



# CASO DE OBRA: CIERRE DE RELLENO CLASE 1 CON UTILIZACIÓN DE GEOSINTÉTICOS E MUROS DE ARCILLA COMPACTADA REFORZADA CON GEOMALLAS

**Autor<sup>1</sup>: Wladimir Caressato Junior**  
Ingeniero de proyectos de TDM Brasil  
[wcaressato@tdmbrasil.com.br](mailto:wcaressato@tdmbrasil.com.br)

**Autor<sup>2</sup>: Jorge Ernesto Fein**  
Director de AMBconsult  
[jfein@ambconsult.com.br](mailto:jfein@ambconsult.com.br)

**Autor<sup>3</sup>: Carlos Antonio Centurión**  
Gerente Técnico de TDM Brasil  
[ccenturion@tdmbrasil.com.br](mailto:ccenturion@tdmbrasil.com.br)

## RESUMEN

El presente proyecto consiste en el cierre definitivo de un antiguo depósito de escorias de alto horno, clasificado como clase 1, de la empresa Arcelor Mittal en la ciudad de Cariacica, estado de Espírito Santo en Brasil, usando sistemas de cobertura final conformados por geomembrana de HDPE para impermeabilización y sistemas de detección y drenaje de agua pluvial infiltrada usando geocompuestos y geotubos corrugados de HDPE. Este proyecto formó parte de un acondicionamiento de la empresa Arcelor Mittal solicitado por el órgano ambiental regulador. Es en este contexto que se realizó el presente proyecto, permitiendo la elaboración del presente trabajo, que mostrará un breve resumen de la etapa de cálculo y su posterior implantación en campo, abordando desde la selección de los geosintéticos a ser usados, hasta las dificultades relacionadas con la instalación del sistema de impermeabilización sobre una superficie de baja capacidad de soporte conformada por una mezcla de residuos con suelo. Este relleno fue reforzado adicionalmente en todo su perímetro con un muro de solo reforzado con fachada en geoceldas de HDPE, usando arcilla como relleno estructural, por ser el único material disponible en el local de la obra. Las características mínimas de la arcilla, los coeficientes de interacción suelo-geomalla y las propiedades básicas para garantizar la calidad de las geomallas para la construcción del muro de suelo reforzado también serán tratadas en este trabajo.

## 1. INTRODUCCIÓN

La norma ABNT NBR 10.004 "Residuos Sólidos – Clasificación" clasifica los residuos sólidos en función de sus riesgos potenciales al medio ambiente y a la salud pública en residuos clase I, peligrosos, y residuos clase 2, no peligrosos, con la finalidad de administrarlos adecuadamente. Instalado en el tope de una colina en un área de aproximadamente 4.800 m<sup>2</sup> en la ciudad de Cariacica, Espírito Santo, el depósito utilizado para el destino final de polvo generado por las máquinas de la central siderúrgica y escorias resultado del proceso de alto horno de la Arcelor Mittal fue clasificado como aterro de residuos sólidos clase I, por ofrecer riesgo a la salud pública y al medio ambiente. Con el paso del tiempo fue necesario aumentar la vida útil del depósito de escorias, motivo por el cual fue construido un muro de concreto armado en todo su perímetro, aumentando su capacidad de almacenamiento para 26.000 m<sup>3</sup>. Al llegar al final de su vida útil, por tratarse de residuos contaminantes, existía la necesidad de encerrar el depósito para evitar el riesgo de daños ambientales.

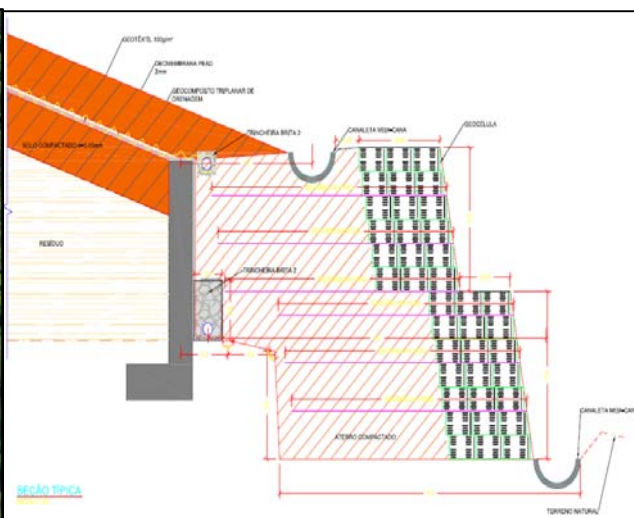
Una opción, rechazada por Arcelor Mittal, era retirar el muro y de parte del material almacenado para la ejecución de la cobertura. Se optó entonces por el refuerzo del muro ya existente y en peligro de colapso con un relleno reforzado con geomallas y fachada de geoceldas, junto al muro de concreto, que adicionalmente a garantizar la estabilidad del conjunto, ayudaría en la disposición final del sistema de cobertura y drenaje proyectados para el cierre del depósito, asegurando así la estanqueidad del depósito de residuos, que era uno de los requisitos del órgano ambiental.

## 2. EL PROYECTO

El proyecto consiste en un sistema de contención perimetral con alturas entre 2,60 a 7,80 metros reforzados con geomallas uniaxiales de HDPE (polietileno de alta densidad), con la función de contener las tensiones generadas por el empuje activo de suelos, permitiendo conformar una estructura de contención suficientemente resistente para soportar las cargas del proyecto, y con fachada de paneles de geoceldas también de HDPE, las cuales posibilitan el almacenamiento de suelo y semillas para el crecimiento de vegetación. Como el objetivo era integrar el depósito de residuos al medio ambiente, la fachada vegetada generaría una cobertura permanente de vegetación eliminando el impacto estético que podría generar una pared de concreto. En la Figura 1 se presenta la localización del proyecto antes de la regularización para construcción de los muros de contención.

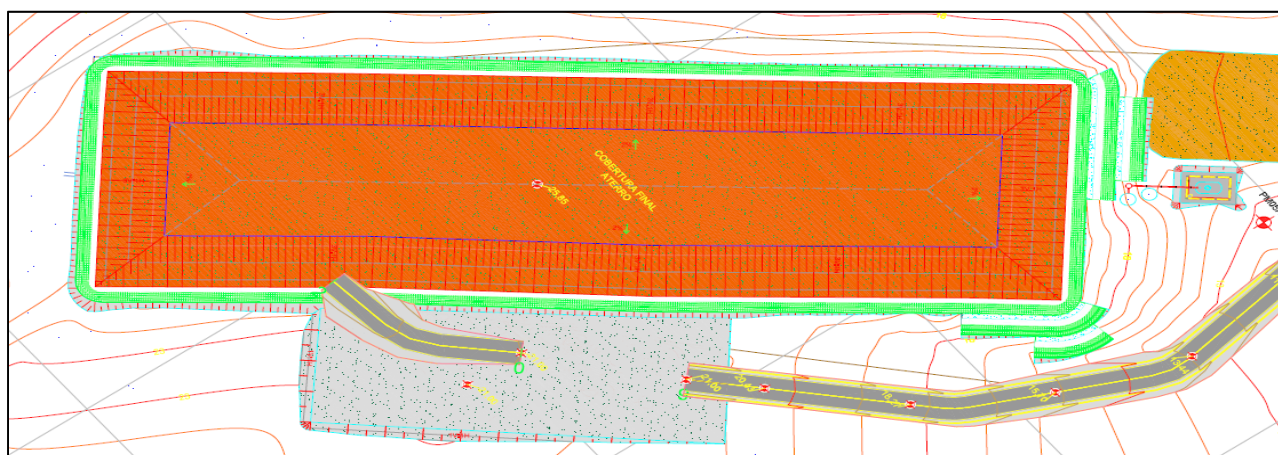


**Figura 1.** Planta del depósito antes de las obras.



**Figura 2.** Sección típica del sistema de contención.

Para el cierre del depósito fue definido un sistema de impermeabilización compuesto por una capa de geotextil no tejido, una capa de geomembrana de HDPE, una capa de geocompuesto drenante y un sistema de sub-drenaje para la conducción de agua pluvial compuesto por tubos corrugados de HDPE tipo N12 y zanjas de drenaje con grava. La figura 2 presenta una sección típica del sistema propuesto. Sobre las capas de geosintéticos fue proyectada una cobertura de suelo de 0,40 metros para la protección de los geosintéticos y el establecimiento de la vegetación en toda el área del depósito, integrándolo así al paisaje local. La Figura 3 presenta el esquema final del depósito de residuos enterrado, después de la conformación final de la escoria, donde a futuro se pretende construir un espacio de recreación con campos de fútbol y parrilla para confraternización interna de los funcionarios de Arcelor Mittal.









**Figura 3.** Proyecto final.

### 3. PROCESO DE CÁLCULO

#### 3.1. Pre-dimensionamiento

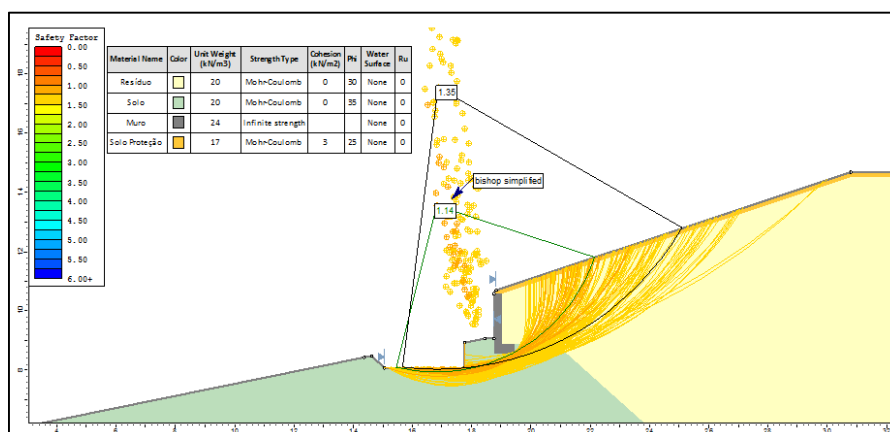
Para el pre-dimensionamiento del sistema de contención fueron realizados sondeos en diferentes puntos a lo largo del área de implantación, para identificar los tipos de suelos presentes en el local, conjuntamente con la verificación de la presencia o no del nivel freático próximo a la superficie. También fue realizada una caracterización del polvo y escoria almacenada, para definir sus parámetros de resistencia. Con el estudio de suelos realizado fue confirmado que el nivel freático se encontraba lo suficientemente profundo para no afectar la estabilidad del nuevo muro. Las características geotécnicas y parámetros de resistencia asumidos para los suelos y residuos usados en el presente cálculo son presentados en la Figura 4.

Property	Resíduo	Solo	Muro	Solo Proteção	Solo selecionado	Gravel
Color						
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Infinite strength	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]	20	20	24	17	19.5	18
Cohesion [kPa]	0	0		3	0	0
Friction Angle [deg]	30	30		25	32	40
Water Surface	None	None	None	None	None	None
Ru Value	0	0	0	0	0	0

Para determinar las características geotécnicas y parámetros de resistencia del suelo reforzado con geomallas, fue utilizada como parámetro de referencia la granulometría de la tabla 1. Este tipo de material es recomendado por AASHTO y FHWA para garantizar un alto coeficiente de interacción geomalla – suelo, facilitar el drenaje de posibles infiltraciones y optimizar al máximo el número de refuerzos.

**Tabla 1.** Granulometría recomendada por la AASHTO para el relleno reforzado

Tamaño	% que pasa
1"	100 a 75
3/4"	50 a 75
No. 4	0 a 60
No. 40	0-50
No. 200	0-5



**Figura 5.** Análisis de estabilidad del muro existente con la excavación para el nuevo muro realizada.

Definidos los parámetros de resistencia de los suelos, fueron realizados los análisis de estabilidad interna y externa usando el software MSEW 3.0 y los análisis de estabilidad global usando el software SLIDE 6.0. Para los análisis de estabilidad global fueron consideradas todas las etapas de ejecución de la obra, siendo la más crítica la excavación al pie del muro existente para la construcción de la nueva contención en suelo reforzado. La Figura 5 presenta el cálculo realizado en el software SLIDE 6.0.

### 3.2. Utilización de arcilla para el muro de suelo reforzado.

Conforme se había previsto en proyecto, el suelo para la construcción del muro de suelo reforzado debería ser un solo granular con no máximo de 5% de material pasante por el tamiz 200 conforme descrito na Tabla 1 y conforme recomendado por la mayoría de prescripciones internacionales. Con ese tipo de suelo, fue calculada la estructura de contención usando como refuerzo geomallas de alta resistencia de HDPE considerando un coeficiente de fricción solo – refuerzo de 0,80.

Sin embargo, debido a la ausencia de material granular en la región en el momento de la obra, fue realizado un nuevo cálculo con la finalidad de usar el material arcilloso disponible (Figura 6). Con el cambio de material para un suelo arcilloso, el coeficiente de interacción suelo-geomalla cayó de 0,80 para 0,58 debido a que las geomallas de HDPE son lisas y más rígidas, generando así la posibilidad de aparición de planos de falla por deslizamiento principalmente en los muros de varios niveles.



**Figura 6.** Suelo arcilloso utilizado para construcción del muro de suelo reforzado.

Tanto AASHTO como FHWA recomiendan el empleo de suelos granulares no plásticos ( $IP < 4\%$ ) y restringen el porcentaje de finos apenas a 5% conforme presentado en la tabla 1. Esto básicamente para evitar el uso de los suelos finos de los países temperados, que presenta desempeño reconocidamente desfavorable. En el caso de países con suelos tropicales, sin embargo, el empleo de solos lateríticos es particularmente ventajoso y, por tanto posible, porque poseen cohesión significativa sin que exista una tendencia a la plastificación exagerada o fluencia del macizo (Ehrlich; Becker, 2011). Así, para la realidad brasilera, se recomienda que el índice de plasticidad sea menor a 20% (AASHTO T-90). Para efecto de control de resistencia y también de la degradación del material, se recomienda que el índice de soporte (CBR) sea superior a 15% y la expansión por saturación en la humedad óptima sea inferior a 2% (Ehrlich; Azambuja, 2003). Finalmente, la granulometría del suelo arcilloso usado en este proyecto, aparte de las características arriba indicadas, debería cumplir con la granulometría presentada en la Tabla 2 recomendada por Christopher et al. (1990)

**Tabla 2.** Características recomendadas para uso de suelos tropicales, Christopher et al. (1990)

Abertura del tamiz	Porcentaje que Pasa
100 mm	100 – 75
4,75 mm	100 – 20
0,425 mm	0 – 60
0,075 mm	0 – 50

Resistencia à desintegración: perdida de resistencia cuando sumergido en sulfato de magnesio < 30% después de 4 ciclos. TxDOT-TEX 411 A,2004





La modificación del material de relleno generó pérdida de interacción con los refuerzos de HDPE, al perder interacción el número de capas de geomallas aumentó, aumentando por consecuencia los costos del proyecto. Por tanto, fue necesario reanalizar el tipo de refuerzo geosintético usado y buscar geomallas con mayor coeficiente de fricción con suelos arcillosos. La oferta de refuerzos geosintéticos es amplia y variada, permitiendo de esta forma contar con materiales adecuados para cada tipo de proyecto. Fue así que se realizó un nuevo cálculo de la estructura de contención substituyendo las geomallas de HDPE por geomallas “equivalentes” de poliéster (PET). Las geomallas de PET presentan un coeficiente de interacción mínimo de 0,80 con suelos arcillosos, consiguiendo así recuperar la interacción suelo-refuerzo originalmente considerada en el proyecto original.

Los factores de reducción considerados para calcular la resistencia a largo plazo de las geomallas PET están relacionados con los daños de instalación, degradación química, degradación biológica y fluencia (“creep”). Cada tipo de geomalla es susceptible a factores de reducción diferentes debido a las propiedades de cada polímero que la conforma, en este caso, las geomallas constituidas por HDPE, presentan un factor de reducción por fluencia (“creep”) mayor que las geomallas de PET. En la Tabla 3 se puede apreciar la resistencia que fue usada en los cálculos:

**Tabla 3.** Comparación de resistencias y factores de reducción entre geomallas

Geomalla TDM	HDPE tipo 1	HDPE tipo 2	PET
Resistencia Última	70 kN/m	114 kN/m	65 kN/m
Polímero	HDPE	HDPE	PET
FR Fluencia (creep)	2,60	2,60	1,43
FR químico/biológico	1,00	1,00	1,15
FR Daño de Instalación	1,05	1,05	1,05
Coefficiente de Interacción	0,60	0,60	0,80
Resistencia Final	25,6 kN/m	41,8 kN/m	38,3 kN/m

En la tabla 3, se puede verificar que la geomalla de HDPE presenta mayores factores de reducción por “creep”, sin embargo, su resistencia a largo plazo, específicamente la geomalla tipo 2, es comparable a la geomalla de PET, a pesar de esta tener una resistencia inicial menor. Con la finalidad de demostrar la equivalencia entre una estructura con geomallas de HDPE y otra con geomallas de PET de resistencia de 65kN/m x 30 kN/m, fueron realizados análisis adicionales de estabilidad interna y externa en el software MSEW 3.0 y de estabilidad global en el SLIDE 6.0. En la Figura 7 se encuentra un resumen de resultados obtenidos con el software MSEW 3.0 para estabilidad externa e interna.

<b>ANALYSIS: CALCULATED FACTORS (Static conditions)</b>											
Bearing capacity, $F_s = 13.33$ , Meyerhof stress = 40.36 kPa.											
Foundation Interface: Direct sliding, $F_s = 1.928$ , Eccentricity, $e/L = 0.0197$ , $F_s$ -overturning = 6.66											
#	GEOGRID			CONNECTION			Geogrid strength $F_s$	Pullout resistance $F_s$	Direct sliding $F_s$	Eccentricity $e/L$	Product name
	Elevation [m]	Length [m]	Type #	$F_s$ -overall [pullout resistance]	$F_s$ -overall [connection break]	$F_s$ -overall [geogrid strength]					
1	0.15	2.50	1	N/A	N/A	N/A	7.017	13.638	1.683	0.0045	PET 65kN
2	0.60	2.50	1	N/A	N/A	N/A	7.164	9.786	2.230	-0.0394	PET 65kN
3	1.05	2.50	1	N/A	N/A	N/A	7.318	6.767	2.637	-0.0937	PET 65kN
4	1.41	2.50	1	N/A	N/A	N/A	23.662	22.414	1.337	0.0598	PET 65kN
5	1.85	2.50	1	N/A	N/A	N/A	17.752	9.476	1.739	0.0244	PET 65kN
6	2.30	2.50	1	N/A	N/A	N/A	42.848	8.039	19.138	0.0009	PET 65kN

**Figura 7.** Análisis de estabilidad interna y externa de la sección más crítica utilizando geomallas de poliéster

La Figura 8 presenta el resultado de los nuevos cálculos de estabilidad global realizados en el software SLIDE 6.0. Los parámetros de resistencia para el relleno reforzado usados en los nuevos cálculos fueron 28 grados de ángulo de fricción y 18 kN/m<sup>3</sup> de peso unitario.

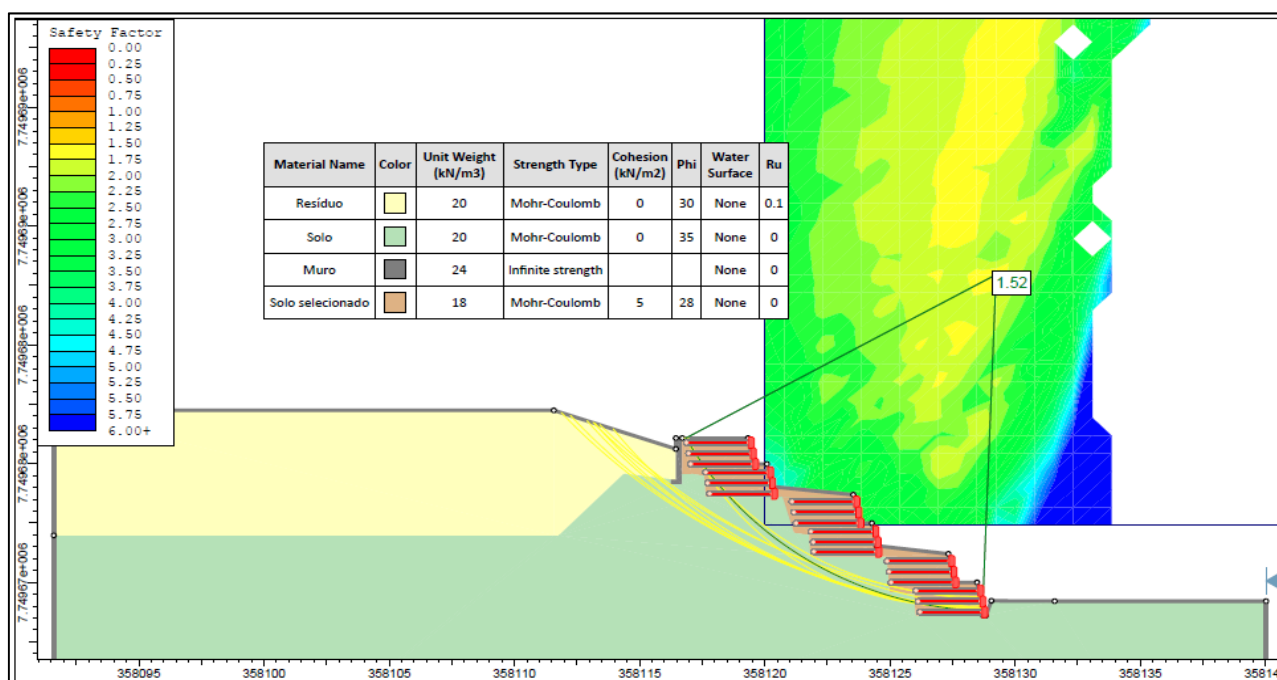


Figura 7. Análisis de estabilidad global de la sección más crítica utilizando geomallas de poliéster

Debido a la complejidad e importancia del proyecto, era importante garantizar que las geomallas PET posean características mínimas que aseguren su durabilidad a largo plazo en el momento de la adquisición del material. Por tanto, fue incluido, además de la resistencia a tracción y elongación, valores de peso molecular (MW) y grupo carboxilo (CEG) dentro de las especificaciones técnicas ejecutivas. Específicamente la "National Concrete Masonry Association" (NCMA, 2014) recomienda que las fibras de poliéster usadas para la fabricación de geomallas de refuerzo para proyectos de largo plazo deberían tener una cantidad de CEG menor a 30 mmol/kg, determinado de acuerdo con ASTM D7409, y MW mayor que 25.000 g/mol, determinado por correlación usando la viscosidad inherente de acuerdo con la ASTM D 4603.

## 4. PROCESO CONSTRUCTIVO

### 4.1. Muro de suelo reforzado

Antes del inicio de la construcción del muro, la fundación fue nivelada y compactada a 95% de normal para evitar problemas con asentamientos diferenciales. En la Figura 9(b) podemos ver uno de los ensayos de compactación que fueron realizados a cada 10 metros.

Debido a que las geoceldas HDPE poseen 0,15 m de altura, las capas de compactación eran realizadas a cada 0,15m, facilitando así el proceso constructivo. Para garantizar la compactación adecuada de la arcilla fue utilizado un rodillo compactador tipo pata de cabra en la parte posterior del muro, y para compactar el material en el interior de las geoceldas fue utilizado un compactador manual de pequeño porte, para que la vibración y fuerza generada por la compactación no deformara la fachada en geoceldas. La Figura 9(b) presenta los equipos utilizados para la compactación del relleno reforzado.

Para la superposición de las geoceldas fue considerado un desfase de aproximadamente 0,20 metros, generando así una inclinación de aproximada 1,0H:5,6V en la fachada del muro. Ese desfase permitirá la incorporación de vegetación entre los varios niveles de geoceldas HDPE, tornándose así una solución verde, totalmente integrada al medio ambiente y

consecuentemente más atractiva. La Figura 10 presenta el aspecto del muro con fachada en geoceldas casi alcanzando su altura final.



**Figura 9.** (a) Ensayo de compactación en la fundación del muro (b) Equipos utilizados para la compactación.



**Figura 10.** Muro con fachada de geoceldas rellenas con suelo.

Por tratarse de un muro de suelo reforzado, este necesita de un sistema de drenaje eficiente, que garantice la eliminación de toda filtración de agua pluvial antes que esta pueda generar alguna sub-presión en la parte posterior del muro. En este contexto, fue dimensionado un sistema de drenaje compuesto por una zanja de drenaje rellena con piedra y recubierta con un geotextil no tejido de polipropileno. Para facilitar la conducción del flujo captado fueron considerados tubos corrugados de HDPE, ya que al poseer paredes internas lisas consiguen conducir el líquido más rápidamente y con menos pérdidas a lo largo de sistema de evacuación. Otra ventaja de los geotubos corrugados de HDPE es su alta capacidad de soportar cargas, característica derivada de la estructura de sus paredes externas, que por ser corrugadas consiguen disipar las tensiones



actuantes sobre ellos hacia el suelo lateral.

#### 4.2. Cobertura Final

Para el cierre adecuado del depósito de residuos era necesario dimensionar un sistema que aisle completamente el material almacenado a largo plazo, impidiendo la entrada de agua en el sistema y consecuentemente la contaminación de las áreas próximas al depósito de residuos. Buscando un material para ejercer la función de barrera hidráulica, fue usada una geomembrana de HDPE, que posee valores de permeabilidad muy bajos, ejerciendo así muy bien la función de agente confinante de fluidos y sólidos. Para este caso fue considerada una geomembrana con espesor de 2,00 mm con ambos lados texturados. Las superficies texturadas fueron proyectadas para aumentar la fricción entre la geomembrana y la superficie de contacto así como con el material de cobertura. La Figura 11 presenta el proceso de instalación de la geomembrana sobre el depósito.



**Figura 11.** Proceso de instalación de la geomembrana sobre el depósito de residuos.

A pesar de los residuos ser en su mayoría polvos y materiales arenoso resultado del proceso de alto horno de la Arcelor Mittal, existía la posibilidad de ese material contener algunas partículas puntiagudas que podrían dañar la geomembrana, comprometiendo así su hermeticidad, por tanto, fue instalada previamente una capa de geotextil no tejido de 300 gr/m<sup>2</sup> para protección mecánica de la misma. La Figura 12 presenta el resultado final del proceso de instalación de la membrana.



**Figura 12.** Depósito completamente cerrado e impermeabilizado



Sobre la geomembrana de HDPE, con la finalidad de acelerar el proceso de drenaje superficial, fue considerada una capa de geocompuesto drenante. La figura 13 (a) presenta la instalación del geocompuesto drenante. El geocompuesto drenante, por poseer un interior compuesto por una geonet rígida de HDPE, consigue generar canales con alta capacidad de transporte de fluidos. Todo fluido captado por el geocompuesto era direccionado para un sistema de drenaje superficial, donde a través de canaletas de concreto serían encaminados para los puntos más bajos del área del depósito para su posterior eliminación.



**Figura 13.** (a) Capa de geocompuesto drenante instalado (b) Suelo de cobertura ya instalado.

Finalmente fue considerada una capa de suelo de 0,40 m de espesor cubriendo toda el área del depósito. Esa capa de suelo fue calculada para cumplir con dos funciones principales. La primera sería de protección mecánica para todo el sistema de geosintéticos que fueron previamente instalados, y segunda para posibilitar la vegetación de toda el área, pudiendo así integrar todo el cierre del depósito de residuos al medio ambiente y presentar un aspecto visual más agradable. La figura 13 (b) presenta la cobertura de suelo colocada y nivelada, lista para recibir la vegetación.

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta un caso de obra de éxito donde se envuelve la instalación de varios tipos de geosintéticos y aplicaciones en un mismo local, desde geomallas y geoceldas para un sistema de muros de suelo reforzado hasta geomembranas y geocompuestos drenantes para impermeabilización y conducción de líquidos. El mismo también tuvo como objetivo mostrar que es posible el uso de suelos tropicales en substitución a suelos granulares para la ejecución de muros de suelo reforzado cuando exista la escasez de los mismos en los locales de obra, sin que para eso se tenga que sobredimensionar la estructura o trabajar con factores de seguridad y reducción muy altos que puedan comprometer la viabilidad de la obra.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Carter, L.; Bernardi, M. (2014): "NCMA's Design Manual for Segmental Retaining Walls". National Concrete Masonry Association. Geosynthetic Magazine ([www.geosyntheticmagazine.com](http://www.geosyntheticmagazine.com)), 4 p.

Christopher, B. R., Gill, S. A., Giroud, J. P., Juran, I., Scholsser, F., Mitchell, J. K. & Dunncliff, J. (1990): "Reinforced Soil Structures, Volume I. Design and Construction Guidelines". Federal Highway Administration, Washington D.C. Report No. FHWA-RD-89-043, Noviembre, 287 pp.

Ehrlich, M. & Azambuja, E. (2003): "Muros de Solo Reforçado". 4º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos; 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre. 81 – 100 pp.

Ehrlich, M. & Becker, L. (2011): "Muros e Taludes de Solo Reforçado – Projeto e Execução". Oficina de textos. 126 pp.