

Fundación de patios de materiales a través de columnas encamisadas con geotextil y refuerzo geosintético horizontal en suelos de baja capacidad de soporte: Experiencia de caso

Foundation of stockyards with geotextile encased columns and horizontal basal reinforcement over extremely soft soils: Case study

Dimiter Alexiew; Edwin Fernando Ruiz; Daniel Fernandez Arnáu

HUESKER Synthetic GmbH, Gescher, Alemania; HUESKER Ltda., São José dos Campos, SP, Brasil
fernando@huesker.com.br

Resumen

En el área litoral del estado de Rio de Janeiro-Brasil, la empresa ThyssenKrupp-CSA encomendó la construcción de una nueva planta de acero, iniciativa desarrollada entre los años 2006 y 2010. El proyecto incluía un patio de materiales compuesto por las pilas de disposición y las respectivas pistas para la operación de las máquinas de apilamiento y recuperación. El subsuelo del área de implantación consistía en depósitos de suelos blandos saturados de baja capacidad portante con espesores de hasta 20 metros. Dada la complejidad geotécnica del proyecto sumada a las exigentes condiciones de operación de la planta, se proyectaron una serie de soluciones geotécnicas para garantizar la estabilidad y la condición de servicio de los patios y de las pistas. La solución optimizada tanto técnica como económicamente consistió en la colocación de refuerzos geosintéticos de alta rigidez en la base de la zona de acopio de carbón y coque combinados al uso de drenes verticales. Para la región central (área de operación de las maquinas recuperadoras) fue concebido un sistema de fundación mediante columnas granulares encamisadas con geotextil trabajando en conjunto con una plataforma portante conformada por geosintéticos de refuerzo de alta tenacidad. Este artículo describe los elementos principales del sistema de fundación utilizado en el proyecto y las principales variables de diseño involucradas. Son presentados brevemente algunos resultados del programa de instrumentación que ratificaron la aplicabilidad de las soluciones y la factibilidad de la metodología de diseño y técnicas constructivas utilizadas.

Abstract

At the seashore area of Rio de Janeiro state - Brazil, ThyssenKrupp Steel (TKCSA) requested the construction of a new steel plant, initiative developed between 2006 and 2010. The project included a stockyard compounded by raw materials stockpiles as well as the runways for the so called stacker/reclaimers. The entire area consists of saturated soft soils deposits of very low bearing capacity with thickness of up to 20 meters. Due to the geotechnical complexity of the project and the demanding required operation conditions of the plant, a set of geotechnical solutions were studied in order to guarantee both stability and serviceability of the stockpiles and runways. The optimum solution in terms of technical and economical aspects consisted in the placing of high stiffness geosynthetic reinforcements in the base of coal and coke stockpiles combined with the of vertical drains. For the central area (stackers/ reclaimers runways) was considered a foundation system in geotextile encased columns (GEC) in combination with a high tenacity geosynthetic reinforced bearing platform. This article describes the main elements of the foundations solutions used in this project and the principal design concepts involved. Some of the instrumentation program results are shortly presented, confirming the applicability of the solutions and the suitability of the design methods and construction techniques implemented.

1 INTRODUCCIÓN

En la bahía de Sepetiba, línea costera del estado de Rio Janeiro, Brasil, se encuentra en operación la nueva planta de acero del grupo TKCSA (ThyssenKrupp Steel – CSA; Companhia Siderúrgica do Atlântico), considerada la mayor inversión privada de la última década en el país y marco mundial de la ingeniería con geosintéticos para el refuerzo de suelos. Destinada a la producción de 5 millones de placas de acero por año, la planta incluye una serie de estructuras especiales, ocupando un área total de 9 km².

Como parte fundamental de la infraestructura necesaria para su operación, se requería de la adecuación de zonas especiales para la disposición y manejo de materias primas (*stockyards*), principalmente carbón y coque. El área total proyectada para la construcción de estos patios era de aproximadamente 380.000 m². El subsuelo del área de implantación del proyecto está compuesto por suelos arcillosos blandos de muy baja capacidad portante y de espesores de hasta 20 m, subyacentes por estratos de arena compacta y roca. Con base en los niveles de producción requeridos, se estimó una altura para las pilas de materiales de 13 m, significando una sobrecarga de más de 100 kN/m² a ser aplicada sobre el terreno. Adicionalmente, era necesaria la construcción de ferrovías especiales (pistas) para la operación de las máquinas de apilamiento y recuperación de materiales (*stacker/reclaimers - S/R*), similares a los excavadores de gran porte utilizados en minería a cielo abierto (Fig. 1).

En el presente artículo son presentadas las diferentes soluciones de fundación consideradas para el patio de disposición de carbón/coque y para las pistas de operación de los apiladores mecánicos, proyectadas sobre condiciones geotécnicas extremadamente desfavorables.

2 CONDICIONES GEOTÉCNICAS

Como se mencionó anteriormente, el subsuelo del área está compuesto mayoritariamente por estratos profundos de suelos de baja capacidad de soporte saturados, teniéndose un perfil compuesto por una capa superficial de arcilla blanda con espesor aproximado de 10 m, seguida de una capa relativamente delgada de material arenoso, subyacente por otra capa de suelos muy blandos que llegan 20 m de profundidad.



Figura 1. Esquema general de la planta de acero TKCSA: Pilas de disposición de materiales y pistas para las máquinas recuperadoras.

Arenas de consistencia media a dura y estratos rocosos fueron encontrados entre 30 y 50 m bajo la superficie del terreno. Información más detallada sobre los sondeos y características de los suelos puede ser encontrada en Glockner et al., (2008). El nivel freático se presenta prácticamente en la superficie del terreno, y luego de periodos de lluvias intensas el terreno quedaba parcialmente bajo agua. La capa superficial de suelos blandos saturados de alta plasticidad y normalmente consolidados, con espesor entre 8 m a 10 m, fue considerada como el estrato más crítico desde el punto de vista geotécnico, presentando los siguientes parámetros:

- ◆ Módulo edométrico, E_{edo} , entre 200 y 500 kN/m²,
- ◆ Coeficiente de consolidación vertical, C_v , de 2 a 4×10^{-8} m²/s
- ◆ Coeficiente de consolidación horizontal, C_h , de 4 a 9×10^{-8} m²/s
- ◆ Resistencia al corte no drenada, C_u , entre 5 y 15 kPa.

La baja capacidad portante del terreno y los constantes anegamientos en el área exigieron la construcción de una plataforma de trabajo conformada con arena dragada dispuesta sobre una capa de geotextil tejido de refuerzo constructivo, constituyendo una plataforma con espesor variable entre 1,5 m y 2,0 m. Esta plataforma permitió el acceso seguro del personal de obra y de los equipos de movimientos de tierras. Algunas de las propiedades geotécnicas típicas del perfil obtenidas de la campaña de

ensayos de campo realizada son presentadas en la Fig. 2.

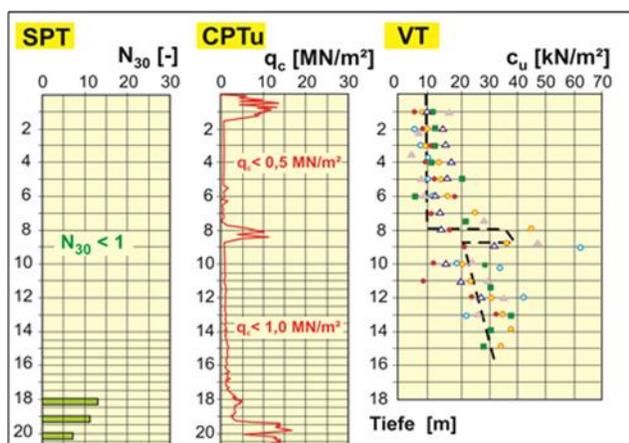


Figura 2. Condiciones geotécnicas típicas del perfil de suelos; el estrato arcilloso superficial identificado con el más crítico es delimitado por el cuadro.

3 SOLUCIONES DE FUNDACIÓN

3.1 Dificultades adicionales

Además de la presencia de suelos blandos problemáticos en el área, se presentaron algunos desafíos técnicos adicionales para el diseño de la fundación de los patios tales como el cambio de forma, geometría y posición de las pilas de materiales con alturas de hasta 13 m, las cuales generaban un proceso de carga y descarga variable en cortos períodos de tiempo debido al rápido proceso de acumulación y remoción de material (sobrecarga sobre el terreno de 0 a 100 kN/m² para el patio de carbón y coque, y mayor a 340 kN/m² para el patio de disposición de mineral de hierro). Lo anterior sumado a la necesidad de restringir las deformaciones de todo tipo en el sistema de pistas para las máquinas de apilamiento y recuperación de materiales, con un peso de hasta 750 toneladas y movimientos de traslación y rotación (cargas excéntricas sobre el terreno). Ver Fig. 3 y Fig. 4.

Los resultados del conjunto de verificaciones preliminares mostraron que tanto la estabilidad local como global calculadas tanto para las pilas de materiales como para las pistas eran insuficientes. De igual forma, los asentamientos (previstos en más de 4 m) y los desplazamientos horizontales estimados se encontraban fuera de los límites aceptables para la operación de los patios.

Las soluciones a ser seleccionadas tenían que considerar no solamente los aspectos técnicos mencionados, sino también los costos de implantación, el tiempo de ejecución disponible de aproximadamente dos años para una área de cerca de 380 mil m², requerimientos particulares para cada zona de patios, aspectos logísticos (equipamientos de construcción y mano de obra capacitada), y disponibilidad de las técnicas constructivas dentro del país para cada uno de los escenarios considerados.



Figura 3. Patios de materiales; arriba (Norte) carbón/coque, abajo (Sur) mineral de hierro/aditivos, Pistas para las máquinas de apilamiento (*stacker/reclaimers*) operando en el sentido Oeste-Este.

3.2 Fundación del patio de disposición de carbón y coque

El proyecto de fundación del patio de carbón y coque fue desarrollado con el objetivo de garantizar la estabilidad local y global, minimizar asentamientos totales y diferenciales, y principalmente, limitar los desplazamientos horizontales de las pistas generados por el empuje lateral provocado por las pilas de materiales en el suelo blando subyacente. Estos desplazamientos podrían colocar en riesgo no solamente la estabilidad a la falla de la estructura sino también el funcionamiento adecuado de las máquinas recuperadoras, de suma importancia para la operación general de toda la planta.

A pesar de que como medida inicial una plataforma granular fue considerada bajo las pistas, estas permanecían bastante sensibles a cualquier tipo de deformación, por lo que fue necesario un número importante de verificaciones de diseño.



Figura 4. Patios de almacenamiento de carbón y coque: pilas de materiales y pistas con las máquinas de apilamiento y recuperación de 750 toneladas operando entre ellas.

Los Estados Límites de Servicio (SLS) y Último (ULS) fueron calculados para diversos formatos y posiciones de las pilas así como de las máquinas recuperadoras, simulando la operación real del patio. De esta forma, fue posible verificar el estado específico que controlaba el diseño en cada de las situaciones en estudio. Fueron utilizadas tanto simulaciones numéricas (FEM - elementos finitos) como análisis por equilibrio límite (i.e. Janbu, Bishop), permitiendo evaluar cada uno de los casos bajo dos perspectivas complementarias de diseño. En algunos casos, fue necesario desarrollar modelos analíticos aproximados dada la complejidad técnica particular y la indisponibilidad de metodologías de cálculo aplicables.

Así por ejemplo, un modelo simplificado para seleccionar las propiedades necesarias de los geosintéticos de refuerzo dispuestos en la base de las pilas con el objetivo de restringir los desplazamientos horizontales del suelo de fundación a los límites aceptables fue utilizado. Esta metodología permitió estimar los esfuerzos laterales bajo las pilas de material, a partir de los cuales fueron calculadas las fuerzas de tracción requeridas en los refuerzos (La Fig. 5. muestra un ejemplo del diagrama de resistencia para uno de los casos analizados). Considerando las curvas de comportamiento en fluencia (curvas isócronas) de los geosintéticos e integrando las correspondientes elongaciones (deformaciones), los desplazamientos horizontales bajo las pistas fueron calculados.

Para la situación mostrada en la Fig. 5. adoptando un refuerzo de alta rigidez axial, el desplazamiento horizontal estimado fue 0,30 m, mostrando un excelente ajuste a los resultados de los análisis numéricos efectuados.

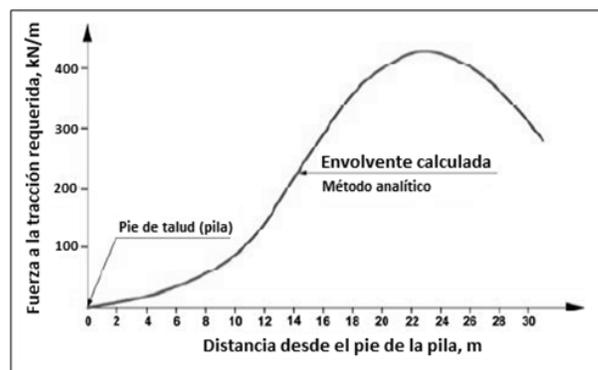


Figura 5. Ejemplo del diagrama de fuerzas de tracción en el refuerzo geosintético generadas por los esfuerzos laterales (*spreading stresses*) obtenido mediante el método analítico.

El conjunto de análisis indicó la necesidad de aplicación de refuerzos geosintéticos ortogonales entre sí en la base de los patios, en las direcciones N-S y O-E (Fig. 3). Las propiedades mecánicas necesarias en los refuerzos (i.e. módulo de rigidez y resistencia a la tracción), calculadas en el corto y largo plazo, resultaron en valores significativamente altos que variaban en función de los tramos en estudio, imposibilitando la utilización de materiales geosintéticos fabricados con polímeros convencionales menos rígidos (i.e. Poliéster o Polietileno), y llevando a la selección de un amplio rango de geosintéticos fabricados en Alcohol Polivinílico (PVA); material polimérico de baja fluencia que permitió controlar las deformaciones de la estructura mediante la movilización eficiente su resistencia a la tracción a bajos niveles de elongación. Alexiew et al., (2000).

De modo general, la solución de fundación adoptada constó de una capa de geotextil tejido de refuerzo y separación de PVA, instalado en toda la extensión de la base de las pilas de disposición de materiales, alineada al eje Norte-Sur, seguida por una capa intermedia de arena compactada de 15 cm de espesor y una capa superior de geogrilla también de PVA, paralela al eje Este-Oeste. Estos materiales presentan resistencias nominales a la tracción entre 500 kN/m y 1.600 kN/m. La Fig. 6 muestra la configuración instalada de refuerzos para la conformación de la plataforma de estabilización.

Vinculada a la disposición de refuerzos horizontales, en las áreas a ser ocupadas por las pilas de disposición de materiales, fueron ejecutados drenes verticales para acelerar el proceso de consolidación de las capas de suelos blandos. No obstante, debido a que los tiempos de

disipación estimados superaban la fecha programada para el inicio de la conformación de las pilas, se consideró un método observacional con base en las medidas obtenidas de un programa de instrumentación instalada en la obra, permitiendo controlar la construcción de las pilas en relación a la altura del acopio y a las variaciones del subsuelo generadas por el proceso de recrecimiento (disipación de excesos de presión de poros, cambio de resistencia al corte no drenada, etc.). Ver Fig. 7.



Figura 6. Instalación de las capas de refuerzos geosintéticos: sentido longitudinal – geogrilla de alta tenacidad de PVA, Sentido transversal – geotextil tejido de PVA con una capa intermedia de arena.

Factores adicionales fueron considerados para la solución final: planos de instalación (paginación precisa de paños de geosintético), producción sobre medida de los refuerzos de forma a reducir costos, rollos de gran extensión para minimizar traslapes en las direcciones de mayor sollicitación, diferenciación y unificación de los tipos de material en obra, elevados coeficientes de interacción, entre otros elementos.

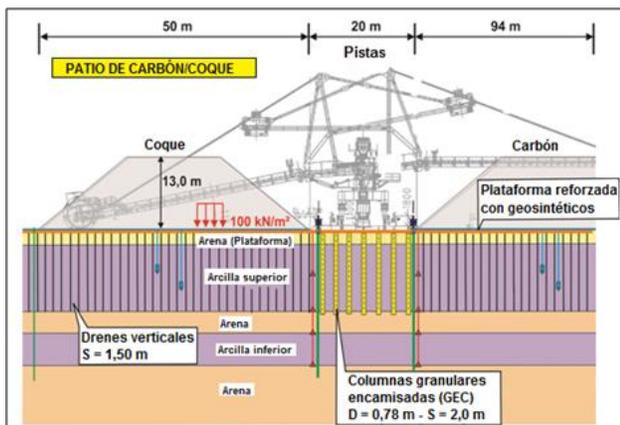


Figura 7. Sección transversal con las soluciones de fundación implementadas.

3.3 Fundación de las pistas de operación de las máquinas de disposición y recuperación (*Stacker/Reclaimers*)

A pesar de que el sistema de fundación compuesto por drenes verticales y refuerzos basales utilizado para la zona de apilamiento de materiales se mostró técnica y económicamente adecuado, esta solución se mostró inviable para la pista de las maquinas recuperadoras.

Las pistas reciben una carga de 750 toneladas correspondiente al peso de los stackers/reclaimers, imponiendo movimientos a lo largo de la carrilera y rotación en el eje perpendicular a la superficie del terreno. Todas las deformaciones, asentamientos totales y diferenciales, rotaciones y desplazamientos horizontales precisaron ser extremadamente limitados para garantizar la adecuada operatividad de estas máquinas. El principal desafío fue el de garantizar la baja deformación luego de un corto período de construcción, aún sin la ejecución de un terraplén de precarga, frente a las elevadas cargas (tanto estáticas como dinámicas) provistas por los equipamientos de apilamiento y recuperación durante la operación de los patios.

La primera alternativa de fundación estudiada consistió en la concepción de un sistema compuesto por pilotes de concreto prefabricados combinados con un refuerzo geosintético horizontal dispuesto en la parte superior de los mismos. Esta solución fue rechazada debido a las presiones laterales significativamente altas que actuarían sobre estos elementos rígidos, los cuales se mostraban altamente sensibles a los momentos y desplazamientos horizontales calculados.

La alternativa encontrada para la construcción de las pistas para las maquinas recuperadoras fue la implantación de un sistema fundación en columnas de arena confinadas por un revestimiento geotextil tejido en formato tubular (GEC por sus siglas en inglés: Geotextile-Encased Columns) Alexiew et al., (2005), generando un sistema con alta rigidez a la compresión, provisto de comportamiento dúctil y autonivelante.

La instalación de las columnas granulares revestidas permitió la estabilización del terreno de apoyo mediante la significativa mejoría en la capacidad portante de toda el área caracterizada originalmente como suelo blando. A pesar de que las columnas son drenantes (el geotextil de refuerzo circunferencial es permeable), la

aceleración del proceso de consolidación no es el mecanismo dominante. Las propias columnas, por presentar rigidez vertical significativamente superior comparada con el suelo blando en el entorno, minimizan la carga transmitida al suelo blando y consecuentemente el asentamiento por consolidación. De esta forma, no sólo se consiguió limitar la magnitud de los asentamientos luego (y durante) la ejecución del acopio, sino también se limitaron los asentamientos de largo plazo. Los asentamientos ocurren, básicamente, debido al equilibrio del sistema, durante el período de recrecimiento constructivo de las pilas de material.

El dimensionamiento estructural del sistema fue realizado con base en el Método de Raithel (Ver Raithel, (1999) y Raithel et al., (2005)), y en las orientaciones de la Recomendación Alemana EBGeo. Especial atención fue dada al comportamiento de largo plazo esperado para las columnas encamisadas sobre el efecto de las elevadas cargas móviles y transitorias impuestas por las apiladoras de material. Conforme fue presentado por Di Prisco et al. (2006), la rigidez de las columnas debe aumentar después de varios ciclos de carga y descarga.

La longitud de las columnas varió de 10 m a 12 m, atravesando la capa más superficial de suelo muy blando y apoyándose directamente sobre el estrato de arena intermediario. El espaciamiento típico entre columnas fue de 2,0 x 2,0 m. El refuerzo geotextil tubular utilizado presentaba resistencias a la tracción nominal en el sentido radial de 200 a 275 kN/m y diámetro nominal de 0,78 m.

Todos los modos de falla analizados requerían de refuerzos geosintéticos biaxiales, por lo que fue adoptado el mismo esquema de disposición considerado bajo las pilas compuesto por dos refuerzos horizontales uniaxiales en la parte superior de las columnas (geotextil tejido de alta tenacidad –PVA– en el sentido transversal, seguido de una capa de arena, y una capa de geogrilla superior (de PVA) en la dirección longitudinal). Esta plataforma portante es responsable por la distribución uniforme de los esfuerzos sobre cada una de las columnas y por garantizar la estabilidad global del sistema.

La Fig. 7 muestra la sección transversal con las soluciones de fundación adoptadas tanto para las pilas de carbón/coque como para las pistas de operación de las maquinas recuperadoras.

4 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

La gran mayoría de las columnas granulares encamisadas fue ejecutada por la propia ThyssenKrupp mediante el método de “desplazamiento del suelo blando”, utilizando martillos vibratorios hidráulicos de la división de fundaciones de la empresa. El hincado de las camisas metálicas temporales se fundamenta en el principio de reducción de la cohesión del suelo a través de la vibración, fluidificando efectivamente el suelo. Cuando el suelo está en esa condición, el peso propio del martillo y la fuerza aplicada son suficientes para el clavado de la tubería metálica de encamisado provisional hasta la profundidad necesaria, de forma rápida y eficiente.

En el proyecto CSA en particular se utilizaron martillos de hasta 11 toneladas, con fuerza centrífuga de 1.430 kN y momento excéntrico de 50 kgm. El equipamiento altamente eficiente garantizó una producción de 30 columnas por día por cada frente de trabajo. El tiempo completo de ejecución de una columna, incluyendo el desplazamiento de la máquina de hincado, llegó a ser de 10 minutos aproximadamente (de 3 a 6 columnas por hora).

Después de hincada la camisa metálica, el geotextil tubular es dispuesto en toda su longitud en el interior de la misma, para luego ser rellenado con material granular con el auxilio de una tolva. En seguida, el martillo vibratorio es nuevamente conectado al cabezal del tubo. Posteriormente, al mismo tiempo en que se extrae la camisa metálica, el martillo vibratorio densifica el material dentro de la columna, completando así el ciclo completo de ejecución.

Para el material de llenado de las columnas se utilizó arena disponible en la región que cumplía con las características granulométricas y de resistencia descritas en la recomendación técnica EBGeo. En esta obra también fueron ejecutadas columnas granulares con grava fina en una extensa área del otro patio de disposición de materiales (patio de mineral de hierro), lo cual sumó ninguna dificultad adicional al proceso constructivo.

Gracias a la presencia del encamisamiento geosintético, fue posible estimar con mayor precisión el consumo de material granular necesario para la ejecución de las columnas, pues se impidió la pérdida de material por formación de bulbos dentro del suelo blando. En adición, el

geotextil tubular evitó la contaminación del material drenante, promoviendo la separación entre la columna granular y el suelo blando, garantizando así la integridad de las columnas frente a las exigentes solicitaciones del proyecto.

En total, fueron ejecutados cerca de 270 mil metros lineales de columnas granulares confinadas con geotextil, e instalados más de 1 millón de metros cuadrados de geotextiles y geogrillas con resistencias a la tracción nominal de hasta 1.600 kN/m como refuerzo horizontal, constituyéndose como la mayor obra de ingeniería con geosintéticos para refuerzo de suelos ejecutada en América del Sur hasta el momento.



Figura 8. Ejecución de las columnas granulares encamisadas (tubería metálica y martillo vibratorio).



Figura 9. Ejecución de las columnas GEC (tolva y retroexcavadora de llenado).

5 CONSIDERACIONES FINALES

Las primeras investigaciones y campañas de monitoreo confirmaron bajos valores de deformación en las pistas de operación y pequeños desplazamientos horizontales en el suelo blando provocados por el peso de las pilas de disposición de materiales. Bajo las pistas de operación, las mediciones de los inclinómetros evidenciaron un mayor efecto de reducción de dichas deformaciones horizontales gracias al uso del refuerzo basal de alta rigidez combinado a la instalación de columnas granulares encamisadas como sistema de fundación (Ver Fig. 10).

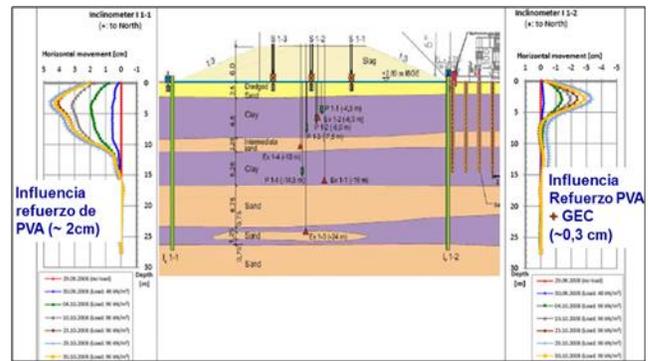


Figura 10. Medidas de desplazamientos horizontales en los pies de los taludes de la pila de materiales (luego de 60 % de consolidación).

Los asentamientos producidos por la ejecución de la plataforma granular se estabilizaron en 3 meses, con valores de hasta 20 cm. La primera operación de un *stacker/reclaimer* (una pasada), con carga de hasta 350 kN/m por carril, causó un asentamiento de apenas 2 cm. Luego de un período de una semana en el que la maquina permaneció estacionada en un mismo lugar con una carga total de 750 toneladas, se observó un asentamiento menor que 3 cm.

La planta de acero ya está en operación hace más de 4 años (a la fecha de esta publicación), durante los cuales las medidas de desempeño obtenidas del programa de instrumentación de campo se han mostrado bastante satisfactorias, comprobando de manera general, que las soluciones, materiales, conceptos y metodologías de diseños adoptadas se mostraron altamente efectivas y adecuadas para las condiciones y desafíos impuestos por el proyecto.

REFERENCIAS

- Glockner A. et al., (2008). Bau eines neuen Stahlwerks auf weichen Sedimentböden nahe Rio de Janeiro – Geotechnische Herausforderungen in ungewöhnlichen Dimensionen, Proc. Deutsche Baugrundtagung, pp. 199-206.
- Alexiew D., Sobolewski J., Pohlmann H., (2000). Projects and optimized engineering with geogrids from „non-usual“ polymers, Proc. 2nd European Geosynthetics Conference, Bologna, pp. 239-244.
- Alexiew D., Brokemper D., Lothspeich S. (2005) Geotextile encased columns (GEC): Load capacity, geotextile selection and predesign graphs, Proc. Geo-Frontiers Conference, 2005, Austin, Texas, pp. 318 – 324.
- Raithel M., (1999). Zum Trag and Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, vol 6.
- Raithel M. et al., (2005). Foundations of constructions on very soft soils with geotextile encased columns - State of the Art, Proc. of the Geo-Frontiers Conference, Austin, Texas, 2005, pp. 401 – 407.
- Recommendations for the Design and Calculation of Soils Reinforced by Geosynthetics EBGeo (2011). German Geotechnical Society, Essen.
- Di Prisco C. et al., (2006) Geo-reinforced sand columns: Small scale experimental tests and theoretical modelling, Proc. 8th International Conference on Geosynthetics 2006, Yokohama, pp. 1685 – 1688.