



CASO DE OBRA: TUBOS CORRUGADOS HDPE PARA USO COMO ALCANTARILLAS EN ACCESOS DE CAMIONES MINEROS

Autor¹: Ing. Carlos Antonio Centurión
Gerente Técnico
Tecnologia de Materiais do Brasil - TDM Brasil
ccenturion@tdmbrasil.com.br

Autor²: Prof. Dr. Fernando H. M. Portelinha
Coordinador del Laboratorio de Geotecnia
Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR
fportelinha@ufscar.br

Autor³: Ing. Wladimir Caressato Junior
Ingeniero de Proyectos
Tecnologia de Materiais do Brasil - TDM Brasil
wcaressato@tdmbrasil.com.br

RESUMEN

Las más grandes minas a cielo abierto de Brasil utilizan camiones de magnitudes colosales para remover grandes cantidades de material en sus operaciones de explotación minera, buscando una elevada producción y reducción en costos por tonelada de mineral. Estos camiones poseen una gran capacidad de carga y pueden superar las 600 toneladas cuando son totalmente cargados. Debido a la gran importancia que estos camiones representan para la rentabilidad de la operación minera, es necesario mantener los caminos mineros estables inclusive en periodos climáticos adversos. El principal desafío abordado en el presente trabajo era encontrar una alternativa a los convencionales tubos de concreto armado para uso en alcantarillas que, al poseer longitud extremadamente pequeña, altísimo peso, alto porcentaje de pérdida por daños, complicado manoseo e instalación, paralizaban el tránsito de estos camiones gigantes por períodos prolongados generando pérdidas cuantiosas principalmente en épocas de lluvia. La complicación en la búsqueda de una alternativa al concreto fue mayor cuando la seguridad de la mina, por tratarse de un trabajo a ser realizado dentro de zanjas de más de 1,20m de profundidad, calificó el trabajo como de "espacio confinado", bloqueando el ingreso de personas y equipos hasta no tener las paredes de las zanjas completamente apuntaladas. Si a eso se le sumaba la imposibilidad de usar equipos de compactación, el tiempo de accesos cerrados era significativamente mayor. Este trabajo presenta, por tanto, el análisis realizado al material de relleno disponible, una arena residual del proceso de fierro, y como tales características, sin efecto de compactación, fueron incluidas junto con las cargas de los camiones gigantes en las fórmulas de la AASHTO LRFD y posteriormente en el software PLAXIS V8 de esfuerzo deformación, con la finalidad de verificar la resistencia del conjunto suelo-geotubos de HDPE en esta aplicación y presentarla como una alternativa viable a los tradicionales tubos de concreto. Los resultados no pudieron ser más alentadores, pues aparte de soportar las cargas de proyecto, la longitud y poco peso de los geotubos corrugados de HDPE eliminó el uso de apuntalamientos instalando los geotubos directamente con retroexcavadoras desde fuera de las zanjas a una velocidad extremadamente alta, permitiendo la excavación, instalación de los geotubos y cierre de las alcantarillas de más de 36m de longitud en apenas 2 días.

1. INTRODUCCIÓN

Las principales minas a cielo abierto de Brasil utilizan camiones con elevada capacidad de carga llamados de "off road", buscando elevada producción y reducción de costos por tonelada de mineral. Esos camiones, con capacidad para más de 240m³ de mineral, poseen más de 7 m de altura y pueden superar las 620 toneladas totalmente cargados. Debido a la gran importancia que estos camiones representan para la operación minera, y por las complicadas condiciones climáticas donde normalmente ellos operan, existen áreas dentro de las

minas encargadas del mantenimiento y operación de las vías y accesos, cuyos ingenieros se preocupan en mantener tales accesos estables y en buenas condiciones de circulación para evitar pérdidas de productividad.

Específicamente en la parte de drenaje, el principal problema del equipo de mantenimiento era buscar opciones para construir alcantarillas de la forma más rápida posible y de alta resistencia a las tensiones verticales y horizontales, en sustitución a los tubos de concreto reforzado que, con más de 2,50m de suelo de cobertura, longitud extremadamente pequeña, altísimo peso, alta porcentaje de pérdida por daños, complicada manipulación e instalación, generaban constantes paralizaciones en el tránsito de los vehículos “off road” debido al cierre de vías por períodos prolongados onerosos que generaban pérdida de eficiencia en la operación minera. Dentro de este contexto, el uso de geotubos de HDPE corrugado fue considerado como la mejor opción para este tipo de problemas por presentar alta durabilidad, elevada resistencia a la abrasión, facilidad de instalación y, principalmente, por ser “flexibles”.

La seguridad y economía en tubos enterrados en grandes profundidades pueden ser más fácilmente alcanzados con la reducción de tensiones geo-estáticas debido al efecto de arco del suelo. La investigación pionera de Marston & Anderson (1913) demostró que las tensiones que llegan a una estructura enterrada son afectadas por las características del suelo de relleno, la geometría de la zanja de excavación, la condición de instalación y, principalmente, por la rigidez del tubo enterrado. Posteriormente, el mayor avance en tubos enterrados fue generado por la investigación de Spangler (1950) que demostró el importante papel de la deformación relativa entre el prisma de suelo sobre la estructura y el suelo exterior al prisma de deformación. El autor describe que las tensiones geo-estáticas en el tope del tubo enterrado reducen significativamente cuando las deformaciones verticales del suelo en la cresta del tubo son mayores que la deformación en el suelo adyacente a la proyección del tubo, causando una alteración radical en la distribución de tensión en el tubo, lo que es atribuido al fenómeno de arco positivo de Terzaghi. Ese tipo de fenómeno puede ser alcanzado con el uso de un tubo más flexible o por la técnica de la zanja inducida, en que un material más compresible es posicionado en el tope de una estructura enterrada rígida (Figura 1).

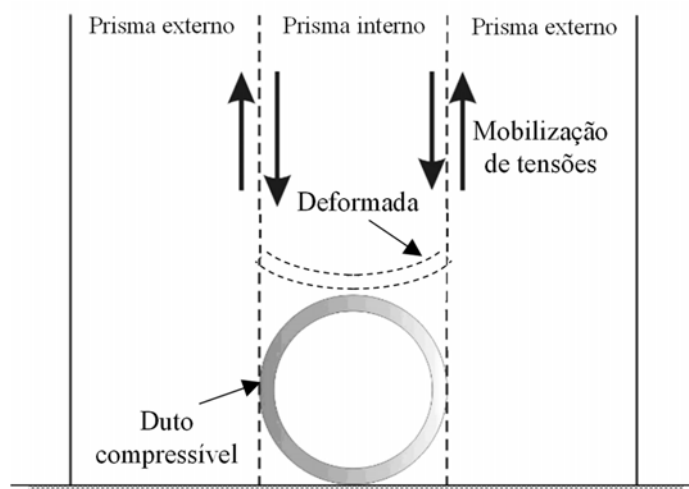


Figura 1. Fenómeno de arco positivo en tubos flexibles.

El presente trabajo muestra aplicaciones de los geotubos corrugados de HDPE flexibles enterrados para fines de operación minera. Este artículo aborda relatos de aplicaciones, así como análisis y consideraciones de proyecto sobre el uso de geotubos y su influencia en la redistribución y reducción de tensiones debido al fenómeno de arco positivo de suelos.

2. EL PROBLEMA

La obra descrita fue ejecutada en la ciudad de Belo Horizonte (Minas Gerais/Brasil), donde geotubos de HDPE fueron utilizados para construir alcantarillas en vías de camiones de alta capacidad de carga. Los camiones de alta capacidad consisten en vehículos de transporte de mineral que presentan elevada capacidad de almacenamiento y, por consecuencia elevadísimo peso que no permitiría el tránsito en carreteras tradicionales.

Por esta razón, estos camiones son llamados de “*off road*”. Estos camiones, con capacidad de más de 240m³ de mineral, poseen 7,70 m de altura y pueden presentar cargas de hasta 620 toneladas cuando son totalmente cargados (Figura 2). Las alcantarillas por donde pasan los camiones presentaban diferentes alturas de relleno, siendo bastante elevadas, lo que también generaba tensiones elevadas sobre los tubos enterrados.



Figura 2. Camión CAT 793D comúnmente usado en la minería brasileña a cielo abierto.

En el sector de minería, los procesos de infraestructura y mantenimiento son dinámicos e impredecibles, debido a la rápida actuación que se debe tener cuando se presentan daños en accesos por lluvias o deslizamientos, y son mediamente predecibles cuando deben ser generados accesos diariamente debido a los constantes cambios de los puntos de extracción. Todo con la finalidad de mantener las vías (*haul roads*) en estado adecuado de tráfico para los camiones “*off road*”. Atender las exigencias mínimas de esos camiones no es simple debido a la altura y elevado peso de los mismos. Cada paralización de tráfico de esos camiones por mantenimiento de vías o, la simple reducción de velocidad por inadecuado drenaje de los accesos, significan millones de dólares por año en pérdidas para la compañía minera.

Específicamente en los sistemas de drenaje, ingenieros mineros de esas áreas tenían dos grandes problemas: (a) Usaban los típicos tubos de concreto armado espiga-campana de 1,00m de longitud y hasta 1.500mm de diámetro para construir sus alcantarillas. Con esos materiales estos trabajos eran especialmente demorados debido al alto tiempo que consumía la manipulación de tales tubos, agravado por la mínima longitud que ellos poseen; (b) El proceso de instalación era realizado con equipos pesados y personal de apoyo que necesariamente tenían que entrar en las zanjas escavadas para completar la instalación de los tubos de concreto. Este proceso generaba conflicto con el área de seguridad de la mina pues, al necesitar de zanjas profundas para recibir los tubos de concreto de 1,50m de diámetro, ese servicio calificaba como “trabajo en espacio confinado” y los trabajadores no podían ingresar sin un confinamiento lateral o apuntalamiento previamente instalado y menos con equipos mecánicos izando tubos pesados sobre o al lado de ellos.

3. PROPOSTA DE SOLUCIÓN

Habiendo descartado soluciones típicas como tubos corrugados de acero montados en campo, por la demora en el proceso de instalación y limitada eficiencia hidráulica por las corrugas internas, o como los tubos de HDPE lisos con clasificación SRD, por el alto peso de manipulación y necesidad de ser soldados en campo (lo que ocasionaba más problemas si los comparamos con los tubos de concreto), el área de operaciones de la mina aceptó como solución final los geotubos de doble pared en HDPE tipo ADS N-12 debido a su poco peso: 36 kg/m para diámetro de 1.050mm y 68 Kg/m para 1.500mm, su gran longitud de 6,00m por barra y a su alta eficiencia hidráulica, durabilidad y resistencia a la abrasión, por ser fabricados en HDPE con interior liso. Imágenes de los geotubos en la fábrica y obra son presentadas en la Figura 3.



Figura 3. Fabricación y disposición en obra de los geotubos PEAD corrugados.

Conscientes que los geotubos corrugados de HDPE han sido utilizados con éxito cuando fueron instalados cumpliendo las recomendaciones de ASTM en carreteras y ferrovías, y que metodologías de cálculo como AASHTO asume el uso de suelos homogéneos instalados con procesos controlados de compactación, fueron analizadas en combinación con el equipo técnico de la mina, todas las condiciones críticas que limitarían el desempeño de esta tecnología. Las dos principales fueron: (a) los materiales disponibles para relleno de las zanjas eran arcillas, arenas finas resultantes del proceso de ciclonado, arenas gruesas denominadas “jigue” y una combinación con material de mayor diámetro denominado “itabirito”. Ninguno de ellos clasificado como CLASE 1 de acuerdo con ASTM D2321; (b) limitada posibilidad de entrar en las zanjas excavadas con el equipo de apoyo, lo que por consecuencia significaba, ninguna posibilidad de colocar equipos de compactación que permitiesen alcanzar niveles de compactación en la energía de PROCTOR normal recomendado por AASHTO.

Después de realizar ensayos de caracterización en laboratorio, fue definido usar el material denominado “Jigue”. Ese material podía ser clasificado como CLASE 2 de acuerdo con ASTM D2321 y permitió alcanzar altas densidades simplemente con ser lanzado dentro de la zanja. Con la caracterización del material fue posible aplicar la sección 12 del procedimiento de AASHTO para cálculo de puentes denominado LRFD (*Load Resistance Factor Design*) para determinar el espesor inicial de relleno de cobertura a ser colocado como mínimo sobre los geotubos de HDPE para que puedan soportar las más de 600 toneladas de los camiones “off road” sin sufrir tensiones internas que superen las máximas admisibles del polietileno de alta densidad ni tampoco supere el 5% de deformación máxima limitada por el fabricante para mantener la estanqueidad de las juntas de tipo espiga-campana. De esta forma, la deformación límite vertical de 5% debía ser respetada para mantener las condiciones operacionales de los geotubos. La Figura 4 ilustra el criterio de deformación adoptado en este proyecto.

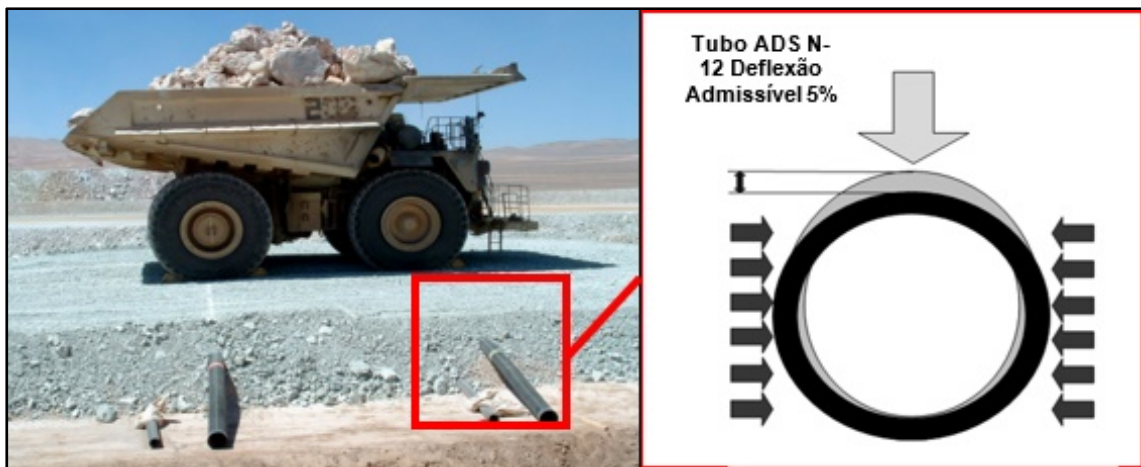


Figura 4. Criterio de deformación considerado en los cálculos.

En este proyecto específico fueron usados tubos de 42" (1.050mm) de diámetro interno. El espesor mínimo de relleno colocado sobre la cresta del geotubo fue calculada en 1,85m, resaltando que el método de AASHTO LRFD (2012) considera parámetros fijos para materiales clasificados conforme ASTM D2321 y con niveles de compactación conocidos o verificables. Con eso, análisis complementarios utilizando un modelo en elementos finitos usando el software PLAXIS V8 fueron necesarios para verificar si la presión transmitida al geotubo por los "off road" generaba una deformación menor a 5% usando los valores del material "jigüe" obtenidos en laboratorio. Las propiedades del tubo de HDPE de 1.050 mm (42") usados en los análisis son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del geotubo de HDPE con 42" (1.050mm) de diámetro

Propiedad	Norma	Valor
Rigidez a 5% de deformación	ASTM D2412-11	140 kN/m ²
Deformación vertical	ASTM D2412-11	40% (sin cualquier daño)
Impacto	ASTM D2444-99	130 Joules con 6 golpes

Con el conjunto suelo-geotubos dimensionado usando material disponible en la mina, fue iniciada la construcción de un trecho de prueba inicial de aproximadamente 36,00m de longitud para verificar los cálculos realizados y comprobar que podía ser superado el segundo desafío, es decir, instalar los geotubos sin ingresar en la zanja excavada.

4. INSTALACIÓN Y SEGUIMIENTO



Figura 5. Instalação das seções de PEAD sem auxílio manual conforme requerido pela segurança da mina.

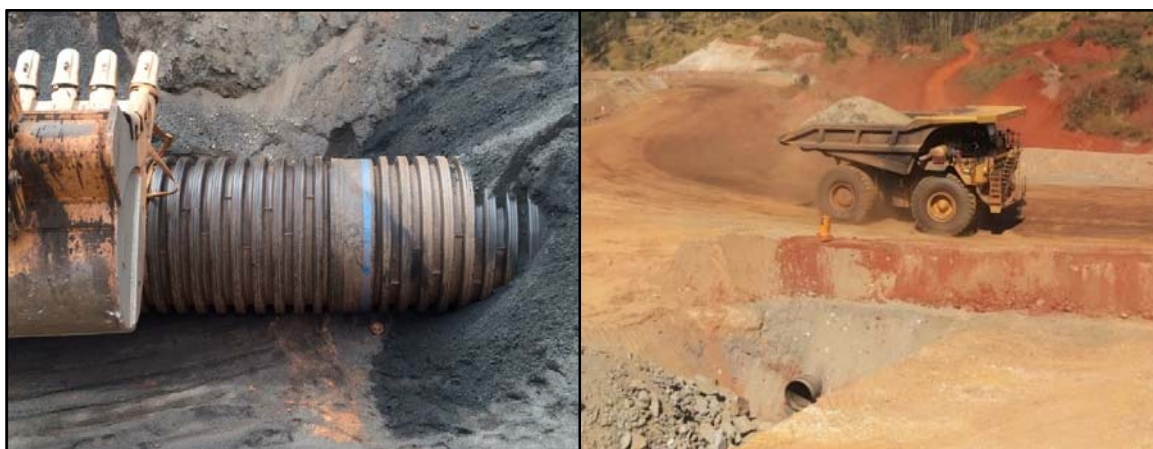


Figura 6. Conexión usando retroexcavadora y obra finalizada funcionando perfectamente.

La instalación inició con la excavación de la zanja y la colocación de una cama de “jigue” de aproximadamente 15,00cm (Figura 5) como capa de nivelación para los geotubos corrugados de HDPE. Posteriormente, la primera barra de 6,00m de geotubo fue posicionada y fijada mecánicamente con el mismo “jigue” colocado sobre ella. La segunda barra fue encajada en la primera ya fija con “jigue”, con el uso de una retroexcavadora y cintas de poliéster. El proceso de instalación resultó ser más simple de lo imaginado, con operadores de retroexcavadoras experimentados se consiguió instalar los geotubos corrugados HDPE sin presencia de personal de apoyo dentro de la zanja de drenaje conforme requerido por el cliente. Se tomó cuidado en instalar el material de relleno de la zanja en camadas y “compactando” con la “pala” de la retroexcavadora para intentar acomodar y densificar lo máximo posible el “jigue” dentro de la zanja y principalmente a los lados del geotubo de HDPE.

Importante recalcar que el uso de metodologías de cálculo conocidas permitió proponer el uso de los geotubos en una aplicación fuera del padrón convencional de carreteras o ferrovías con un buen desempeño. Sin embargo, es importante indicar que las metodologías convencionales no contemplan el fenómeno de arco positivo al utilizar geotubos flexibles. Por tanto, el tópic a continuación compara las metodologías con y sin efecto de arco positivo que permiten entender porque el uso de geotubos presenta un desempeño superior que estructuras rígidas de concreto.

5. EFECTO DE ARCO POSITIVO CON USO DE TUBOS FLEXÍVEIS

La influencia de la rigidez del tubo fue estudiada con el uso del método de elementos finitos. En este trabajo esos análisis fueron realizados usando el software comercial PLAXIS V8. En el software se simuló un tubo enterrado considerando el tubo instalado sobre 15 cm de “jigue” y debajo de 1,85 m del mismo material calculado conforme AASHTO LRFD. Sobre este último material, fue considerado un relleno adicional de 1,5 m totalizando una altura de cobertura de 3,35 m. Este aumento de espesor de suelo de cobertura de 1,5m fue utilizado para compensar variaciones en las cotas y geometría del proyecto. Como esto generaría mayores tensiones aplicadas al geotubo, el análisis estaría de lado de la seguridad.

Sobre el relleno fue aplicada a carga del camión “off road” usando una carga equivalente distribuida generando 800 kPa de tensión.

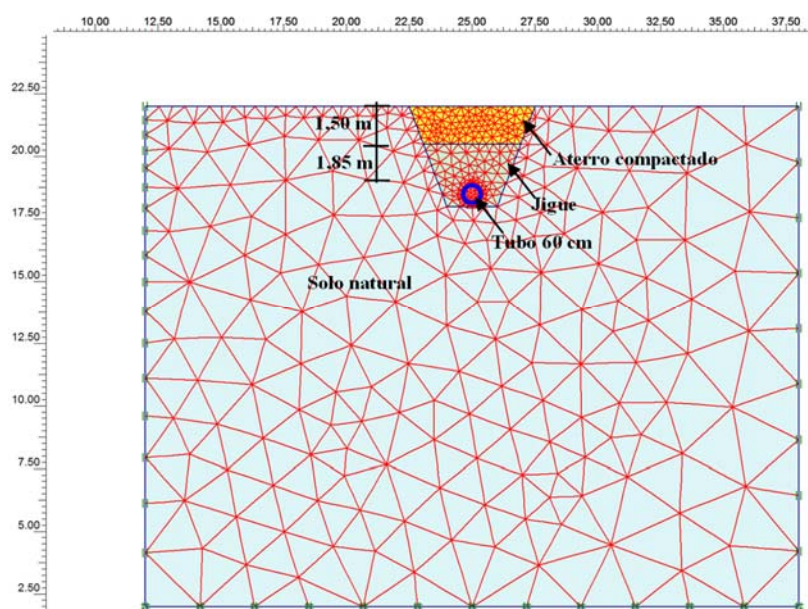


Figura 7. Malla adoptada para análisis de elementos finitos.

En la Figura 8 se muestran las tensiones verticales que llegan a la cresta del tubo enterrado tanto para el caso de tubo flexible (Figura 8a) como para el caso de un tubo rígido (Figura 8b). La tensión máxima que llega en la cresta del geotubo flexible es de 15 kPa, mientras que para el tubo rígido la tensión es más que el doble,

llegando a valores próximos de 40 kPa. Es evidente que, para el geotubo flexible, la tensión vertical en la cresta es mayor que la tensión aplicada al tubo rígido, lo que es atribuido al efecto de arco del suelo. Es evidenciado adicionalmente, que el efecto de arco positivo puede también disminuir significativamente los valores de tensiones laterales en el tubo, conforme se presenta en la Figura 9.

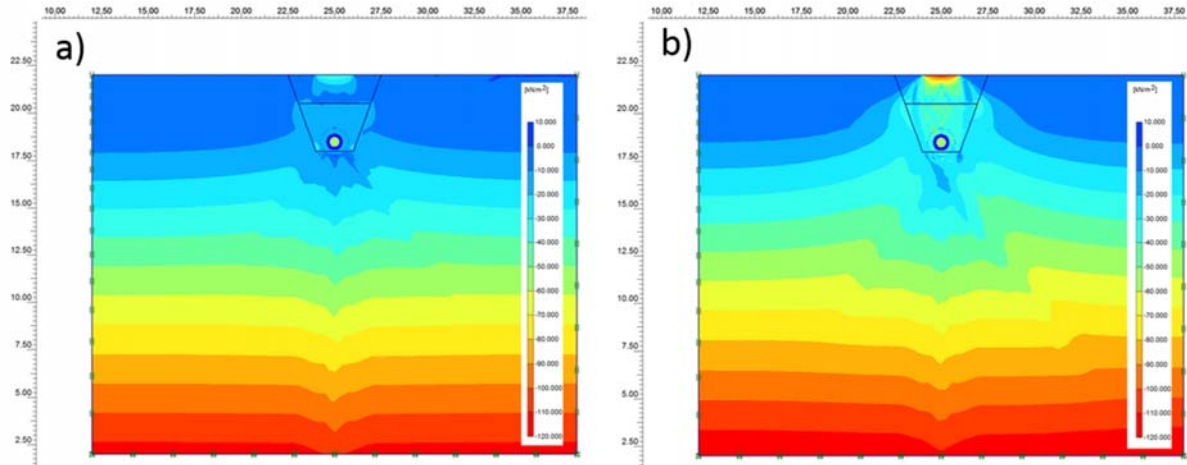


Figura 8. Distribución de tensiones verticales en los tubos enterrados: (a) flexible; (b) rígido.

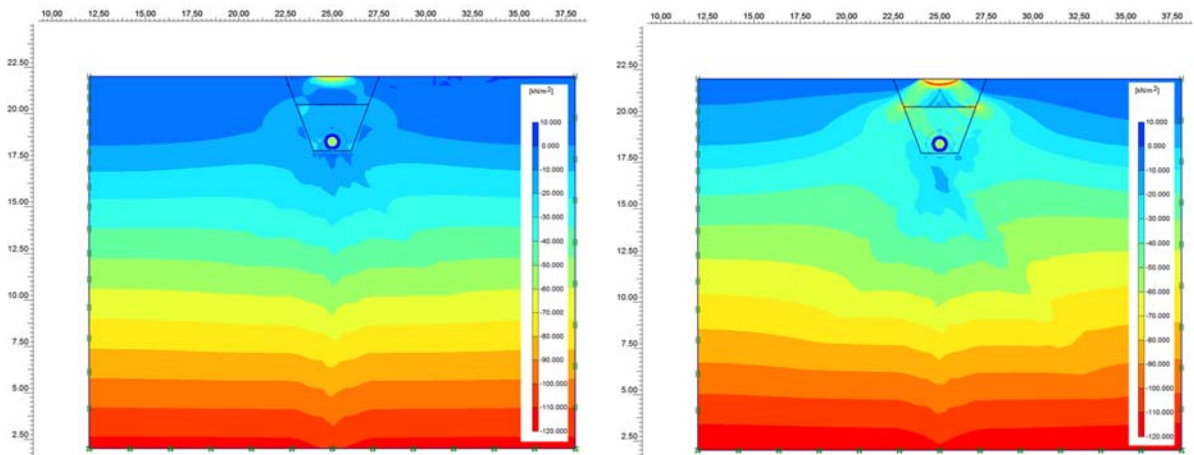


Figura 9. Distribución de tensiones horizontales en los tubos enterrados: (a) flexible; (b) rígido.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que el uso de tubos geosintéticos (geotubos) de grandes diámetros se presenta como una técnica que viabiliza la rápida ejecución de alcantarillas en minería, por permitir una fácil disposición dentro de las zanjas y por agilizar de forma significativa el proceso de construcción de las líneas de drenaje. El hecho de trabajar con barras más largas, leves y flexibles torna el trabajo de instalación mucho más práctico y evita la paralización de los grandes equipos de transporte en las actividades de minería. Dentro de este contexto de eficiencia técnica, se comprobó en este proyecto que el uso de tubos flexibles consigue accionar el efecto de arco positivo de Terzaghi resultando en tensiones inferiores a aquellas que se generan en tubos rígidos. Los resultados numéricos realizados mostraron que la reducción de las tensiones horizontales y verticales pueden ser significativas alcanzando hasta 60%.



7. REFERENCIAS

AASHTO LRFD (2012). Bridge design specifications. American Association of State Highways and transportation officials.

ASTM D2321 (2014). Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pipe for Sewers and Other Gravity-Flow Applications, 12p.

ASTM D2412-11 (2011). Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading, 7p.

ASTM D2444-99 (2010). Standard Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight), 9p.

MARSTON, A.; ANDERSON, A.O. (1913). The Theory of Loads on Pipes in Ditches: And Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe. Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts.

SPANGLER, M. G. (1950). Field measurements of the settlement ratios of various highway culverts. Transportation Research Board.