en los capítulos anteriores, la Tabla 10 presenta un resumen de los parámetros geotécnicos que han sido definidos para los distintos materiales utilizados en los análisis de estabilidad en ambos modelos, considerando para ello suelo para la construcción de espaldones y coronamiento, NFU's troceados y NFU's en balas. El suelo de fundación se consideró de elevada resistencia respecto a los otros materiales (identificado como Bedrock en Slope/W), dada las limitaciones que presenta el software en su versión estudiantil.

Tabla 10. Parámetros geotécnicos del terraplén

Parámetro Relleno	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (°)
Coronamiento y espaldón	18,5	5,0	35,0
NFU's en balas	8,0	1,5	36,0
NFU's troceados	7,1	2,4	24,6

Para cada modelo de terraplén se han realizado los siguientes cuatro (4) análisis:

- Estático sin sobrecarga
- Estático con sobrecarga
- Pseudo-estático sin sobrecarga
- Pseudo-estático con sobrecarga

Para simular una sobrecarga por tránsito sobre el terraplén, se han establecido 3 cargas de trabajo que se han impuesto tanto para los análisis estáticos como pseudo-estáticos, correspondientes a 20kPa, 35kPa y 50kPa, las cuales representan vehículos de diferentes cargas que podrían transitar por sobre el terraplén.

En cuanto a los criterios utilizados para los análisis de estabilidad, basados en los métodos de equilibrio límite, de la literatura geotécnica se han obtenido los factores de seguridad (FS) tanto para condiciones estáticas como pseudo-estática, los cuales se presentan en la Tabla 11. Tomando en consideración los FS presentados en esta tabla, se han adoptado los siguientes para los análisis de estabilidad presentados en el siguiente trabajo:

- FS estático > 1.5
- FS pseudo-estático mín > 1.0

- FS pseudo-estático máx > 1.2 (criterio utilizado habitualmente en Chile para análisis de estabilidad de taludes)

Tabla 11. Factores de seguridad utilizados para análisis de estabilidad de taludes

Referencia	FS estático	FS pseudo-estático
DM-7.01 (1986) y DM-7.02 (1987)	1.5	1.2-1.15
Torres Vila (1986)	1.5	-
Alva e Infantes (2001)	-	>1
Abramson et al. (2002)	-	>1
FHWA-NHI-11-032 (2011)	-	1.1
NC-856:2011 (2011)	1.5	-
CE-020 (2012)	1.5	1.25
AASHTO-LRFD (2014)	1.33-1.53	1.1

Fuente: “Evaluación del factor de seguridad en taludes de terraplenes carreteros altos ante carga sísmica”, por M. Mesa Lavista, J. Álvarez Pérez, J. H. Chávez Gómez, 2020, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 103, p. 3.

Finalmente, para los análisis de estabilidad pseudo-estáticos se ha definido un coeficiente sísmico horizontal obtenido a partir de las definiciones establecidas en la normativa chilena NCh 433 Diseño Sísmico de Edificios y el Manual de Carreteras V3 Instrucciones y Criterios de Diseño, donde se establece que para un primer análisis se puede utilizar un coeficiente sísmico correspondiente a

$$k_h = 0.5A'_o$$

Donde A'_o representa el coeficiente máximo efectivo de aceleración, el cual depende de la zona sísmica y que para efectos de este estudio, se ha adoptado una zona sísmica 2, con lo cual el coeficiente sísmico horizontal utilizado en los análisis pseudo-estáticos ha sido de $k_h = 0.15$.

4.4. Resultados obtenidos

A continuación, se presenta un resumen de los análisis realizados para los diferentes modelos, indicando en cada uno de ellos el FS obtenido, en función de la altura total del relleno. El detalle de los resultados se presenta en el Anexo A. Las alturas de 3, 4 y 5 m para todos los casos, representan los resultados obtenidos para el Modelo 1, mientras que las alturas 6, 7 y 8 m representan los resultados obtenidos para el Modelo 2.

4.4.1. Relleno de balas de NFU's

De las imágenes que se presentan a continuación, podemos ver como se refleja el mecanismo de falla en los diferentes taludes. Dado que estamos considerando una base de rocas bajo el terraplén, este tiene un carácter superficial.

Esta falla, para todos los modelos, no solo abarca el espaldón sino que también una parte del núcleo de NFU's.

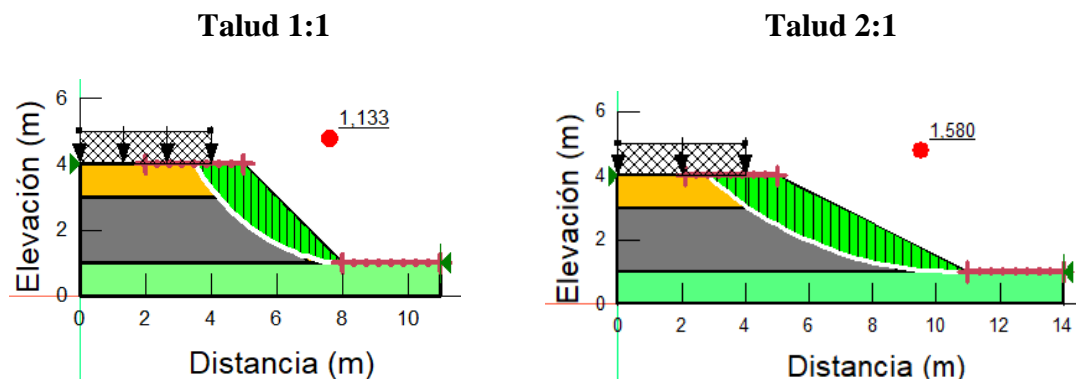


Figura 20: Análisis pseudo-estático con 35kPa de sobrecarga para balas de NFU's

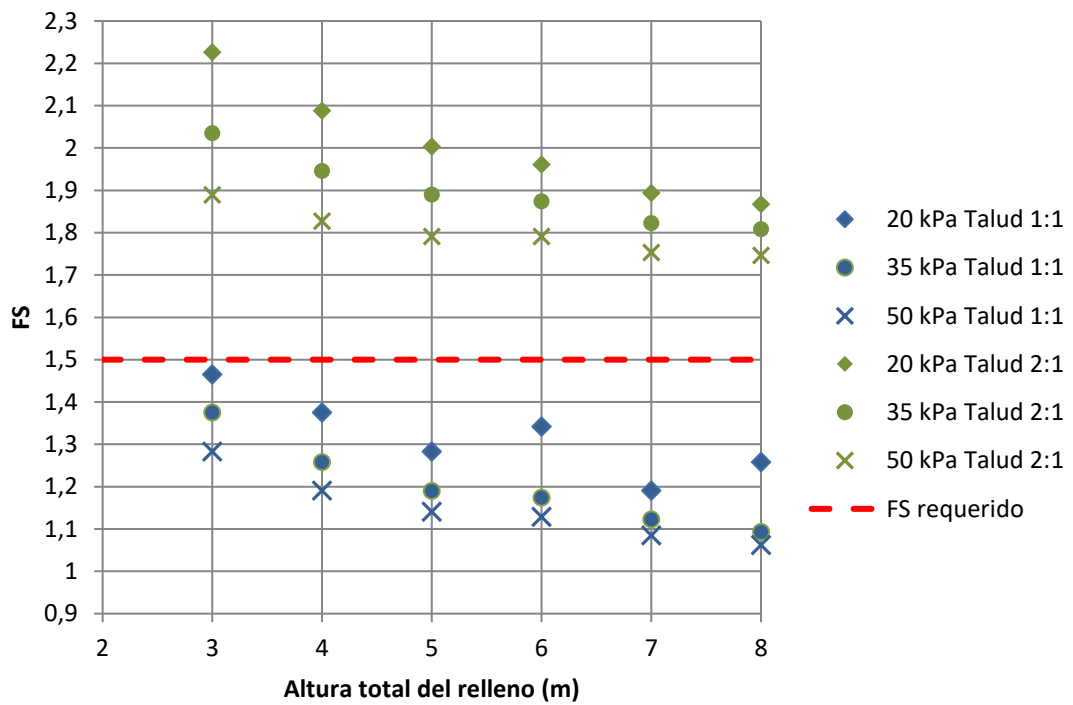


Figura 21: Análisis estático con carga para relleno de balas de NFU's

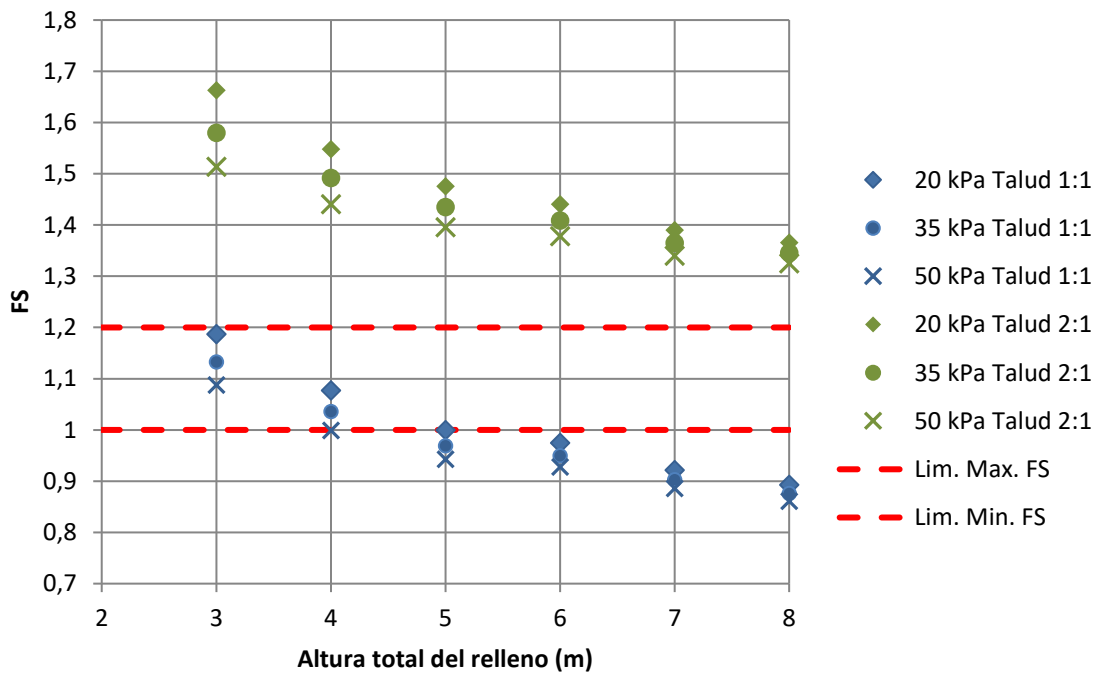


Figura 22. Análisis pseudo-estático con carga para relleno de balas de NFU's

Para los análisis pseudo-estáticos correspondiente a los NFU's en balas, se puede concluir lo siguiente:

- Para un FS > 1.2, para todos los casos analizados con carga, el relleno con un talud H:V de 2:1 cumple con el FS mínimo requerido.
- Para el caso del talud H:V = 1:1, solo se cumple un FS pseudo-estático > 1.2 para el caso de un relleno de altura total de 3 m, el cual considera un relleno de NFU's en balas en el núcleo del terraplén de 2 m.
- Si adoptamos como criterio un FS > 1.0, se tiene lo siguiente:
 - El FS > 1.0 se cumple para rellenos de 3 a 8 m cuando se tiene un talud H:V de 2:1, para todos los casos analizados con sobrecarga.
 - Para el caso de relleno con carga, el FS > 1.0 se cumple para alturas de 3 m para cualquier carga aplicada y para rellenos de 4 m de altura, con una carga máxima de 35 kPa, cuando el talud es 1:1.
 - Para alturas de terraplén mayores o iguales a 5 m, se obtiene un FS ≤ 1.0 para un talud de 1:1.

Los resultados de todos los análisis realizados a los terraplenes con relleno de NFU's en balas se encuentran reflejados en la Tabla 12, donde se encuentran los FS de análisis estáticos y pseudo-estáticos, así como también las diferentes sobrecargas que se les aplicaron a los diferentes modelos.

Tabla 12: Resumen de los FS obtenidos para rellenos con balas de NFU's

Modelo	Diseño	Talud	Carga (kPa)	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Phi (°)	FS	
							Estático	Pseudo-estático
1	Relleno 2m	1:1	0	8	1,5	36	1,54	1,24
1	Relleno 2m	1:1	20	8	1,5	36	1,47	1,19
1	Relleno 2m	1:1	35	8	1,5	36	1,38	1,13
1	Relleno 2m	1:1	50	8	1,5	36	1,28	1,09
1	Relleno 2m	2:1	0	8	1,5	36	2,44	1,77

Modelo	Diseño	Talud	Carga (kPa)	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Phi (°)	FS	
							Estático	Pseudo - estático
1	Relleno 2m	2:1	20	8	1,5	36	2,23	1,66
1	Relleno 2m	2:1	35	8	1,5	36	2,04	1,58
1	Relleno 2m	2:1	50	8	1,5	36	1,89	1,51
1	Relleno 3m	1:1	0	8	1,5	36	1,37	1,10
1	Relleno 3m	1:1	20	8	1,5	36	1,34	1,08
1	Relleno 3m	1:1	35	8	1,5	36	1,26	1,04
1	Relleno 3m	1:1	50	8	1,5	36	1,19	1,00
1	Relleno 3m	2:1	0	8	1,5	36	2,22	1,61
1	Relleno 3m	2:1	20	8	1,5	36	2,09	1,55
1	Relleno 3m	2:1	35	8	1,5	36	1,95	1,49
1	Relleno 3m	2:1	50	8	1,5	36	1,83	1,44
1	Relleno 4m	1:1	0	8	1,5	36	1,27	1,01
1	Relleno 4m	1:1	20	8	1,5	36	1,25	1,00
1	Relleno 4m	1:1	35	8	1,5	36	1,19	0,97
1	Relleno 4m	1:1	50	8	1,5	36	1,14	0,94
1	Relleno 4m	2:1	0	8	1,5	36	2,08	1,51
1	Relleno 4m	2:1	20	8	1,5	36	2,00	1,48
1	Relleno 4m	2:1	35	8	1,5	36	1,89	1,44
1	Relleno 4m	2:1	50	8	1,5	36	1,79	1,40

Modelo	Diseño	Talud	Carga (kPa)	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Phi (°)	FS	
							Estático	Pseudo - estático
2	Relleno 2m doble	1:1	0	8	1,5	36	1,23	0,98
2	Relleno 2m doble	1:1	20	8	1,5	36	1,22	0,98
2	Relleno 2m doble	1:1	35	8	1,5	36	1,17	0,95
2	Relleno 2m doble	1:1	50	8	1,5	36	1,13	0,93
2	Relleno 2m doble	2:1	0	8	1,5	36	2,02	1,46
2	Relleno 2m doble	2:1	20	8	1,5	36	1,96	1,44
2	Relleno 2m doble	2:1	35	8	1,5	36	1,87	1,41
2	Relleno 2m doble	2:1	50	8	1,5	36	1,79	1,38
2	Relleno 3m doble	1:1	0	8	1,5	36	1,13	0,90
2	Relleno 3m doble	1:1	20	8	1,5	36	1,13	0,89
2	Relleno 3m doble	1:1	35	8	1,5	36	1,09	0,88
2	Relleno 3m doble	1:1	50	8	1,5	36	1,06	0,86
2	Relleno 3m doble	2:1	0	8	1,5	36	1,90	1,38
2	Relleno 3m doble	2:1	20	8	1,5	36	1,87	1,37
2	Relleno 3m doble	2:1	35	8	1,5	36	1,81	1,35
2	Relleno 3m doble	2:1	50	8	1,5	36	1,75	1,33
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	0	8	1,5	36	1,17	0,86
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	20	8	1,5	36	1,16	0,92

Modelo	Diseño	Talud	Carga (kPa)	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Phi (°)	FS	
							Estático	Pseudo - estático
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	35	8	1,5	36	1,12	0,90
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	50	8	1,5	36	1,09	0,89
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	0	8	1,5	36	1,94	1,41
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	20	8	1,5	36	1,89	1,39
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	35	8	1,5	36	1,82	1,37
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	50	8	1,5	36	1,75	1,34

4.4.2. Relleno de NFU's troceados

A diferencia de los rellenos con balas, podemos notar que en los casos más críticos para rellenos con NFU's troceados, si el terraplén estuviese fundado sobre suelo y no sobre roca, la falla sería de carácter profundo y pasaría por debajo del terraplén.

Además, para el caso de los NFU's troceados, el mecanismo de falla abarca en mayor porcentaje el núcleo de NFU's, y en mayor cantidad aún a aquellos taludes de razón 2:1.

Talud 1:1

Talud 2:1

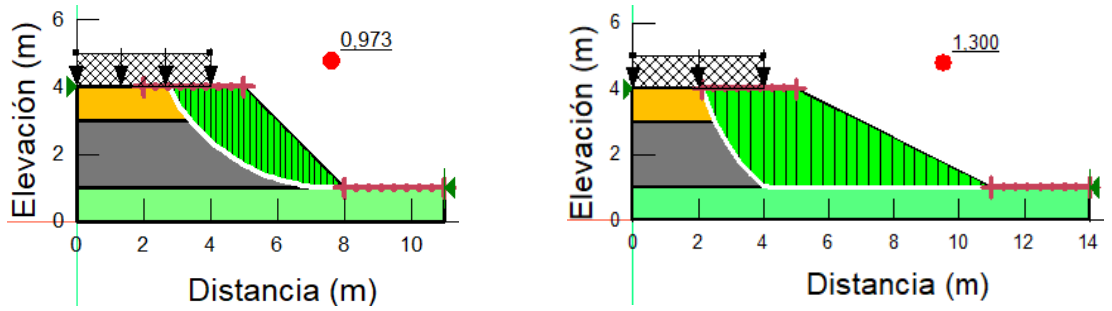


Figura 23: Análisis pseudo-estático con 35 kPa de sobrecarga para NFU's troceados

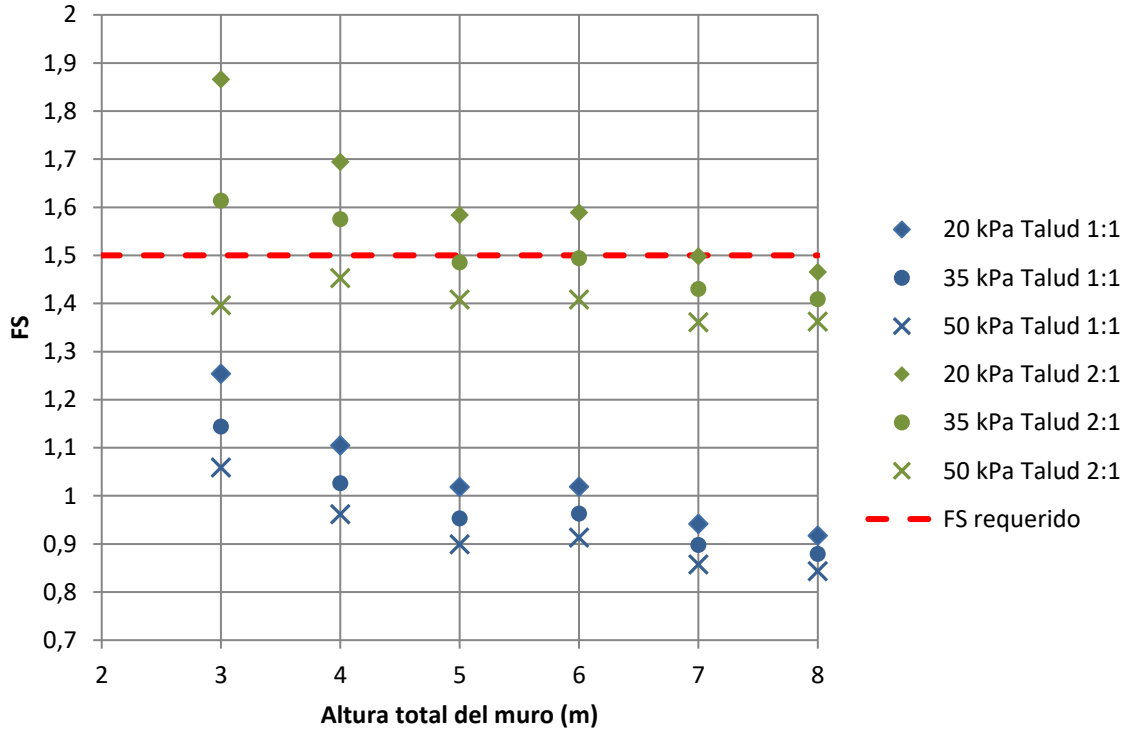


Figura 24: Análisis estático con carga para relleno de NFU's troceados

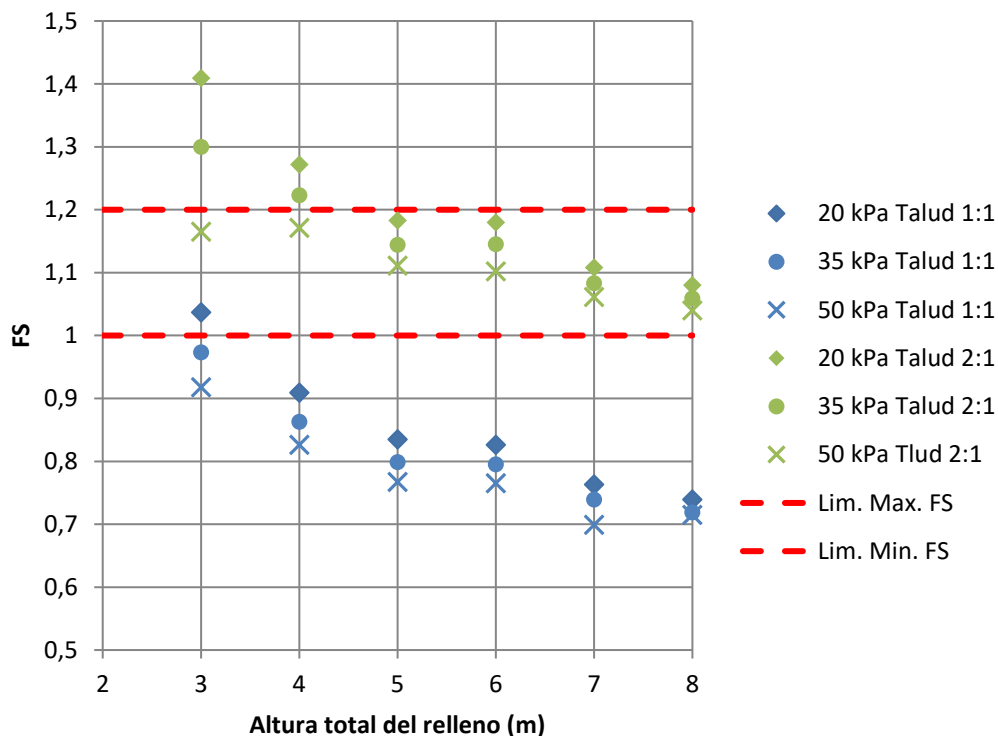


Figura 25. Análisis pseudo-estático con carga para relleno de NFU's troceados

Para los análisis pseudo-estáticos correspondiente a los NFU's troceados, se puede concluir lo siguiente:

- Para un $FS > 1.2$ y talud $H:V = 2:1$, se tiene lo siguiente:
 - Para rellenos con sobrecarga, el $FS > 1.2$ se cumple para alturas de 3 y 4 m cuando estas alcanzan un valor máximo de 35 kPa.
 - Para sobrecargas mayores a 35 kPa y alturas mayores a 5 m de altura, el $FS > 1.2$ no se cumple.
- Para el caso del talud $H:V = 1:1$, en ninguno de los casos analizados con sobrecarga, el FS pseudo-estático se cumple.
- Si adoptamos como criterio un $FS > 1.0$, se tiene lo siguiente:
 - El $FS > 1.0$ se cumple para rellenos de 3 a 8 m cuando se tiene un talud $H:V$ de 2:1, para todos los casos analizados con sobrecarga.
 - Para el caso de rellenos con talud $H:V = 1:1$, el $FS > 1.0$ se cumple para alturas de 3 m y con una sobrecarga máxima de 20 kPa.

- Para alturas mayores a 4 m y sobrecargas de 35 kPa y mayores, se obtiene un $FS \leq 1.0$ para un talud de 1:1

Los FS para los análisis estáticos y pseudo-estáticos, con y sin sobrecarga aplicada para terraplenes rellenos con NFU's troceados se encuentran resumidos en la Tabla 13.

Tabla 13: Resumen de los FS obtenidos para rellenos con NFU's troceados

Modelo	Diseño	Talud	Carga (kPa)	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Phi (°)	FS	
							Estático	Pseudo - estático
1	Relleno 2m	1:1	0	7,1	2,4	24,6	1,38	1,11
1	Relleno 2m	1:1	20	7,1	2,4	24,6	1,25	1,04
1	Relleno 2m	1:1	35	7,1	2,4	24,6	1,14	0,97
1	Relleno 2m	1:1	50	7,1	2,4	24,6	1,06	0,92
1	Relleno 2m	2:1	0	7,1	2,4	24,6	2,07	1,54
1	Relleno 2m	2:1	20	7,1	2,4	24,6	1,87	1,41
1	Relleno 2m	2:1	35	7,1	2,4	24,6	1,61	1,30
1	Relleno 2m	2:1	50	7,1	2,4	24,6	1,40	1,17
1	Relleno 3m	1:1	0	7,1	2,4	24,6	1,19	0,97
1	Relleno 3m	1:1	20	7,1	2,4	24,6	1,11	0,91
1	Relleno 3m	1:1	35	7,1	2,4	24,6	1,03	0,86
1	Relleno 3m	1:1	50	7,1	2,4	24,6	0,96	0,83
1	Relleno 3m	2:1	0	7,1	2,4	24,6	1,85	1,35
1	Relleno 3m	2:1	20	7,1	2,4	24,6	1,69	1,27
1	Relleno 3m	2:1	35	7,1	2,4	24,6	1,58	1,22
1	Relleno 3m	2:1	50	7,1	2,4	24,6	1,45	1,17
1	Relleno 4m	1:1	0	7,1	2,4	24,6	1,08	0,88
1	Relleno 4m	1:1	20	7,1	2,4	24,6	1,02	0,84
1	Relleno 4m	1:1	35	7,1	2,4	24,6	0,95	0,80
1	Relleno 4m	1:1	50	7,1	2,4	24,6	0,90	0,77
1	Relleno 4m	2:1	0	7,1	2,4	24,6	1,71	1,24
1	Relleno 4m	2:1	20	7,1	2,4	24,6	1,58	1,18
1	Relleno 4m	2:1	35	7,1	2,4	24,6	1,49	1,14
1	Relleno 4m	2:1	50	7,1	2,4	24,6	1,41	1,11
2	Relleno 2m doble	1:1	0	7,1	2,4	24,6	1,05	0,86
2	Relleno 2m doble	1:1	20	7,1	2,4	24,6	1,02	0,83

Modelo	Diseño	Talud	Carga (kPa)	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Phi (°)	FS	
							Estático	Pseudo - estático
2	Relleno 2m doble	1:1	35	7,1	2,4	24,6	0,96	0,80
2	Relleno 2m doble	1:1	50	7,1	2,4	24,6	0,91	0,77
2	Relleno 2m doble	2:1	0	7,1	2,4	24,6	1,62	1,20
2	Relleno 2m doble	2:1	20	7,1	2,4	24,6	1,59	1,18
2	Relleno 2m doble	2:1	35	7,1	2,4	24,6	1,49	1,15
2	Relleno 2m doble	2:1	50	7,1	2,4	24,6	1,41	1,10
2	Relleno 3m doble	1:1	0	7,1	2,4	24,6	0,95	0,76
2	Relleno 3m doble	1:1	20	7,1	2,4	24,6	0,92	0,74
2	Relleno 3m doble	1:1	35	7,1	2,4	24,6	0,88	0,72
2	Relleno 3m doble	1:1	50	7,1	2,4	24,6	0,84	0,70
2	Relleno 3m doble	2:1	0	7,1	2,4	24,6	1,50	1,11
2	Relleno 3m doble	2:1	20	7,1	2,4	24,6	1,47	1,08
2	Relleno 3m doble	2:1	35	7,1	2,4	24,6	1,41	1,06
2	Relleno 3m doble	2:1	50	7,1	2,4	24,6	1,36	1,04
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	0	7,1	2,4	24,6	0,98	0,79
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	20	7,1	2,4	24,6	0,94	0,76
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	35	7,1	2,4	24,6	0,90	0,74
2	Relleno 3m inf- 2m sup	1:1	50	7,1	2,4	24,6	0,86	0,72
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	0	7,1	2,4	24,6	1,53	1,14

Modelo	Diseño	Talud	Carga (kPa)	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Phi (°)	FS	
							Estático	Pseudo - estático
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	20	7,1	2,4	24,6	1,50	1,11
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	35	7,1	2,4	24,6	1,43	1,08
2	Relleno 3m inf- 2m sup	2:1	50	7,1	2,4	24,6	1,36	1,06

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

La utilización de NFU's como material de relleno para obras de terraplén se presenta como una alternativa viable a tener en consideración debido a las características geotécnicas que estos presentan, tanto troceados como en balas, donde se destacan cualidades geotécnicas como su baja densidad y su buena resistencia al esfuerzo cortante, de acuerdo con lo presentado en la literatura que ha sido investigada para el desarrollo de este trabajo.

Adicionalmente y dados los volúmenes que involucra la construcción de rellenos, el uso de NFU's en este tipo de obras se convierte en una alternativa ambientalmente viable, lo que permitiría reducir la cantidad de neumáticos que hoy terminan en depositados no controlados (vertederos ilegales) y cubrir los compromisos establecidos en la Ley REP, según las proyecciones establecidas en ella hasta el año 2028. Esta nueva opción de valorización de los NFU's debe seguir siendo estudiada para confirmar los análisis presentados en este trabajo.

Considerar la utilización de NFU's como relleno de terraplenes significa un aporte importante a la reducción de la contaminación, ya que los volúmenes que se requieren para su construcción son considerablemente mayores a otras alternativas de valorización actualmente existentes, en especial en aplicaciones de ingeniería civil.

En cuanto a la estabilidad de rellenos mediante el uso de NFU's en balas, se puede indicar lo siguiente:

- Para todos los casos analizados, con y sin carga, el relleno con un talud H:V de 2:1 cumple con los FS mínimo requeridos, tanto para condiciones estáticas como pseudo-estáticas.

- Para el caso del talud $H:V = 1:1$, los FS en condiciones estáticas y pseudo-estáticas mayor a 1.2, se cumplen para un relleno de altura total de 3 m, el cual considera un relleno de NFU's en balas en el núcleo del terraplén de 2 m. Esta condición mejora cuando el FS pseudo-estático es mayor a 1.0, para rellenos de 4 m de altura y con una carga máxima de 35 kPa.
- Para alturas de terraplén mayores o iguales a 5 m, en general el FS es ≤ 1.0 para un talud de 1:1.

Para el caso de rellenos con NFU's troceados, el análisis de estabilidad ha permitido establecer las siguientes conclusiones:

- Para rellenos con talud $H:V = 2:1$, el FS en condiciones estáticas se cumple cuando la altura del relleno es menor o igual a 7 m de altura cuando no existe sobrecarga, y menor o igual a 4 m cuando la sobrecarga es de 35 kPa o menos. Además, cuando la sobrecarga es de 20 kPa, la altura del muro puede alcanzar 6 m de altura.
- Para todos los casos analizados, con y sin sobrecarga, el $FS > 1.5$ no se cumple cuando el talud $H:V$ es 1:1. Además, en todos los casos analizados, cuando la sobrecarga es de 50 kPa, el FS mínimo requerido para el caso estático, no se cumple.
- Para los análisis pseudo-estáticos considerando un $FS > 1.2$ y un talud $H:V$ de 2:1, esta condición se alcanza para rellenos sin sobrecarga con alturas menores e iguales a 5 m, y como máximo de 4 m cuando la sobrecarga es menor o igual a 35 kPa. Con sobrecargas mayores, el FS no se cumple. Si el FS se considera mayor a 1.0, para un talud de 2:1 se cumple esta condición para los casos con y sin sobrecarga hasta una altura total de 8 m para el relleno conformado con NFU's troceados.
- Para el caso del talud $H:V = 1:1$, en ninguno de los casos analizados (con y sin sobrecarga), el FS pseudo-estático se cumple.

Además de lo anterior, podemos notar que para el estudio de rellenos de NFU's mediante el sistema de balas se obtuvieron FS más altos que para el caso de un relleno de NFU's troceados, por lo cual se ve como una opción técnicamente viable como alternativa de valorización. Sin embargo, los resultados de estabilidad mediante el uso de NFU's en balas deben ser tomados con precaución, dado que los antecedentes encontrados en la

literatura especializada son menores a aquellos encontrados para NFU's troceados, por lo que se recomienda hacer estudios de laboratorio y pruebas a escala real adicionales para validar los parámetros geotécnicos con los que se cuentan actualmente para esta opción. Se recomienda por lo tanto como una alternativa de valorización de NFU's el uso de este producto como troceados, debido a que se cuenta con información más detallada de caracterización geotécnica y experiencias previas del uso de este material en obras de relleno tipo terraplén. Tomando en consideración los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad, se recomienda además la implementación de esta solución en rellenos con taludes H:V de 2:1 y con altura total de relleno de 4 m para una sobrecarga máxima de 35 kPa y de hasta 6 m para sobrecarga máxima de 20 kPa.

Dada la posibilidad que presenta el uso de NFU's en aplicaciones geotécnicas, se identifican algunas futuras investigaciones que permitirán mejorar el conocimiento actual de esta técnica, orientadas a:

- Realizar estudios de laboratorio con NFU's en balas y/o troceados para llevar a cabo una caracterización geotécnica complementaria a los resultados presentados en la literatura técnica, incluyendo estudios de la rigidez a pequeñas deformaciones (G_{max}) y curvas de degradación de rigidez G/G_{max} y amortiguamiento vs deformación al corte en ensayos de corte cíclico.
- Evaluación de estabilidad estático y pseudo-estáticos para otras configuraciones de relleno estudiadas en este trabajo y realizando un análisis de sensibilidad para el coeficiente sísmico horizontal.
- Desarrollar un análisis de deformaciones internas y deformaciones residuales para rellenos conformados con NFU's troceados, para complementar los resultados desarrollados mediante las teorías de equilibrio límite.
- Estudiar la resistencia residual de los rellenos conformados con NFU's.
- Evaluar el comportamiento de rellenos de NFU's fundados en suelo y no en roca, ya que esta será la realidad a las que nos veremos enfrentados al momento de

desarrollar este tipo de obras. Caracterizar los mecanismos de colapso en estas condiciones.

- Caracterizar las propiedades dinámicas de los rellenos con NFU's: periodo fundamental del sistema.
- Desarrollar un prototipo a escala real de un relleno con NFU's y llevar a cabo un monitoreo en el tiempo de variables como cargas y asentamientos, mediante instrumentación geotécnica.

6. BIBLIOGRAFIA

- AMPHOS²¹. (2017). Diagnóstico de sustentabilidad de neumáticos fuera de uso (NFU).
- ASTM D6270-2004. Use of scrap tires in civil engineering applications.
- Baker, T., Allen, T., Jenkins, D., Todd Mooney, D., Pierce, L., Christie, R., Weston, J., (2003). Evaluation of the use of scrap tires in transportation related applications in the state of Washington. Washington State: Department of Transportation.
- Bao, C., Basterrexea, A., Castresana, J. M., Loroño, I., Martín, L. (2008). Gestión de la valorización (material y energética) de neumáticos fuera de uso (NFU). I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos Castellón, 23-24 de julio de 2008. España.
- Castro, G. (2008). Materiales y compuestos para la industria del neumático. Argentina: Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A.
- Cecich, V. et al (1996). Use of shredded tires as lightweight backfill material for retaining structures. Waste Management & Research. 433-451.
- CEDEX. (2010). Neumáticos Fuera de uso (NFU).
- CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. 2016. Ley 20.920: Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.
- CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. 2019. Decreto 8: Metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de neumáticos.
- CINC. (2020). Generación de neumáticos fuera de uso.
- CINC. (2013). APL de prevención y valorización de neumáticos fuera de uso.
- Edeskär, T. (2004). Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering applications.
- Edeskär, T. (2006). Use of tyre shreds in civil engineering applications. Doctoral Thesis.

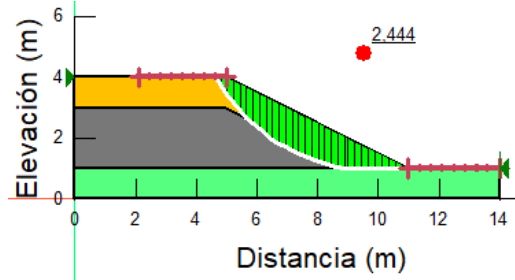
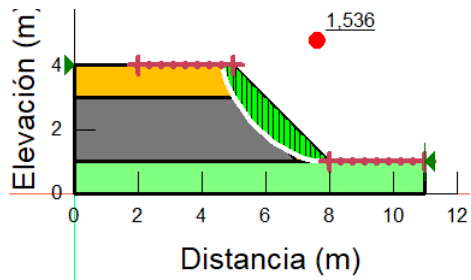
- Freilich, B. & Zornberg, J. G. (2009). Mechanical properties of tires bales for highway applications.
- GESCAM. (2017). Antecedentes para la elaboración de análisis económicos de metas de recolección y valorización para los productos prioritarios neumáticos, baterías y aceites lubricantes, contenidos en la ley 20.920. Chile
- Humphrey, D. et al (1993). Shear strength and compressibility of tire chips for use as retaining wall backfill.
- Humphrey, D. et al (2000). Tire shreds as lightweight fill for construction on weak marine clay. Proceedings of the International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice, (pp: 611-616) Rotterdam, The Netherlands: Balkema.
- Manual de Carreteras (2012). Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile. Volumen 3, Instrucciones y Criterios de Diseño.
- Martínez, Barrera y Gómez (2011). El método pseudoestático de estabilidad en presas: un análisis crítico. Obras y proyectos 9, 30-37.
- Mesa Lavista, M., Tejeda Piusseaut, E. (2017). Análisis de la estabilidad de taludes en terraplenes mediante los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos. Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.
- Mesa Lavista, M., Álvarez Pérez, J., Chávez Gómez, J. H. (2020). Evaluación del factor de seguridad en taludes de terraplenes carreteros altos ante carga sísmica. Revista de Ingeniería Sísmica, No 103, p.3.
- Munuera Martínez, J. (2008) Caracterización del comportamiento mecánico de neumáticos troceados. (Tesina)
- Reddy, K. R. & Marella A. (2001). Properties of different size scrap tire shreds: Implications on using as drainage material in landfill cover systems. Chicago: University of Illinois.
- Salgado, R., Yoon, S & Siddiki, N. (2003). Construction of tire shreds test embankment. West Lafayette: Purdue University

- San Martín Valdor, I. (2009). Caracterización de neumáticos fuera de uso troceados para su reciclado en obra civil (Tesina, Universidad Politécnica de Cataluña).
- Tírel, K. (2017). Ingeniería de perfil de modernas plantas para reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU)
- Zornberg, J. G., Christopher, B. R., Oosterbaan, M. D. (2005). Tire bales in highway applications: feasibility and properties evaluation. Colorado: Department of Transportation.

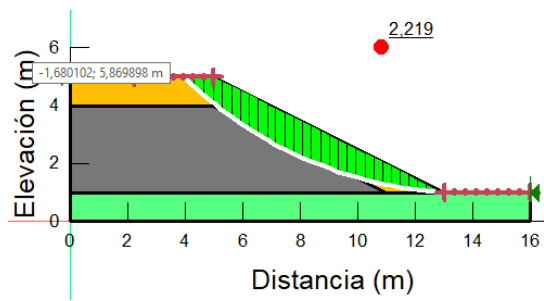
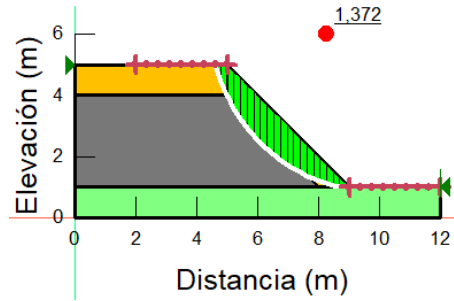
ANEXOS

ANEXO 1: Análisis 1: Estático - Sin sobrecarga para balas de NFU's

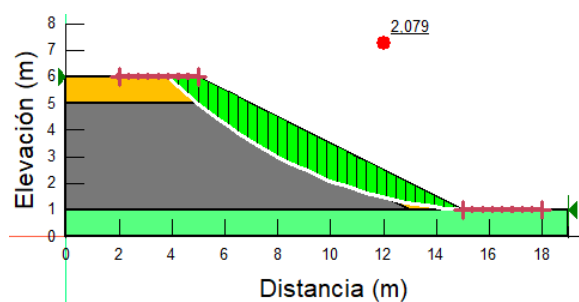
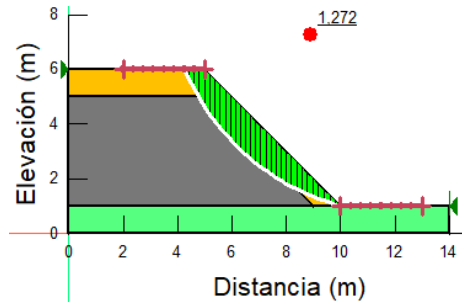
Relleno de 2m de altura



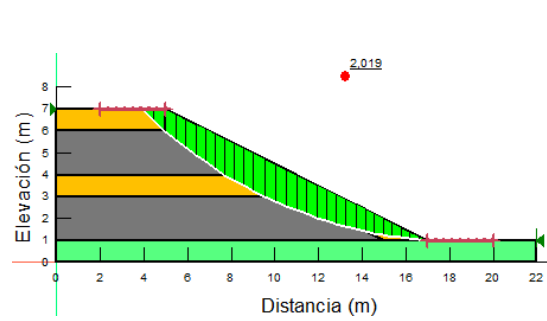
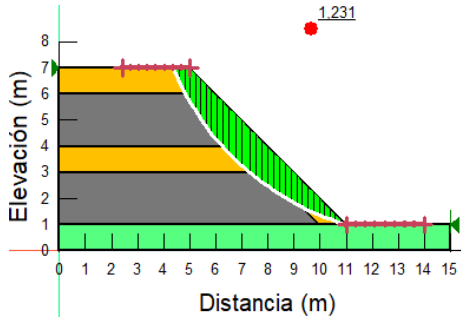
Relleno de 3m de altura



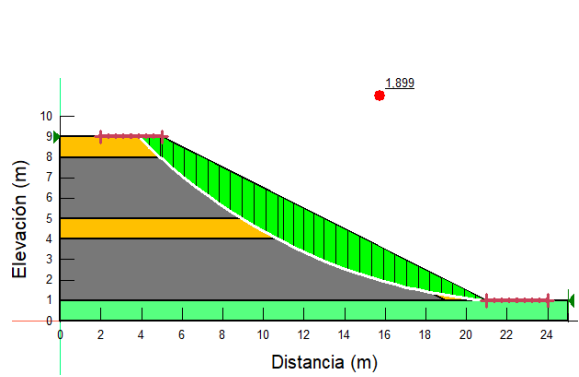
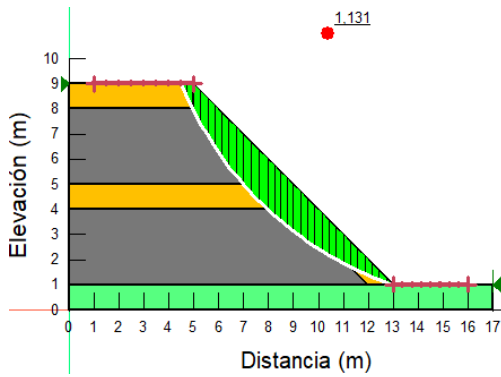
Relleno de 4m de altura



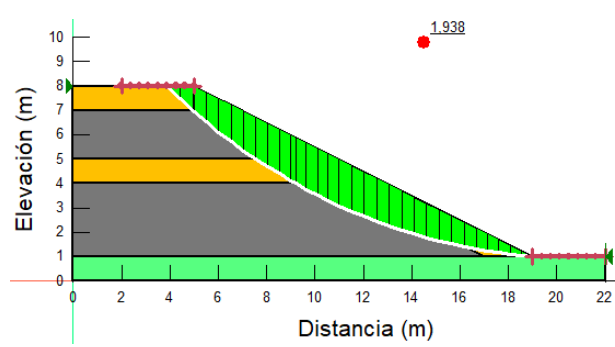
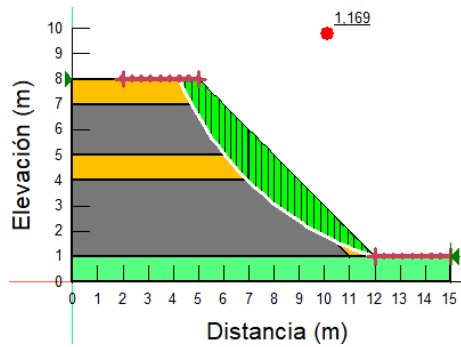
Relleno doble de 2m de altura cada capa



Relleno doble de 3m cada capa



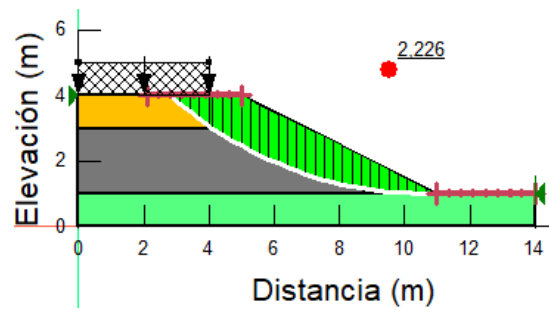
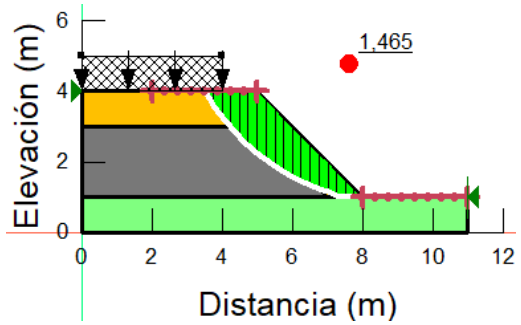
Relleno doble 3m capa inferior - 2m capa superior



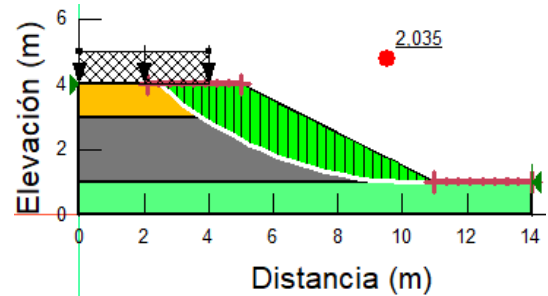
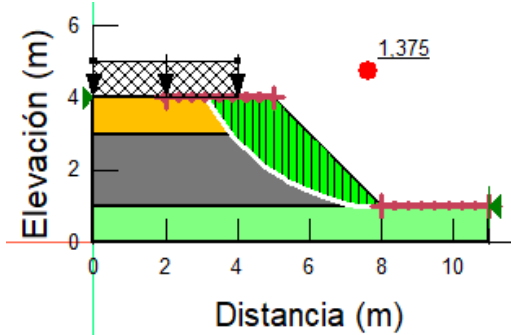
ANEXO 2: Análisis 2: Estático - Con sobrecarga para balas de NFU's

Relleno de 2m de altura

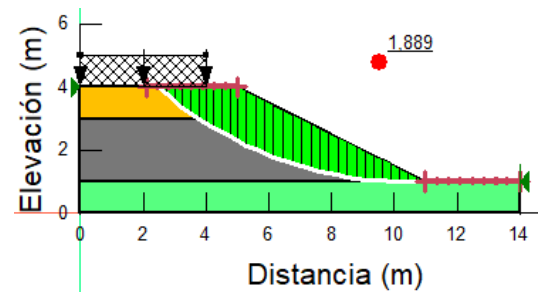
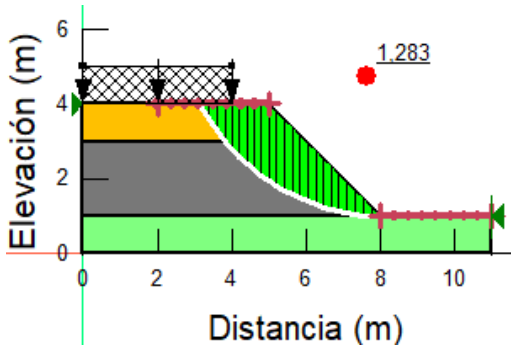
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

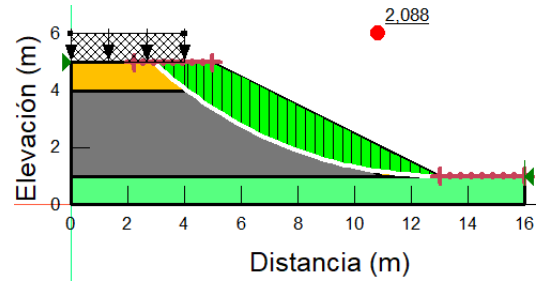
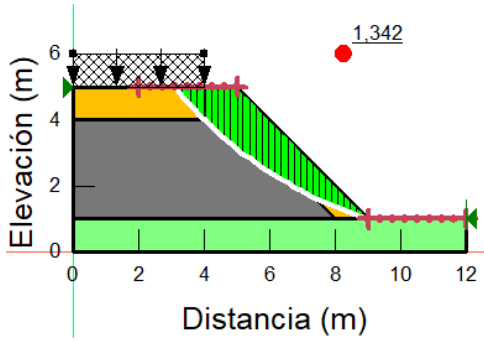


- Carga de 50kPa

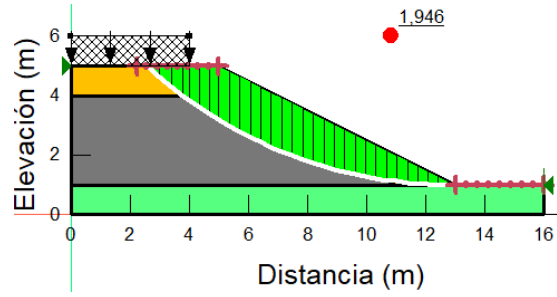
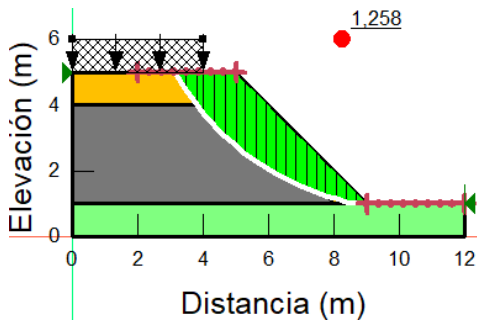


Relleno de 3m de altura

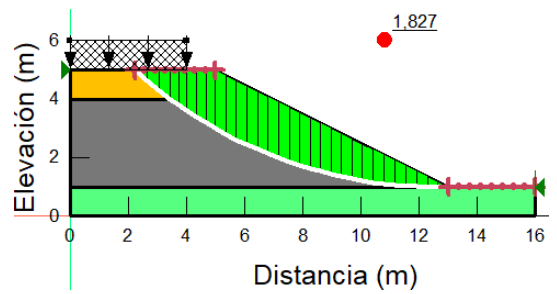
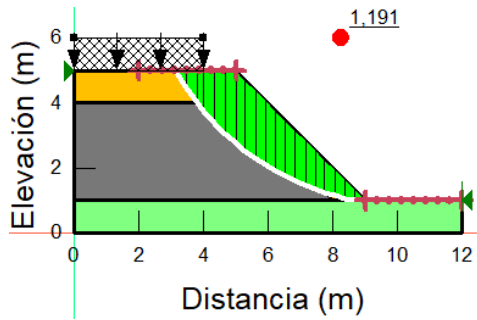
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

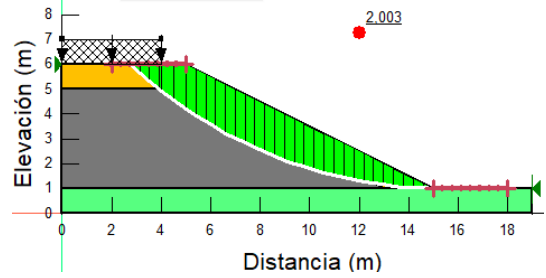
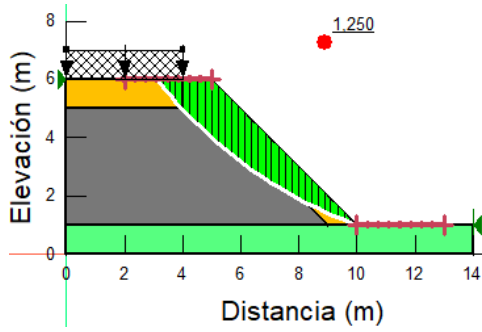


- Carga de 50kPa

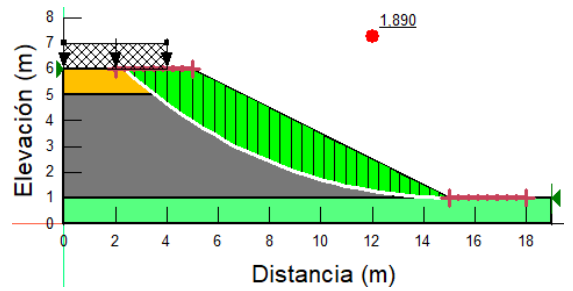
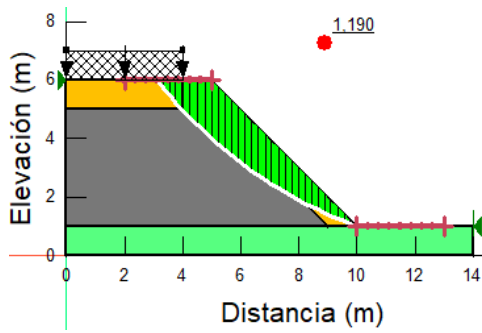


Relleno de 4m de altura

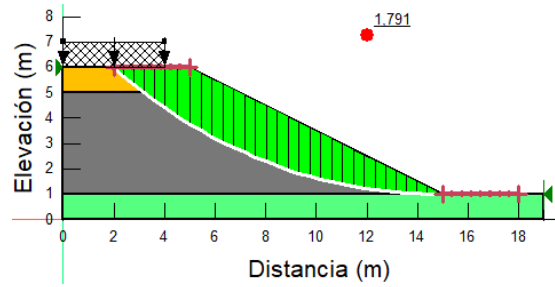
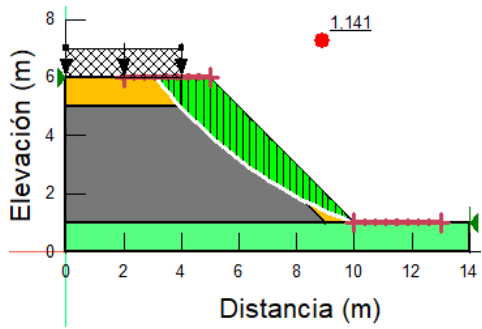
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

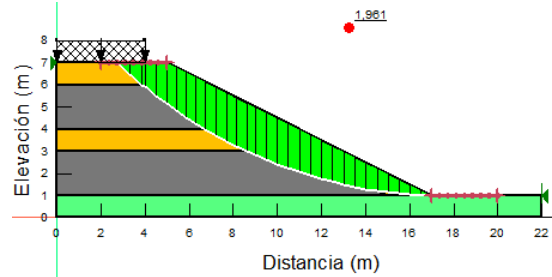
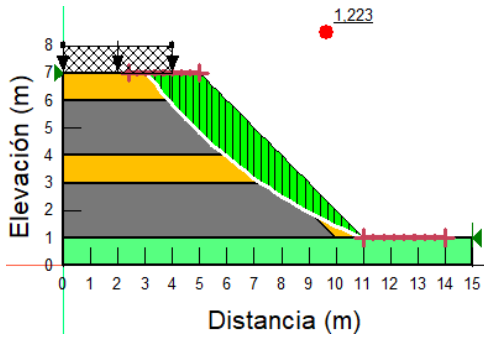


- Carga de 50kPa

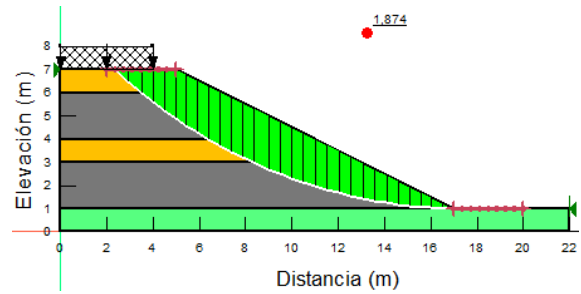
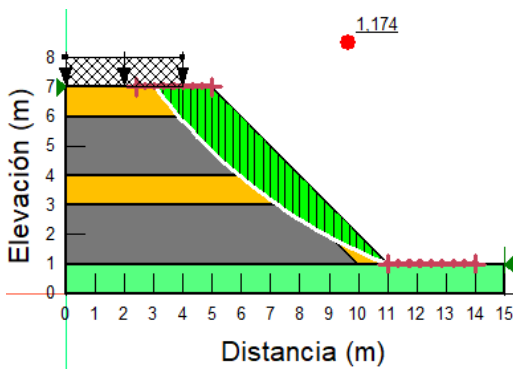


Relleno doble de 2m cada capa

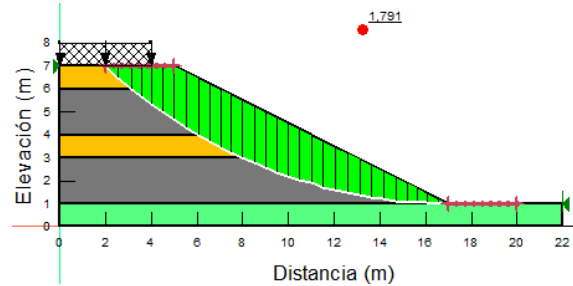
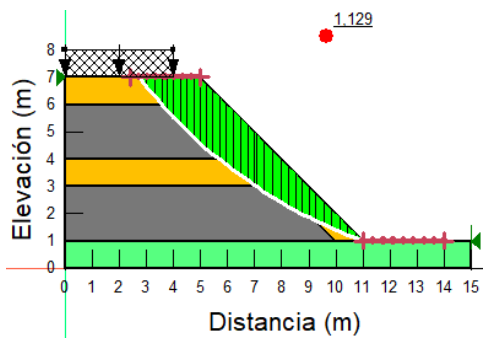
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

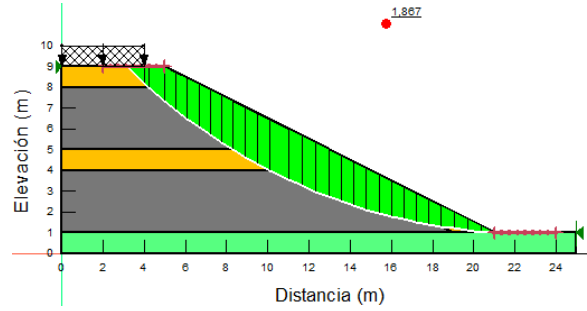
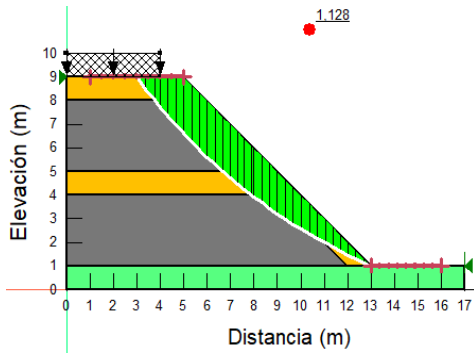


- Carga de 50kPa

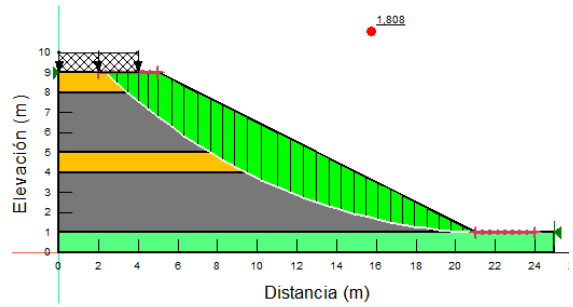
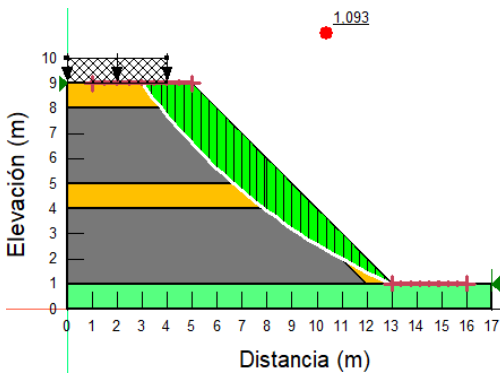


Relleno doble de 3m cada capa

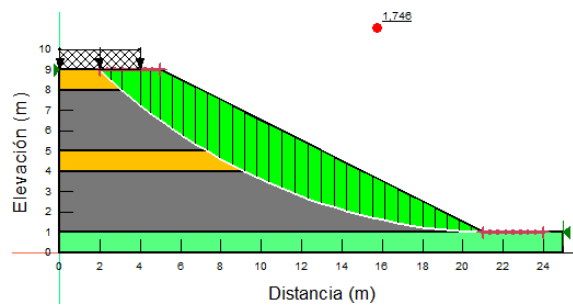
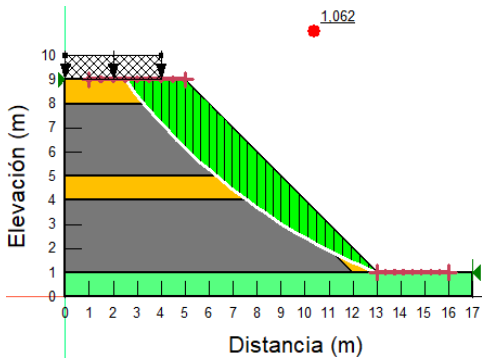
- Carga de 20kPa



- Carga de 35 kPa

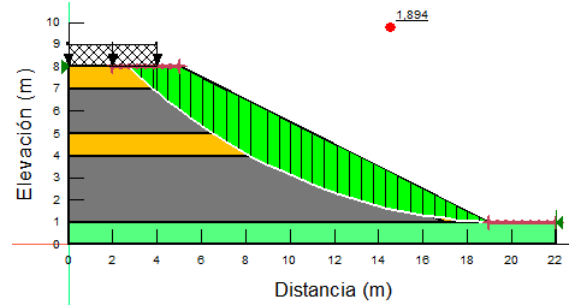
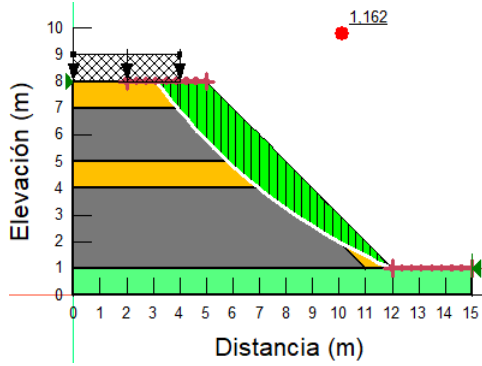


- Carga de 50kPa

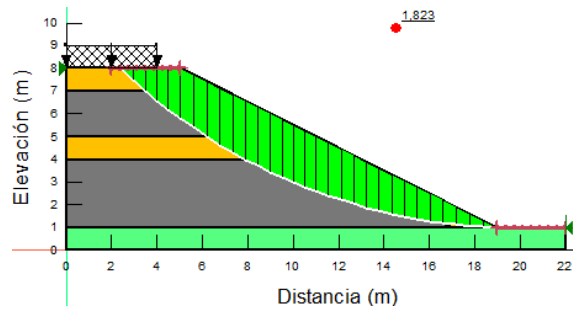
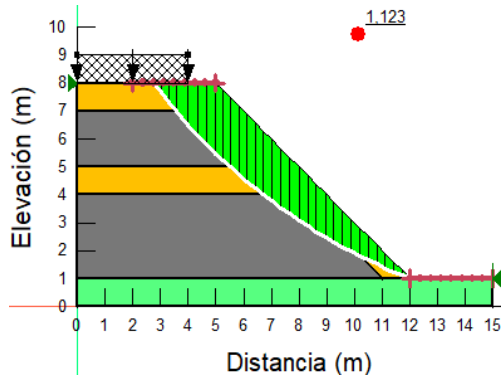


Relleno doble de 3m inferior- 2m superior

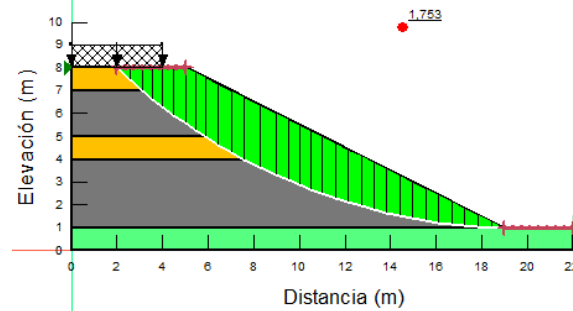
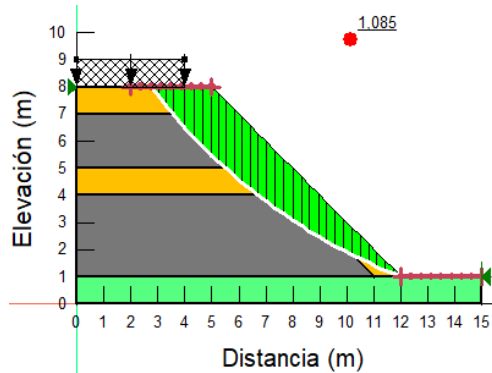
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

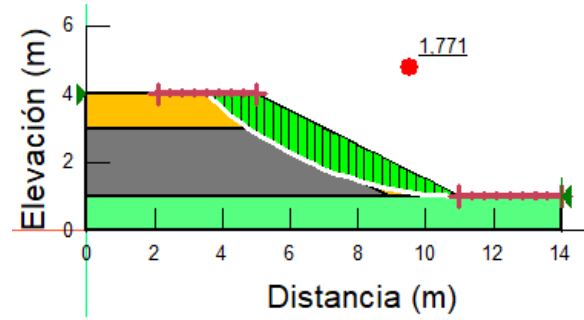
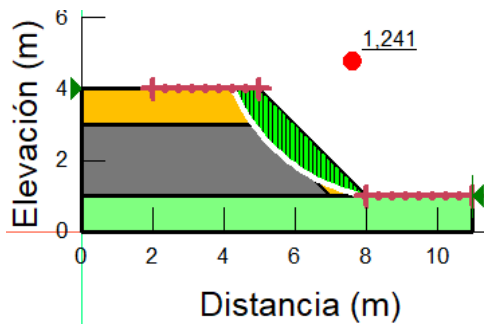


- Carga de 50kPa

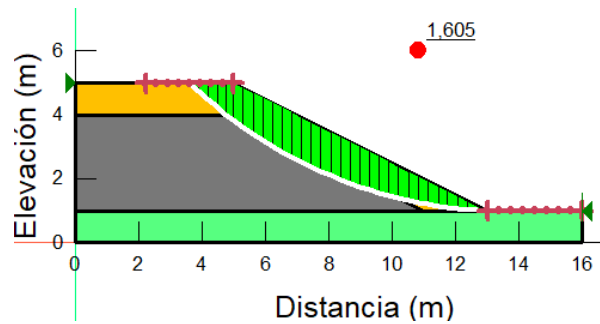
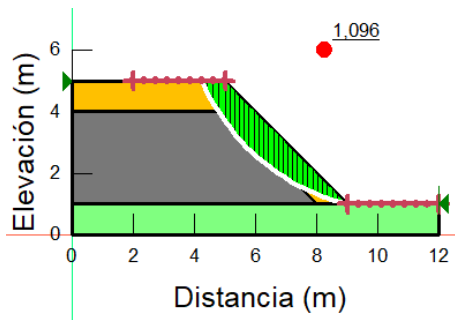


ANEXO 3: Análisis 3: Pseudo-Estático - Sin sobrecarga para balas de NFU's

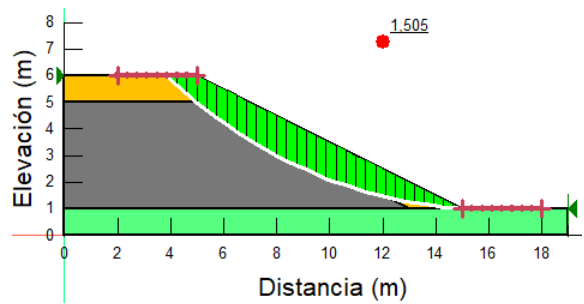
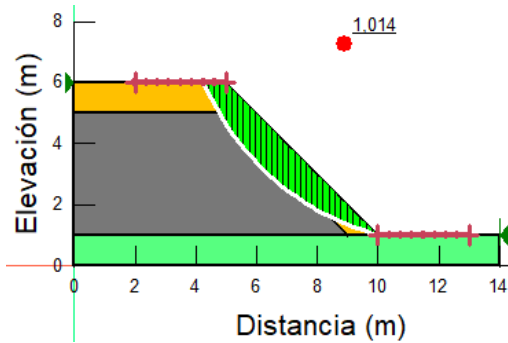
Relleno de 2m de altura



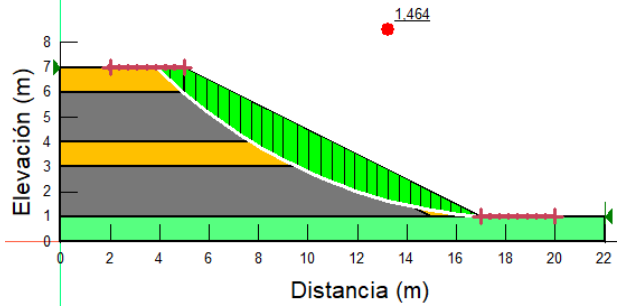
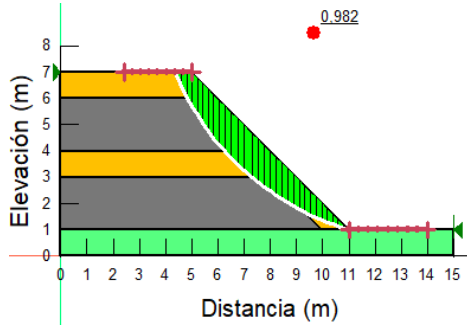
Relleno de 3m de altura



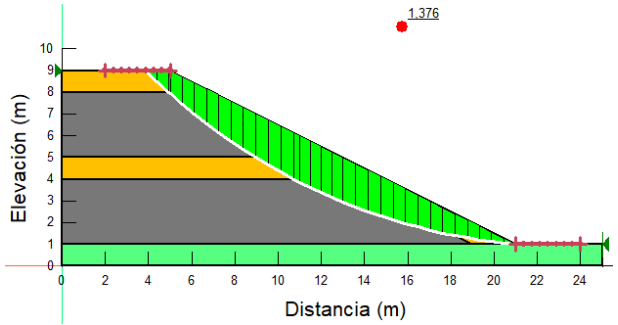
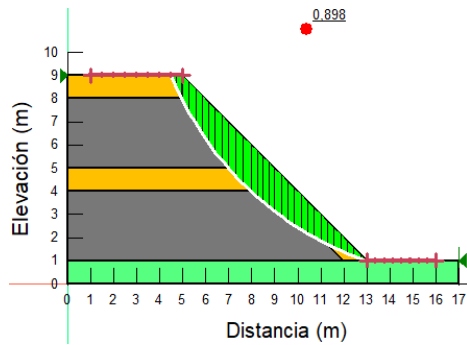
Relleno de 4m de altura



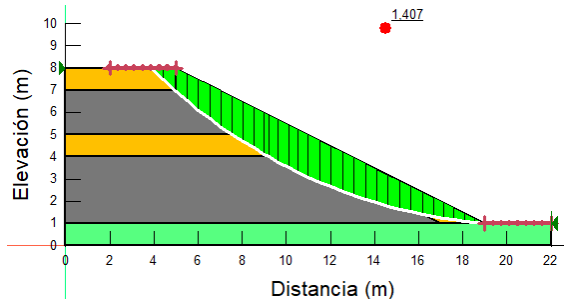
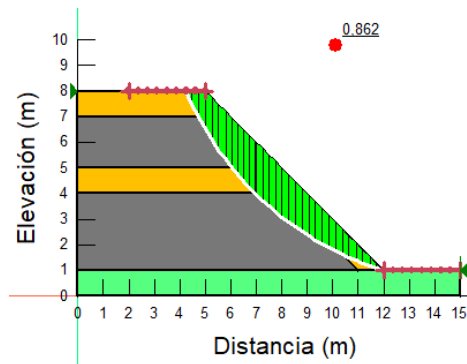
Relleno doble de 2m cada capa



Relleno doble de 3m cada capa



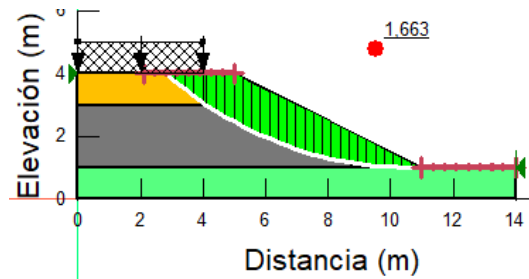
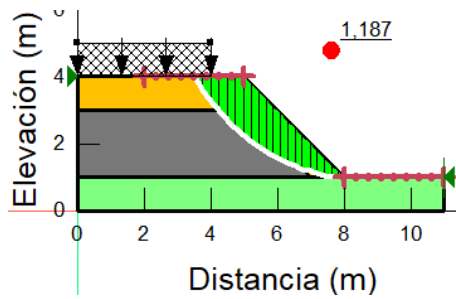
Relleno doble de 3m inferior – 2m superior



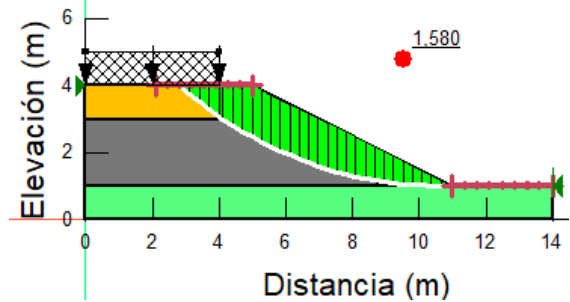
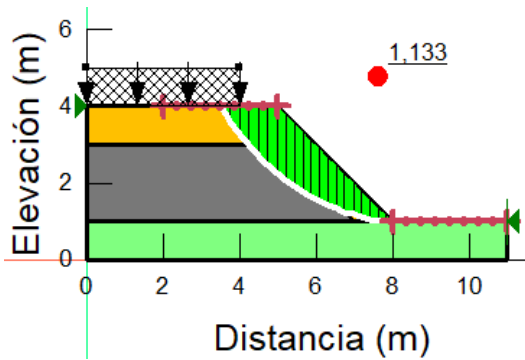
ANEXO 4: Análisis 4: Pseudo-Estático - Con sobrecarga para balas de NFU's

Relleno de 2m de altura

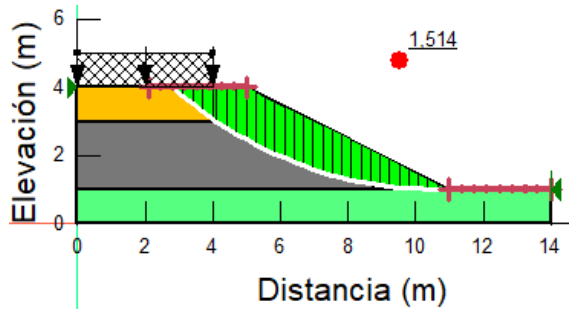
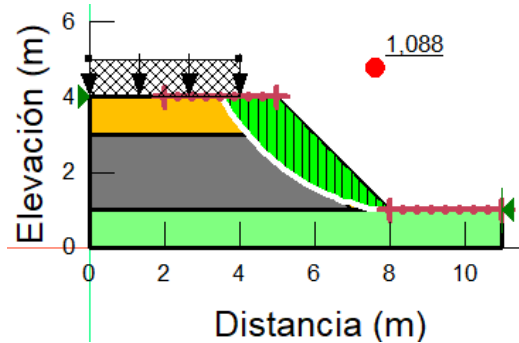
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

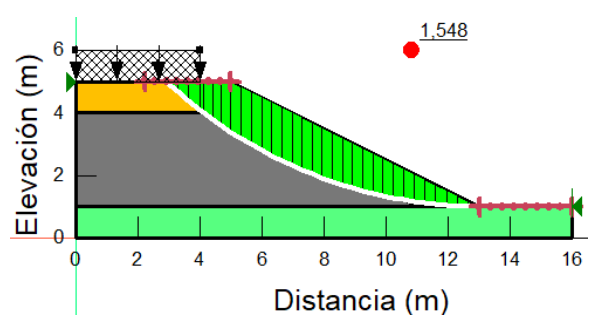
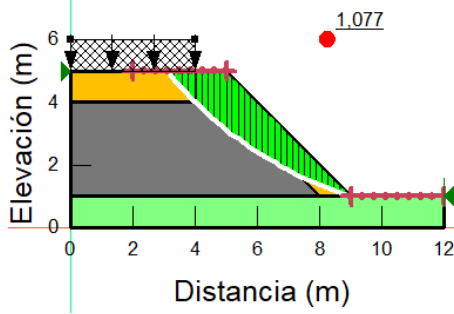


- Carga de 50kPa

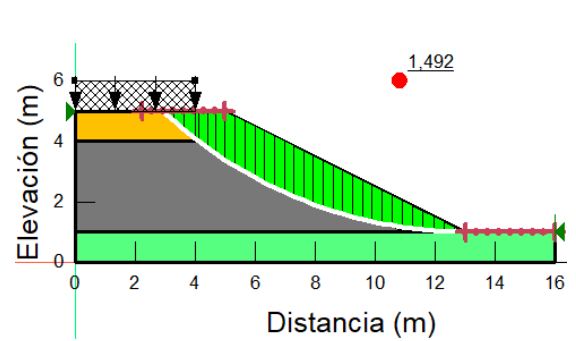
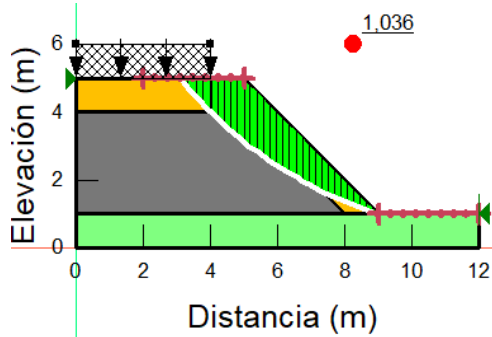


Relleno de 3m de altura

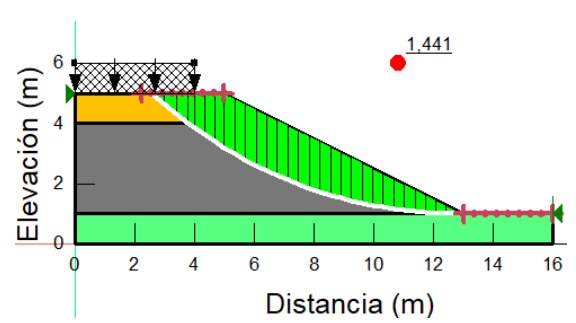
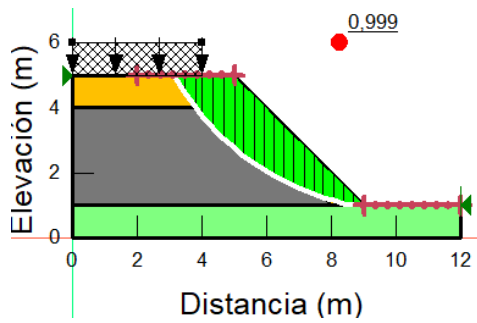
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

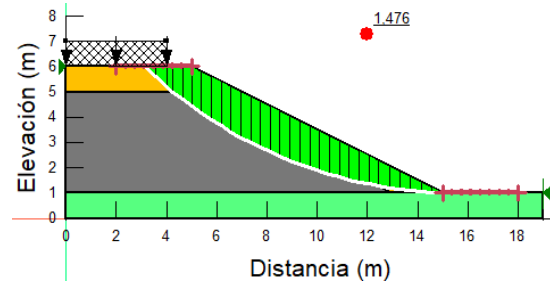
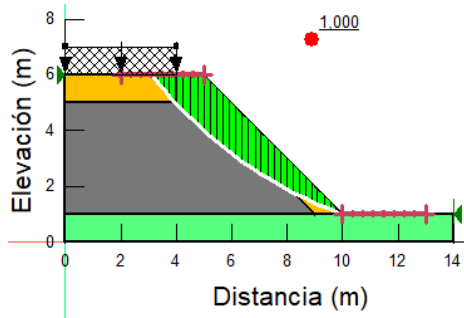


- Carga de 50kPa

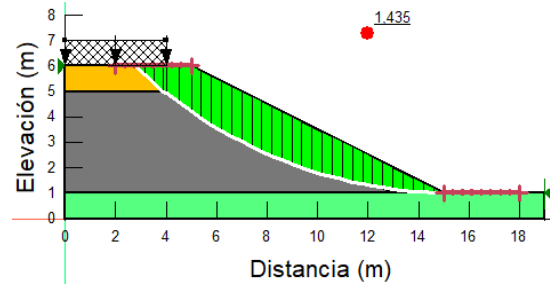
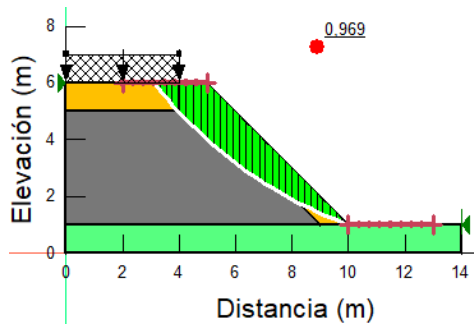


Relleno de 4m de altura

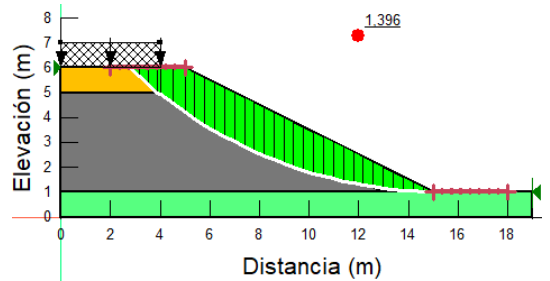
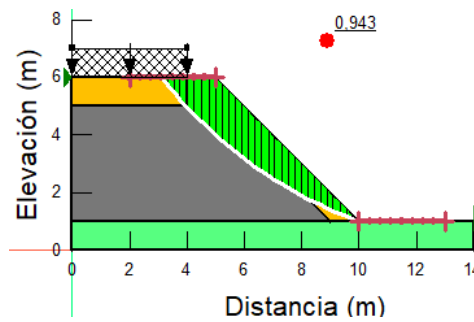
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

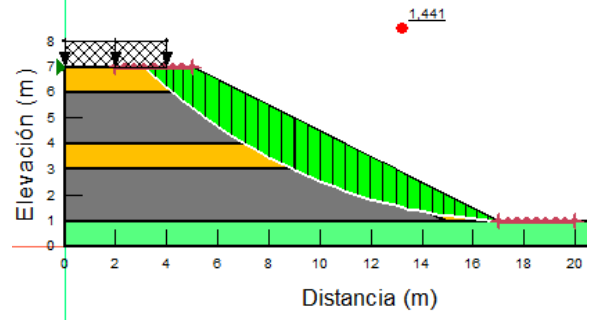
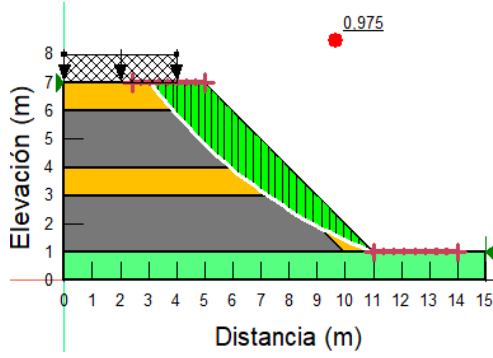


- Carga de 50kPa

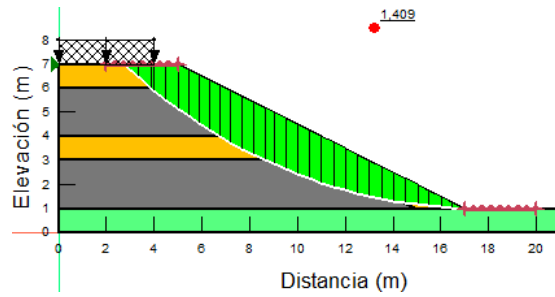
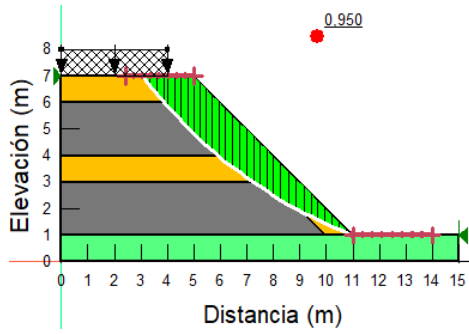


Relleno doble de 2m cada capa

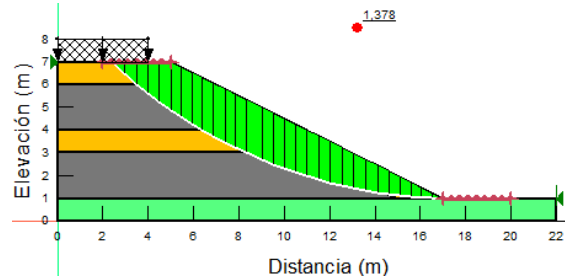
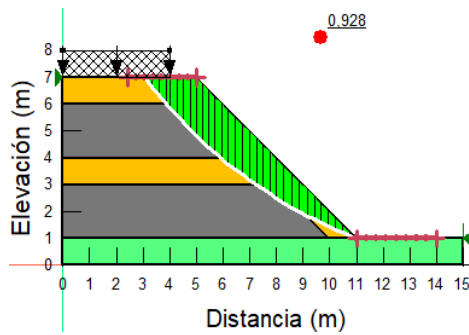
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

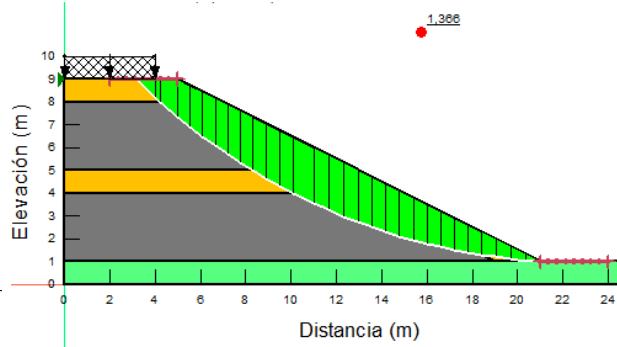
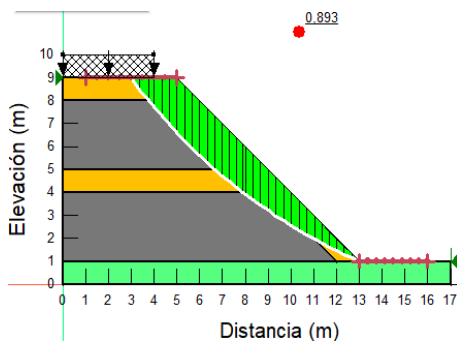


- Carga de 50kPa

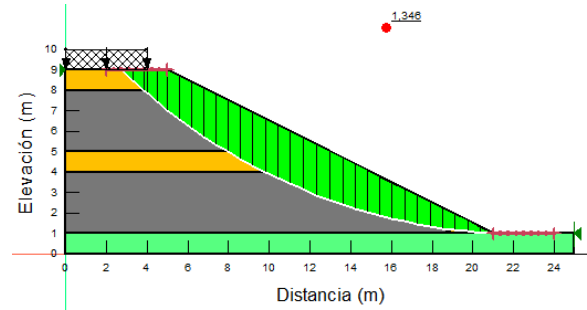
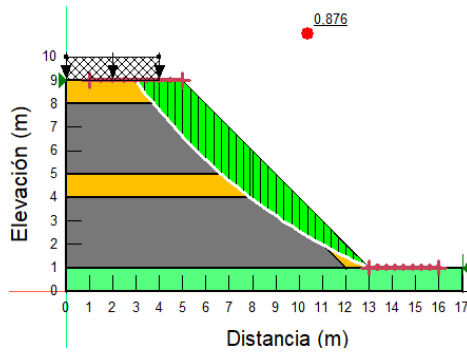


Relleno doble de 3m cada capa

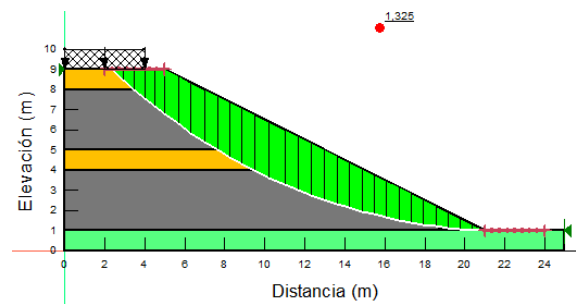
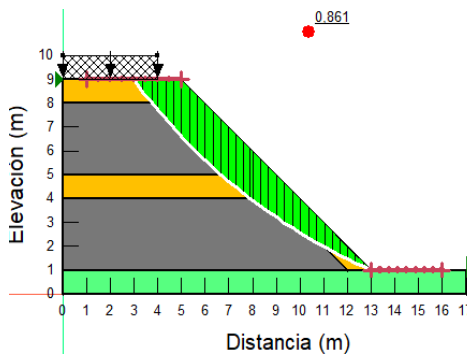
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

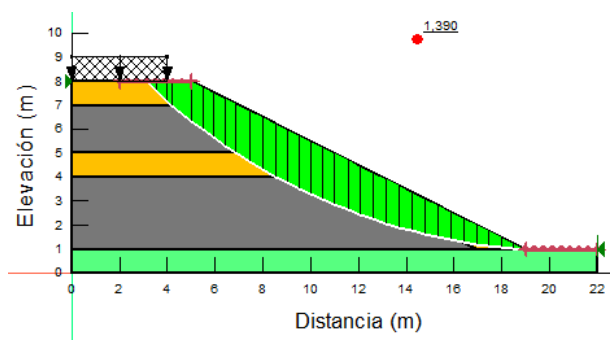
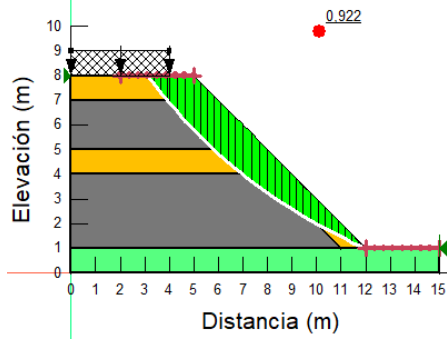


- Carga de 50kPa

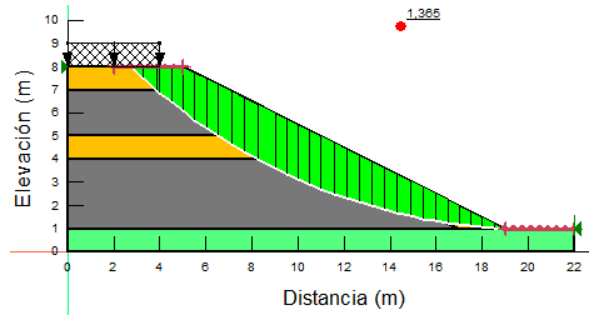
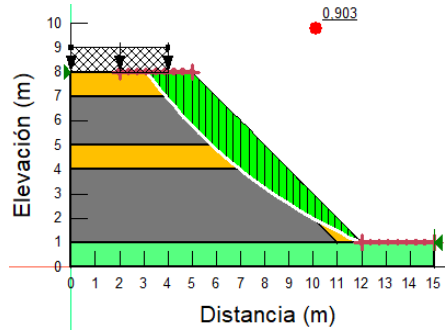


Relleno doble 3m inferior – 2m superior

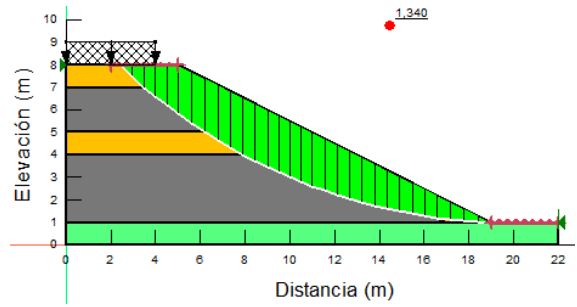
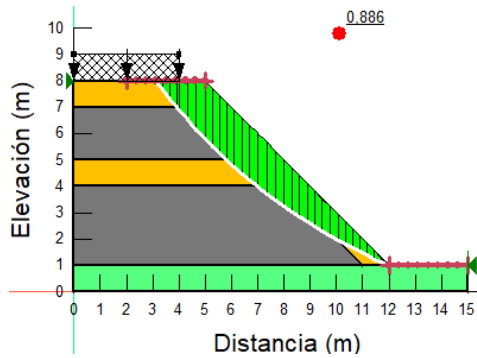
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

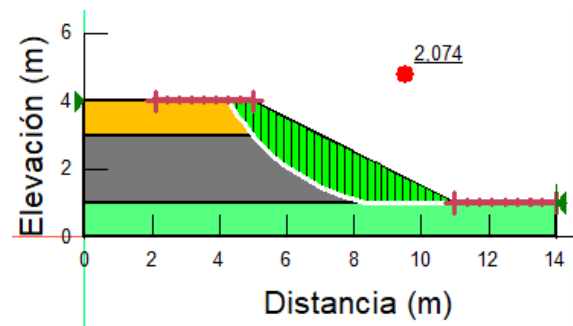
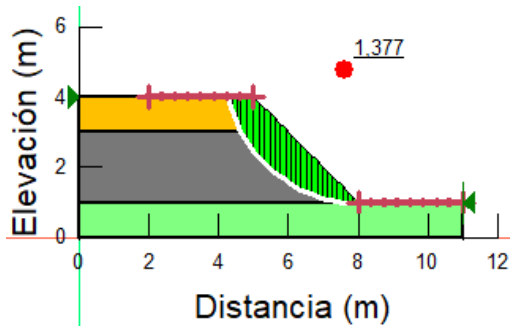


- Carga de 50kPa

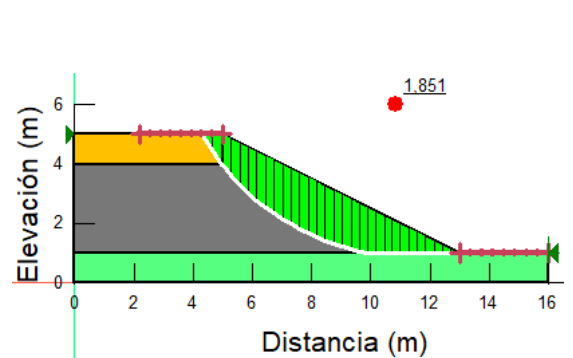
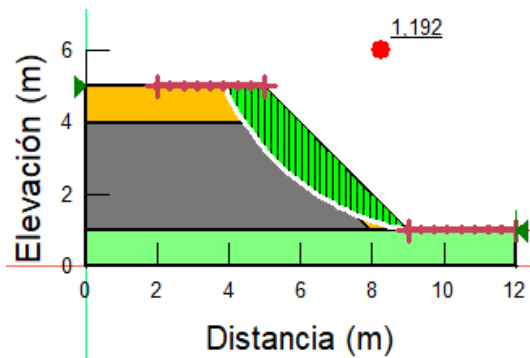


ANEXO 5: Análisis 5: Estático - Sin sobrecarga para NFU's troceados

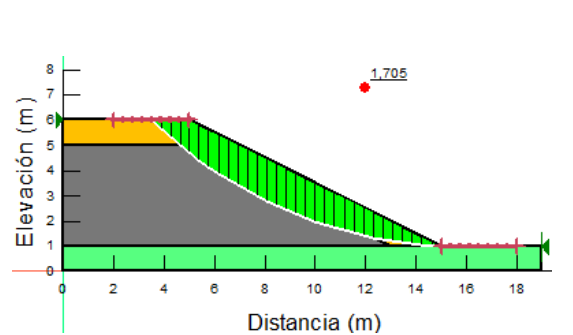
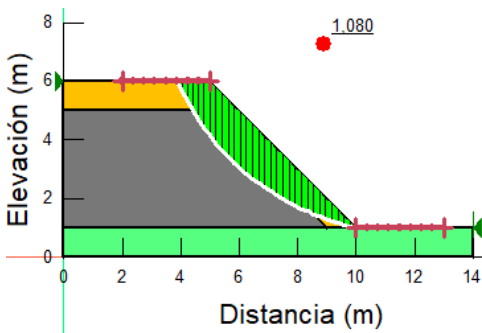
Relleno de 2m de altura



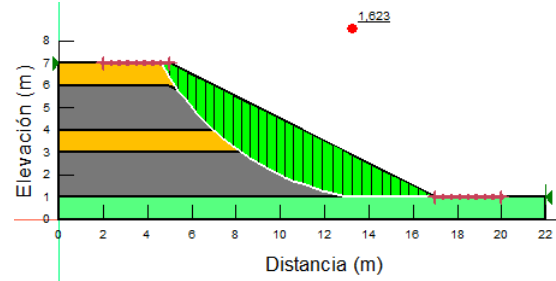
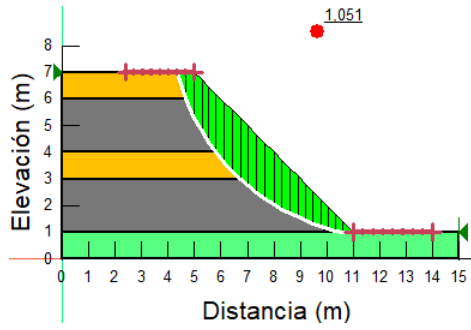
Relleno de 3m de altura



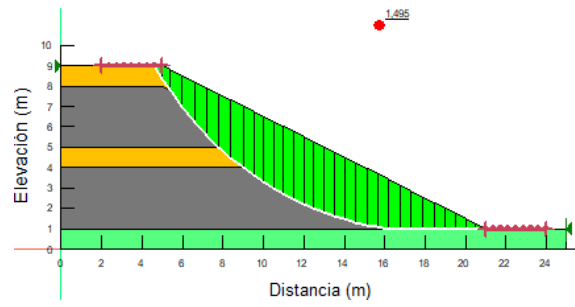
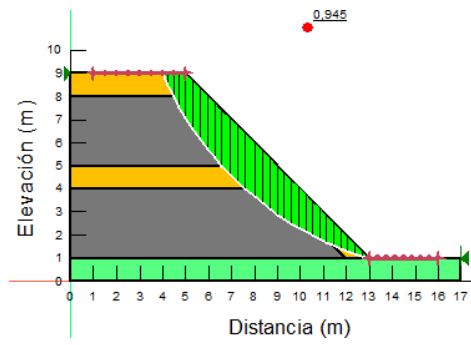
Relleno de 4m de altura



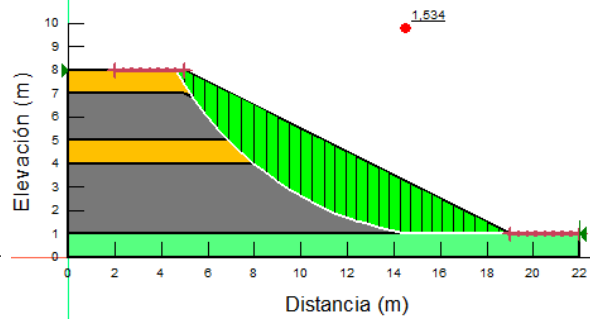
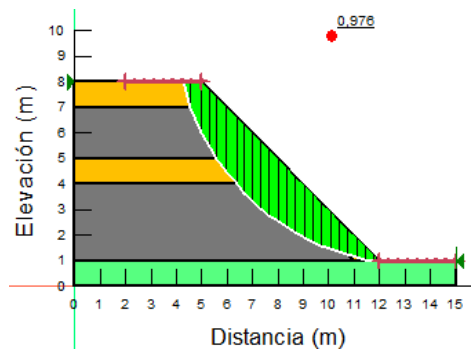
Relleno doble de 2m cada capa



Relleno doble de 3m cada capa



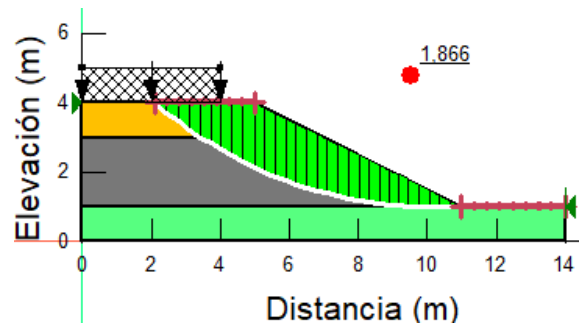
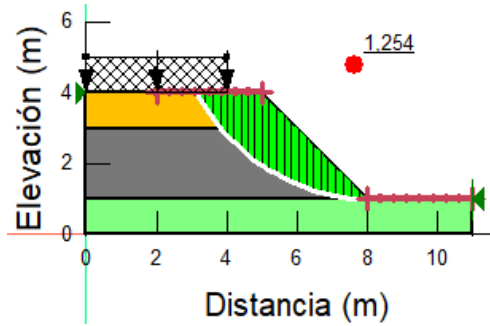
Relleno doble 3m inferior – 2m superior



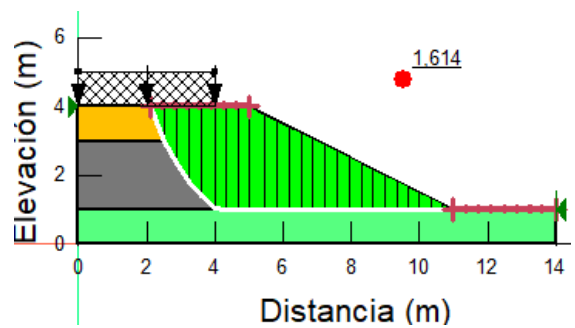
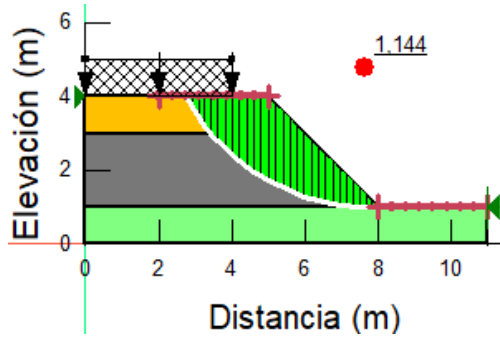
ANEXO 6: Análisis 6: Estático - Con sobrecarga para NFU's troceados

Relleno de 2m de altura

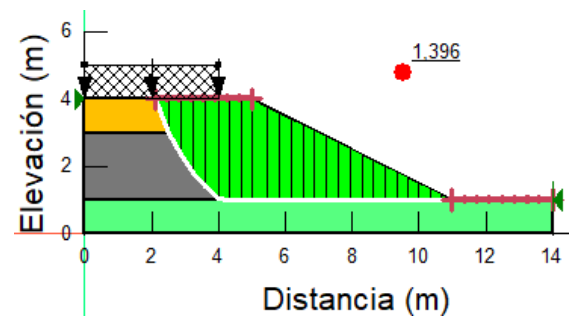
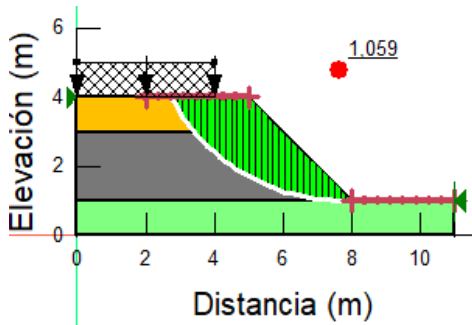
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

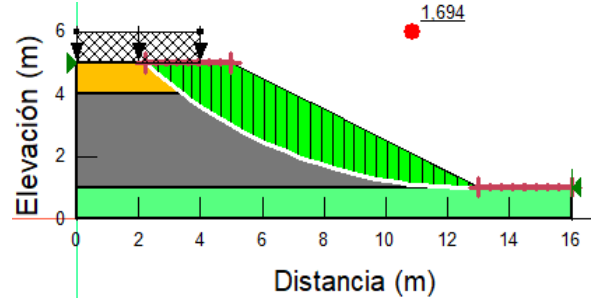
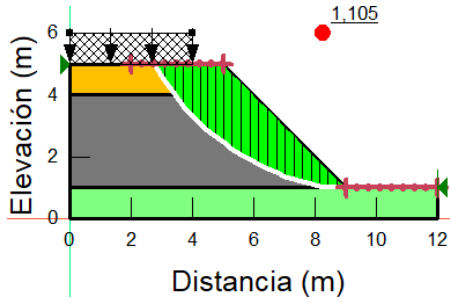


- Carga de 50kPa

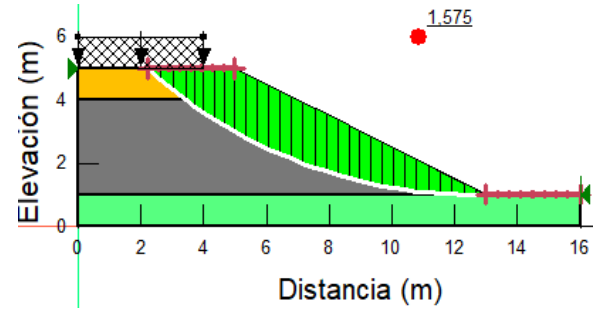
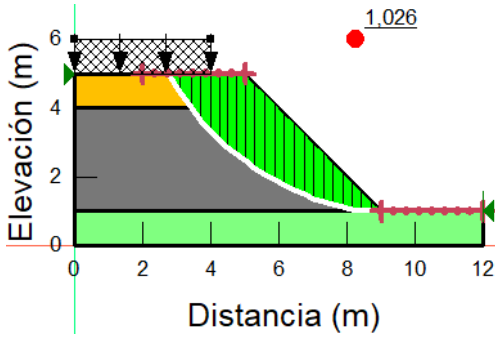


Relleno de 3m de altura

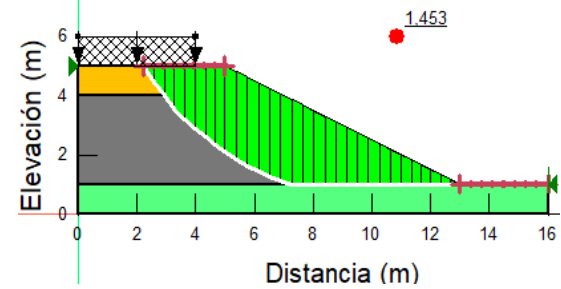
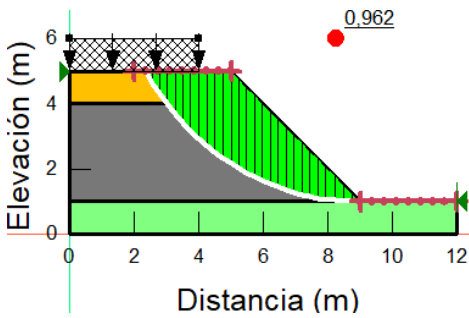
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

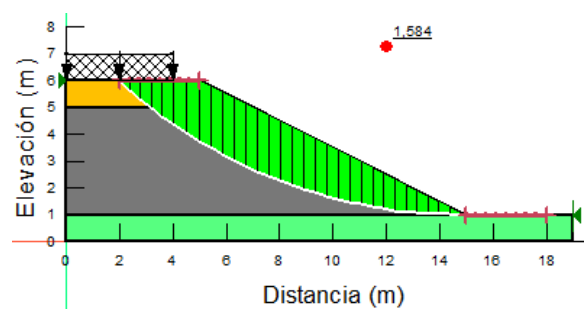
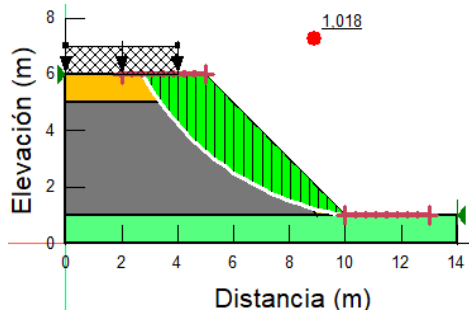


- Carga de 50kPa

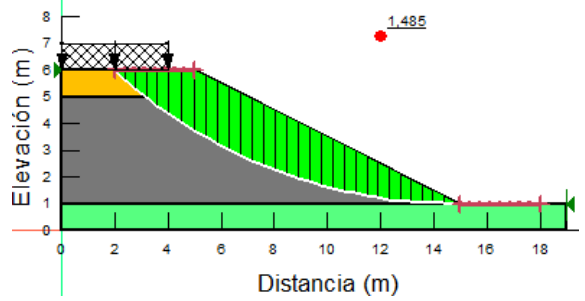
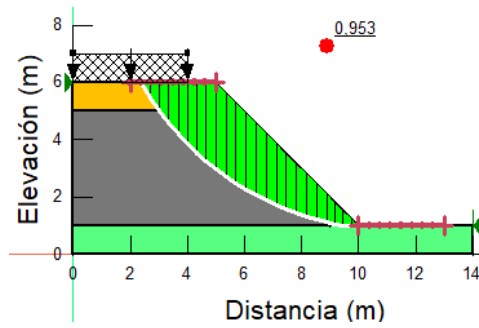


Relleno de 4m de altura

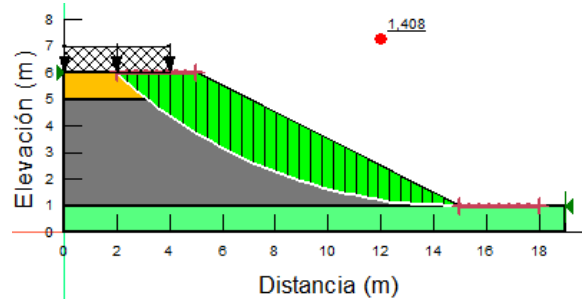
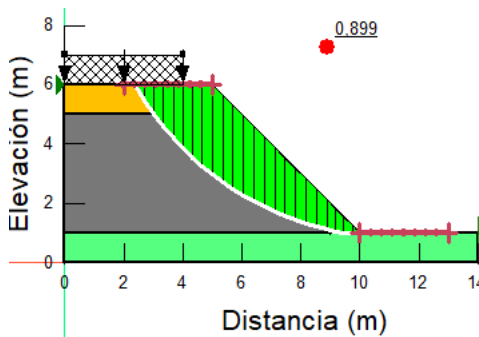
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

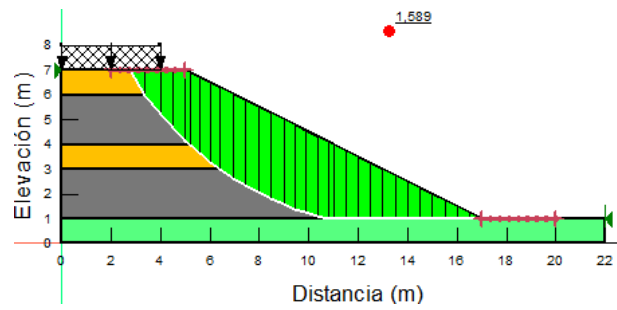
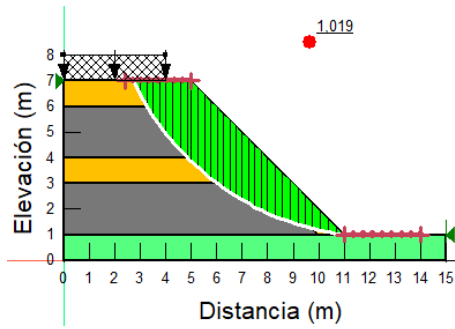


- Carga de 50kPa

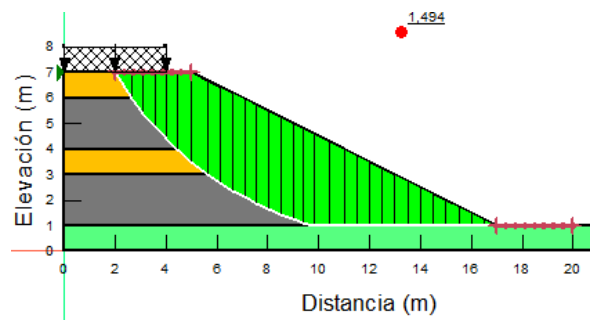
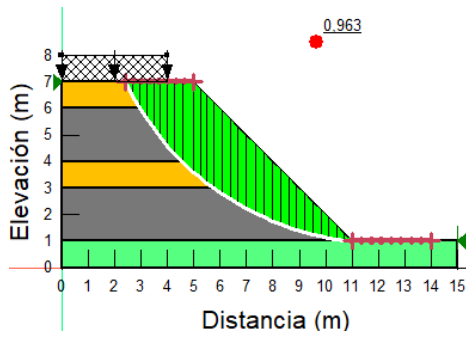


Relleno doble de 2m cada capa

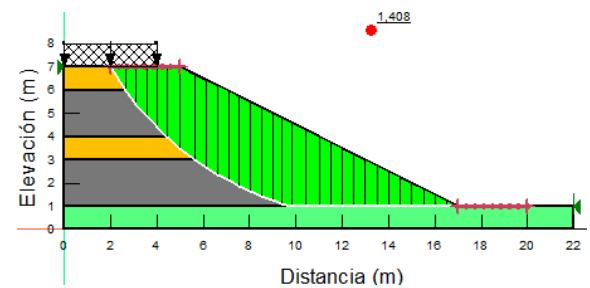
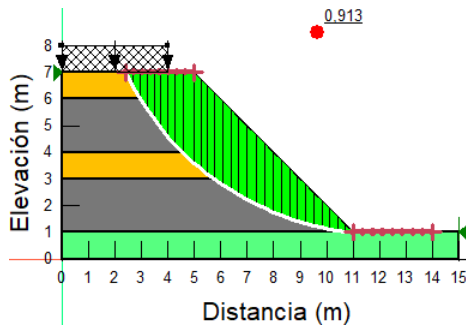
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

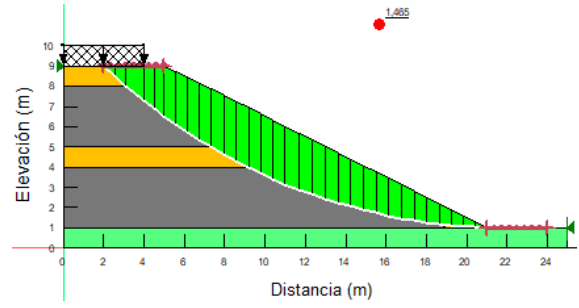
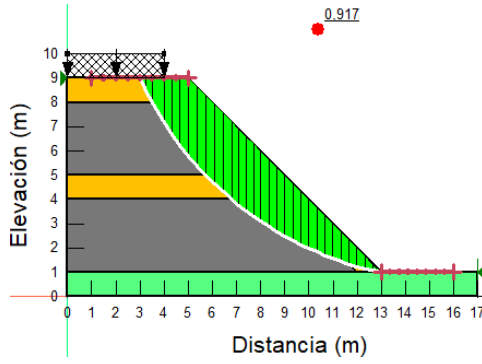


- Carga de 50kPa

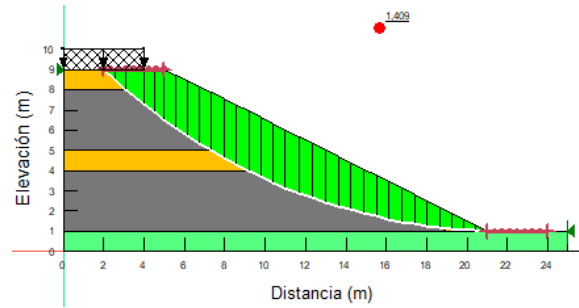
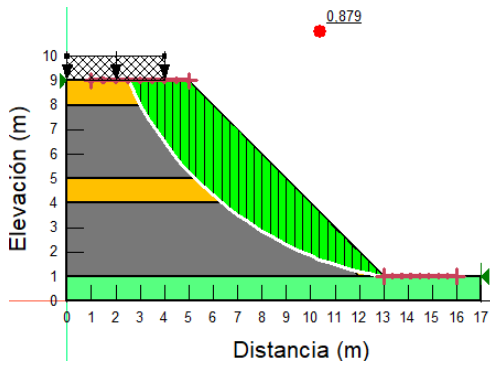


Relleno doble de 3m cada capa

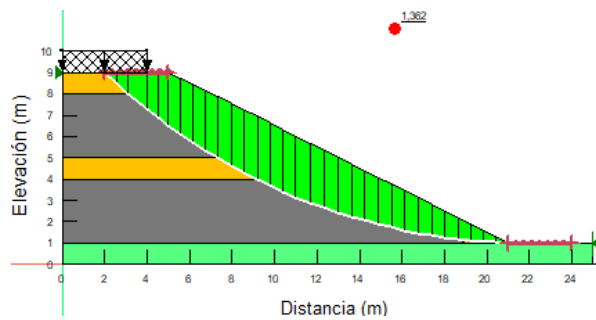
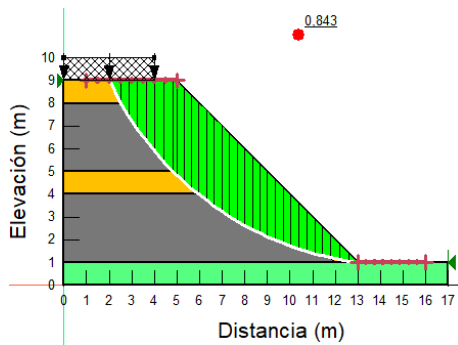
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

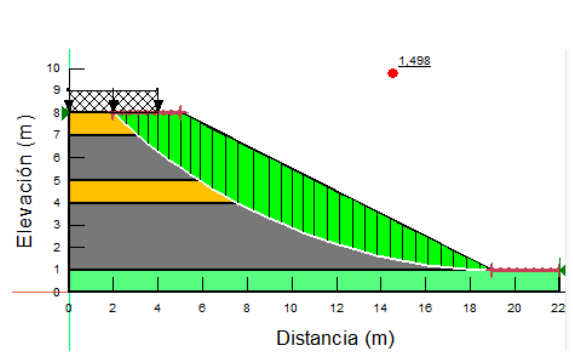
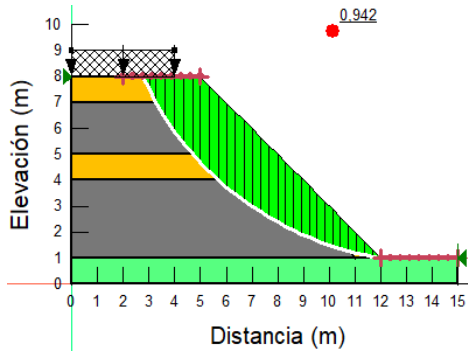


- Carga de 50kPa

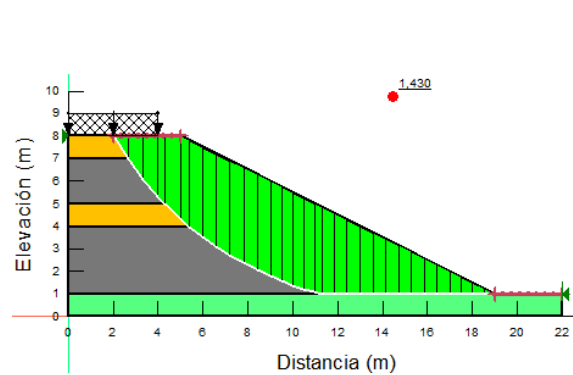
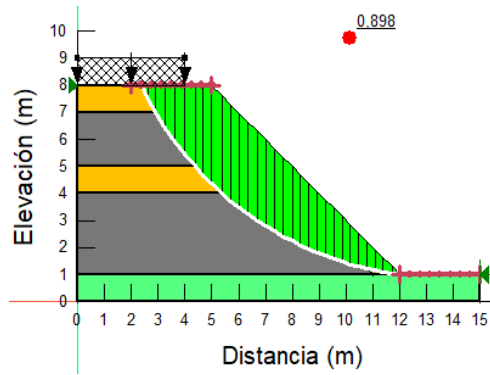


Relleno doble 3m inferior – 2m superior

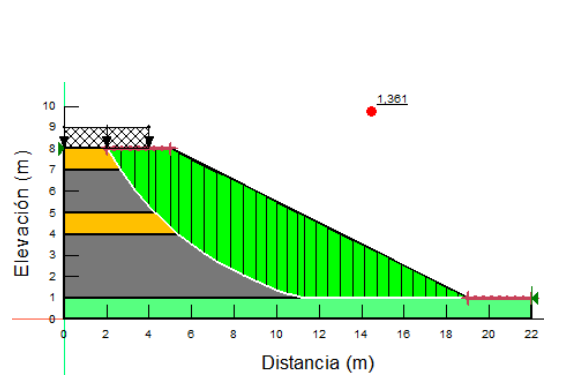
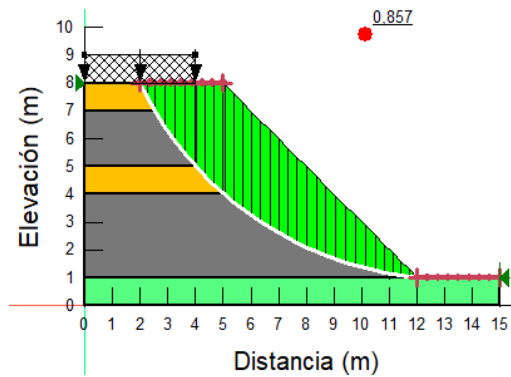
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

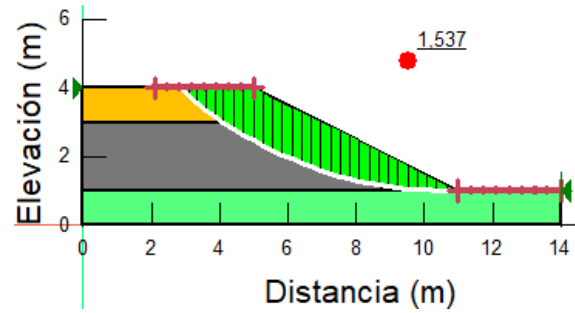
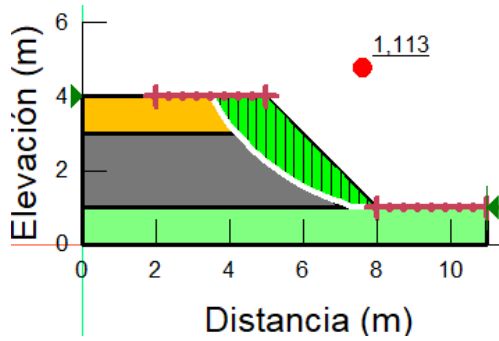


- Carga de 50kPa

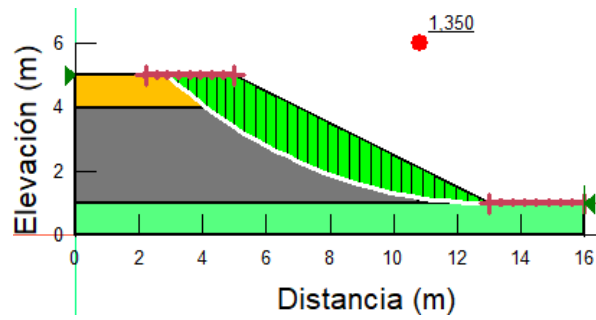
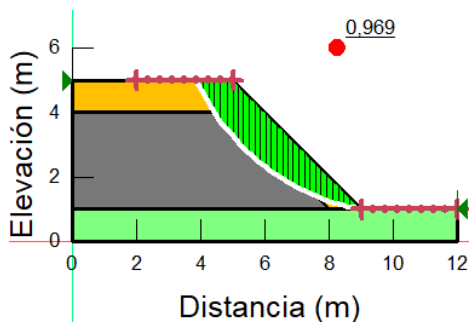


ANEXO 7: Análisis 7: Pseudo-Estático - Sin sobrecarga para NFU's troceados

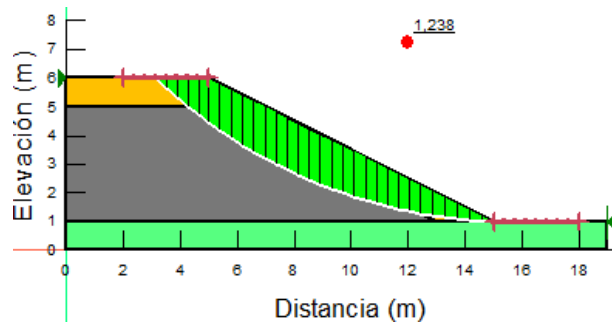
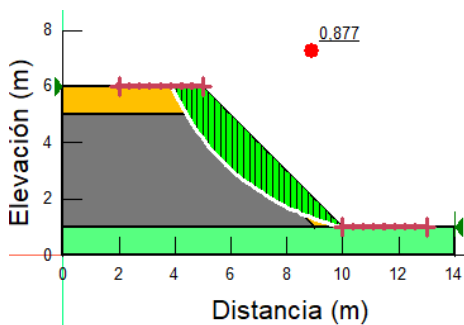
Relleno de 2m de altura



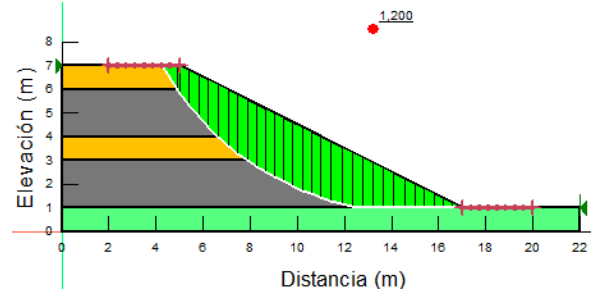
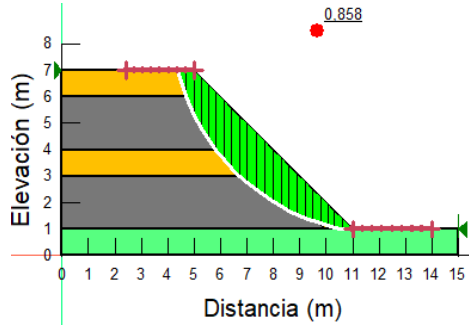
Relleno de 3m de altura



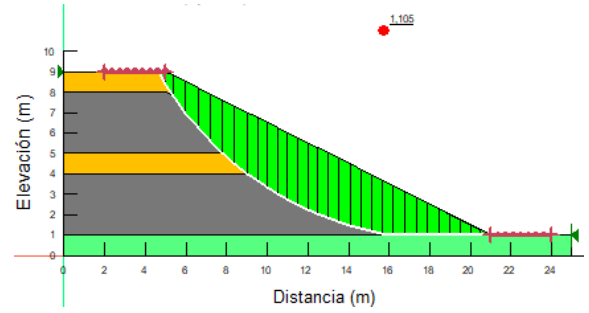
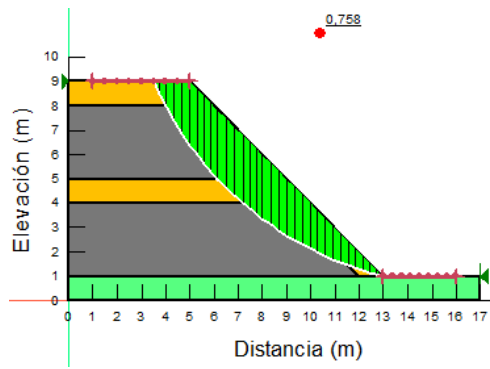
Relleno de 4m de altura



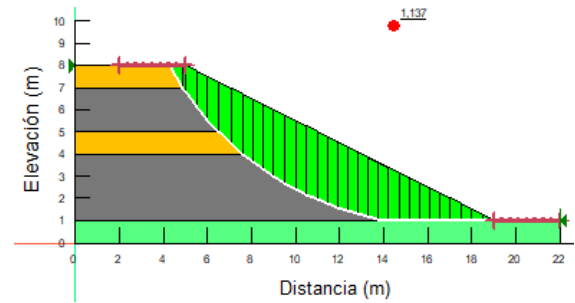
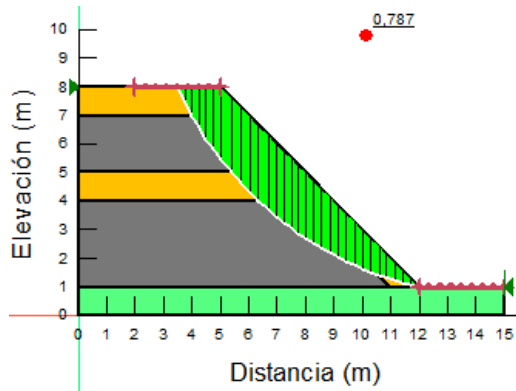
Relleno doble de 2m cada capa



Relleno doble de 3m cada capa



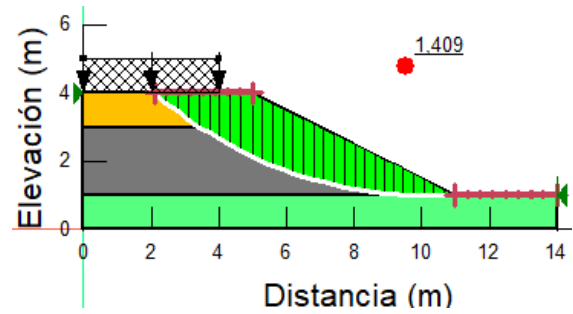
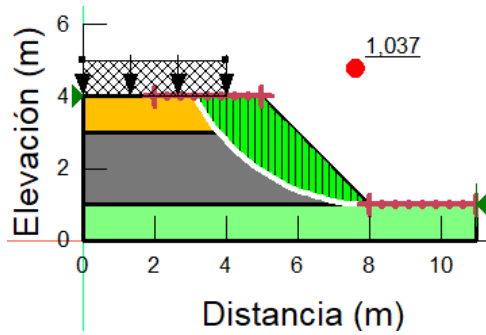
Relleno doble 3m inferior – 2m superior



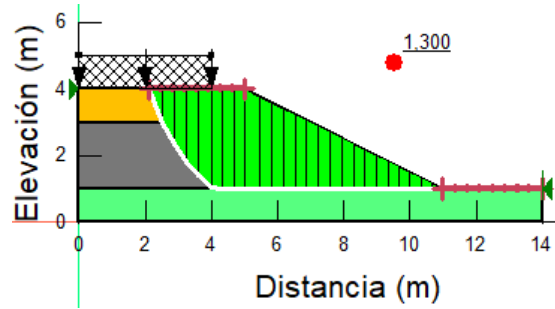
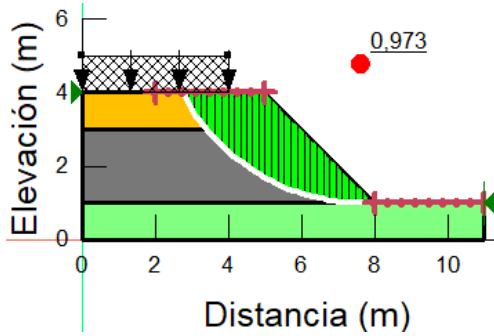
ANEXO 8: Análisis 8: Pseudo-Estático - Con sobrecarga para NFU's troceados

Relleno de 2m de altura

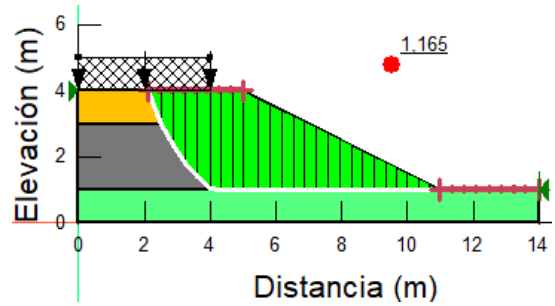
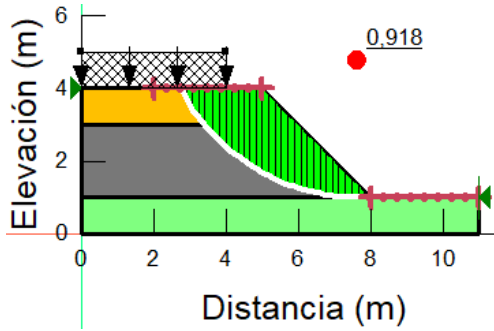
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

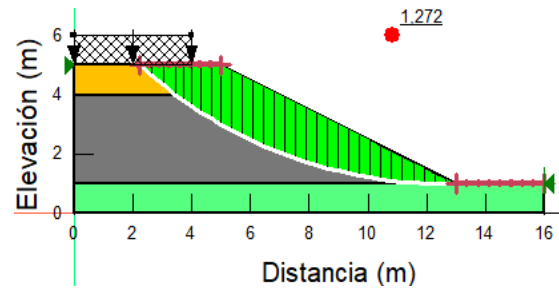
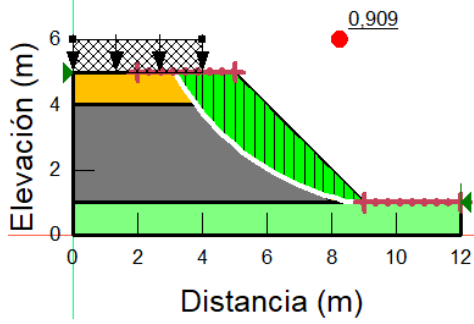


- Carga de 50kPa

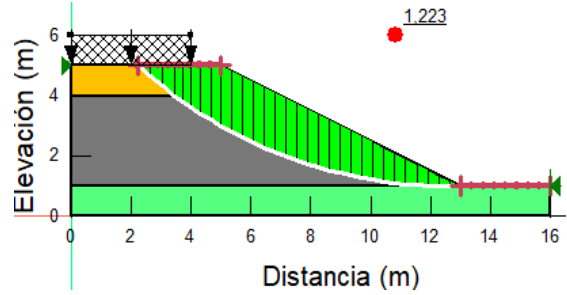
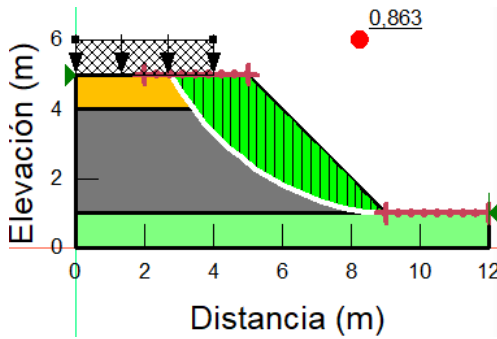


Relleno de 3m de altura

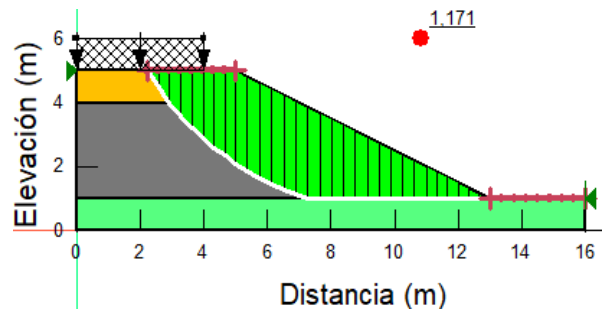
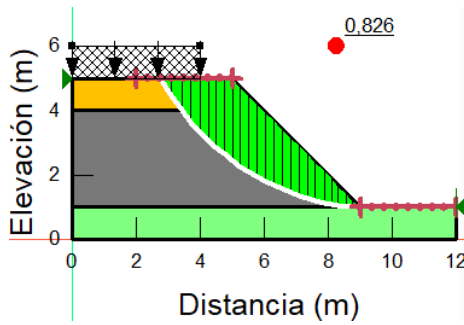
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

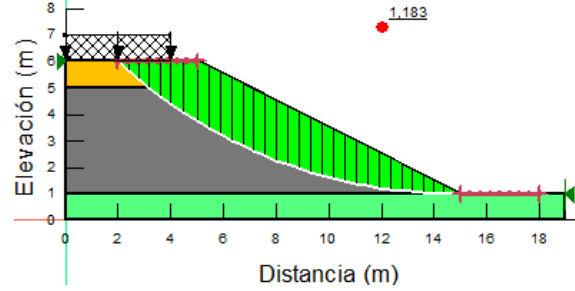
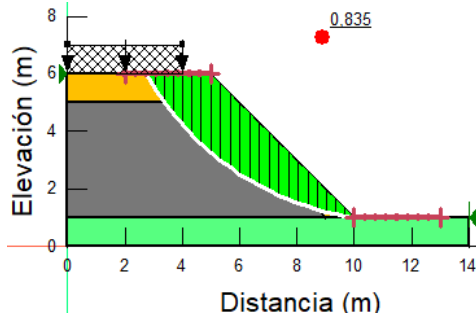


- Carga de 50kPa

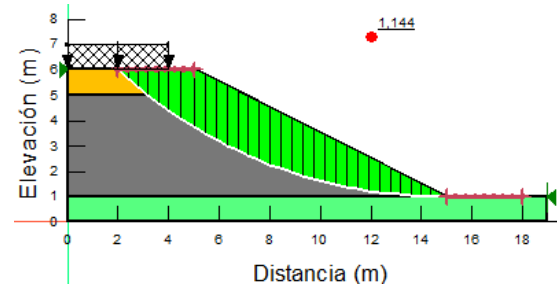
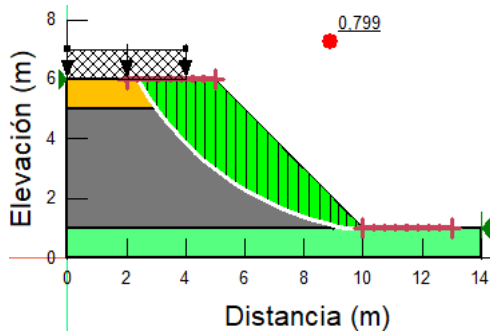


Relleno de 4m de altura

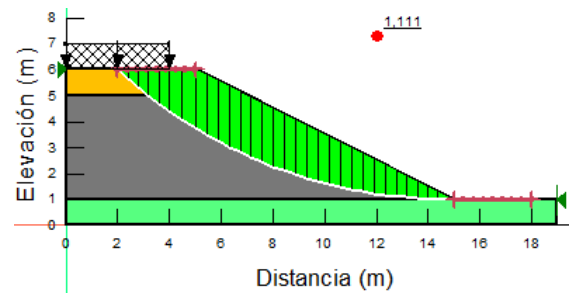
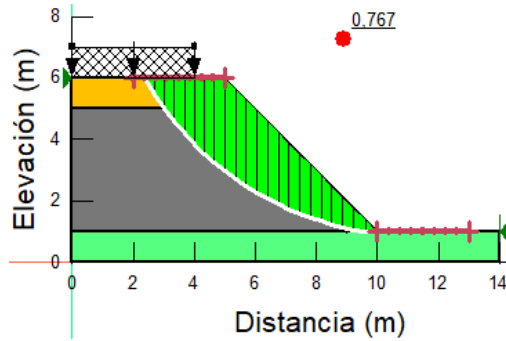
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

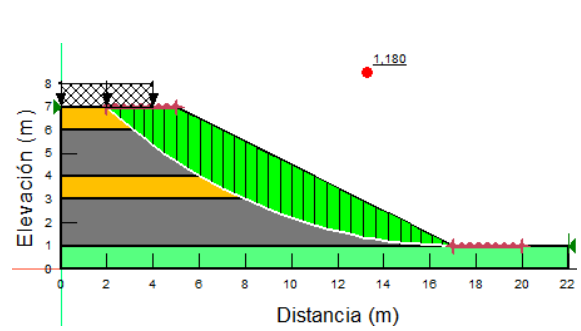
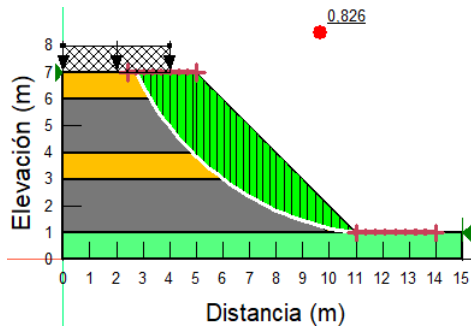


- Carga de 50kPa

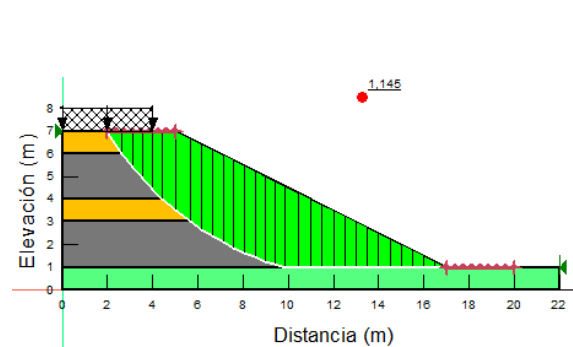
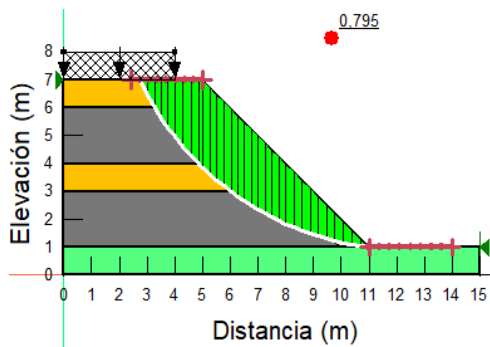


Relleno doble de 2m cada capa

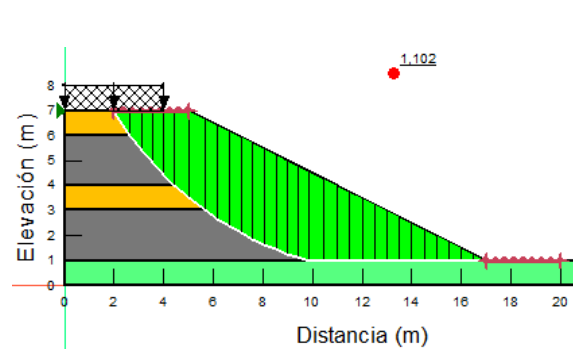
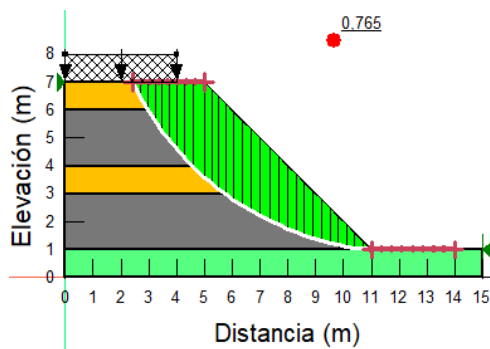
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

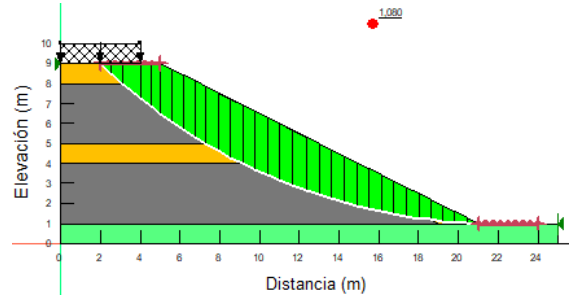
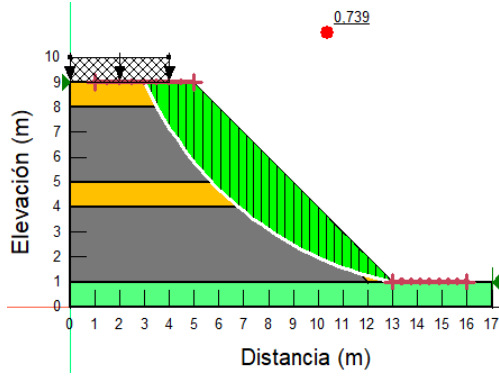


- Carga de 50kPa

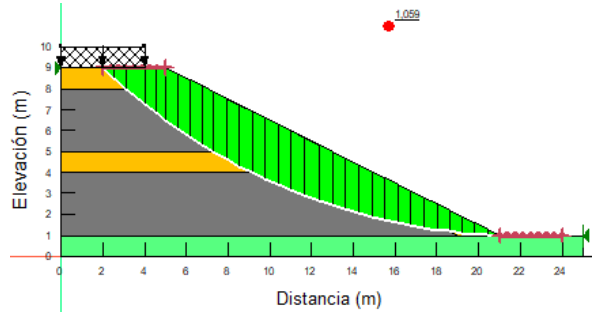
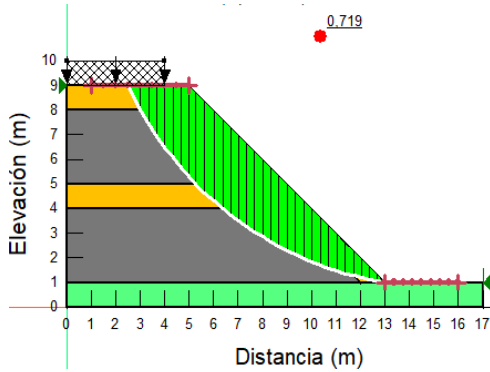


Relleno doble de 3m cada capa

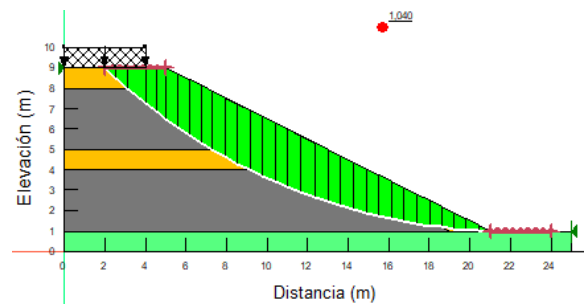
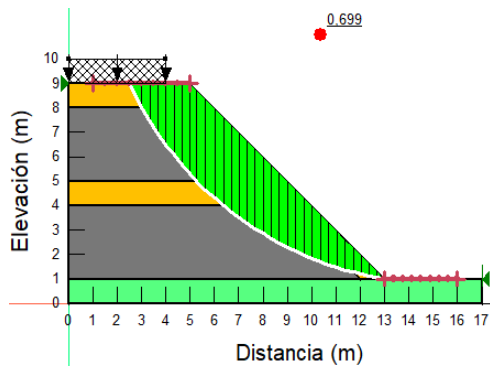
- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa

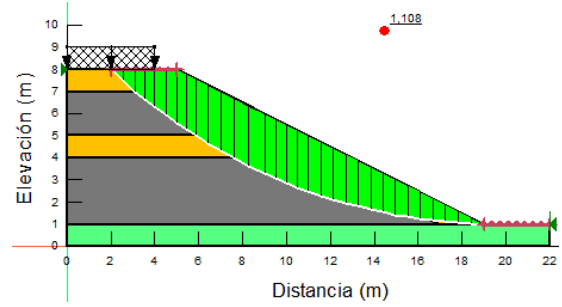
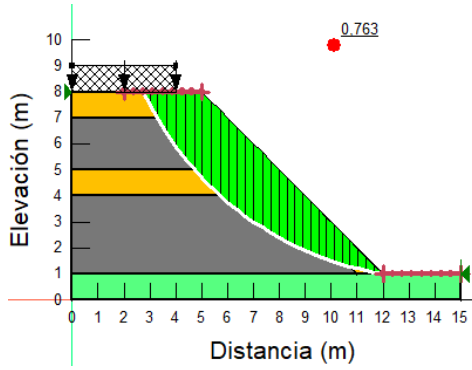


- Carga de 50kPa

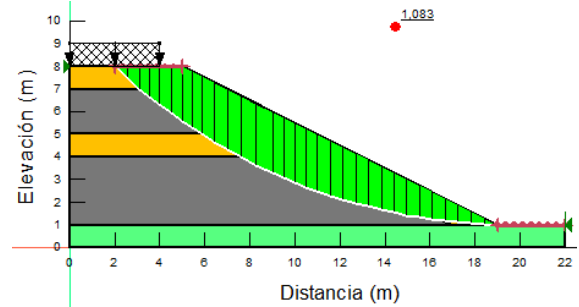
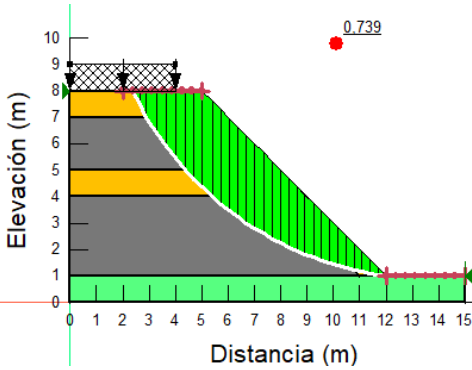


Relleno doble 3m inferior – 2m superior

- Carga de 20kPa



- Carga de 35kPa



- Carga de 50kPa

