

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

D. Alexiew

dalexiew@huesker.de

HUESKER Synthetic GmbH, Gescher, Alemania

E. F. Ruiz, C. F. Schmidt & A. Silva

fernando@huesker.com.br, cristina@huesker.com.br & andre@huesker.com.br

HUESKER Ltda., São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMEN: En el área litoral del estado de Rio de Janeiro-Brasil las empresas ThyssenKrupp-CSA encomendaron la construcción de su 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 pistas de las maquina de apilamiento y recuperación. El subsuelo del área de implantación consistía en depósitos de suelos blandos saturados de baja capacidad portante con espesores superiores a 20 metros. Dada la complejidad geotécnica del proyecto sumada a las exigentes condiciones de operación de la planta se proyectaron una serie de soluciones para garantizar tanto la estabilidad como la serviciabilidad 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 a 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.

Palabras clave: suelos blandos - refuerzo geosintético - encamisamiento geotextil - columna granular - patio de materiales

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 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 geosynthetics reinforcements in the base of coal and coke stockpiles combined with 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.

Key Words: soft soils - geosynthetic reinforcement - geotextil encasement - granular column - stock yard

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 consistente 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 carriles especiales (pistas) para el funcionamiento 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.



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

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 hasta los 20 m de profundidad. Arenas consistentes 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 [Ref. 1]. 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 8m a 10m, 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 de refuerzo constructivo HaTe[®], 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 ensayos de campo son presentadas en la Fig. 2.

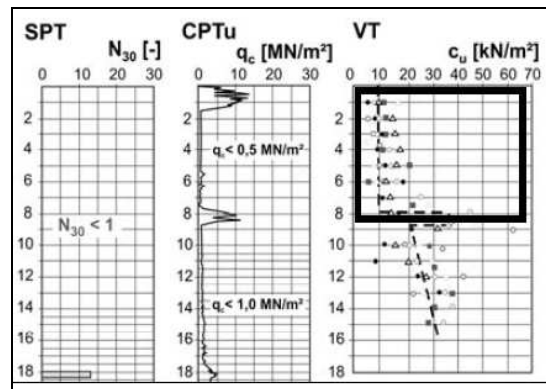


Figura 2. Condiciones geotécnicas típicas del perfil de suelos; el estrato arcilloso superficial identificado con el más crítico es delimitado por el cuadro

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 que superaban los 13 m, las cuales constituían 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 > 340 kN/m² para el patio de disposición de mineral de hierro). Esto 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 optimizadas 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.

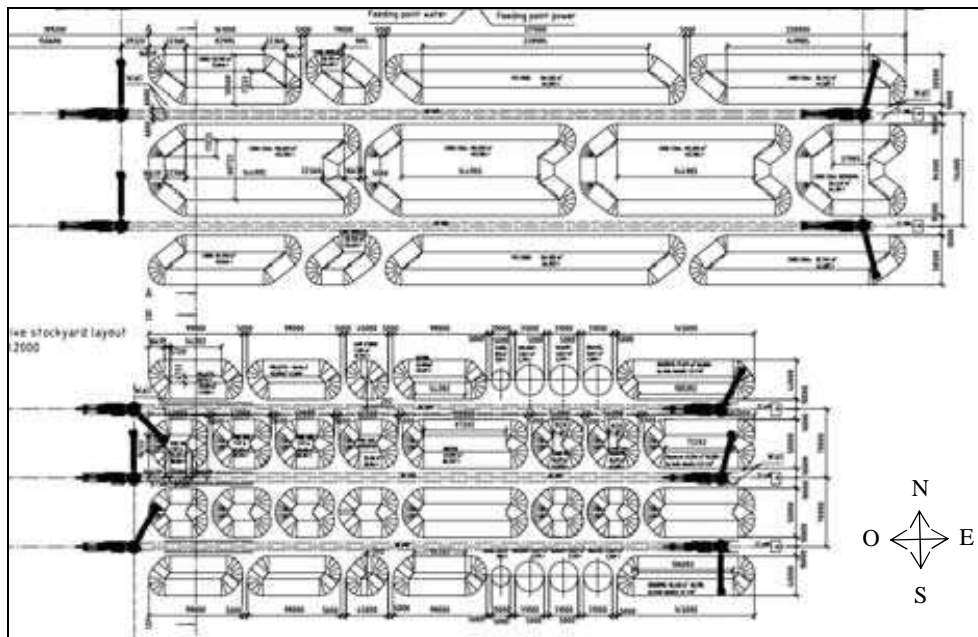


Figura 3. Patios de materiales; arriba (Norte) carbón/coque, abajo (Sur) mineral de hierro/aditivos, Pistas para las maquinas de apilamiento (stacker/reclaimers) operando en el sentido Oeste-Este

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 sino también el funcionamiento adecuado de los stacker/reclaimers, de suma importancia para la operación de toda la planta. A pesar de que como medida inicial una plataforma basal de balasto fue considerada en las pistas, estas permanecían bastante sensibles a cualquier tipo de deformación, por lo que fue preciso un número importante de verificaciones de diseño.



Figura 4. Patios de almacenamiento de carbón y coque: pilas de materiales y pistas con las maquinas 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 maquinas recuperadoras, simulando la operación real del patio, verificándose el estado 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 (*spreading stresses*), a partir de los cuales fueron calculas 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, 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 y aproximación a los resultados de las simulaciones numéricas efectuadas.

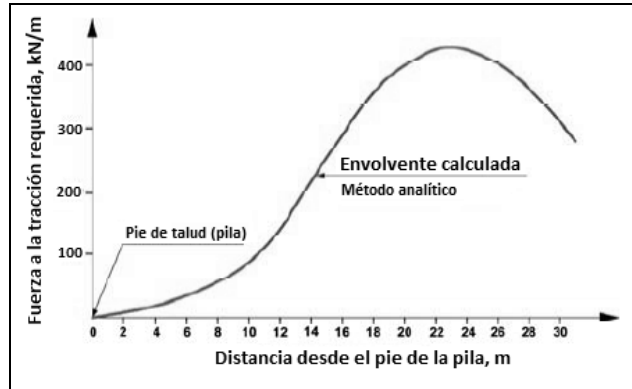


Figura 5. Ejemplo del diagrama de fuerzas de tracción en el refuerzo geosintético generadas por los esfuerzos laterales (spreading stresses) calculado mediante el método analítico

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 trechos en estudio, imposibilitando la utilización de materiales geosintéticos fabricados con polímeros convencionales menos rígidos (i.e. PET o HDPE), 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 [Ref. 2].

De modo general, la solución de fundación adoptada constó de una capa de geotextil tejido de refuerzo y separación Robutec[®], 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 de PVA Fortrac[®] M, 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.

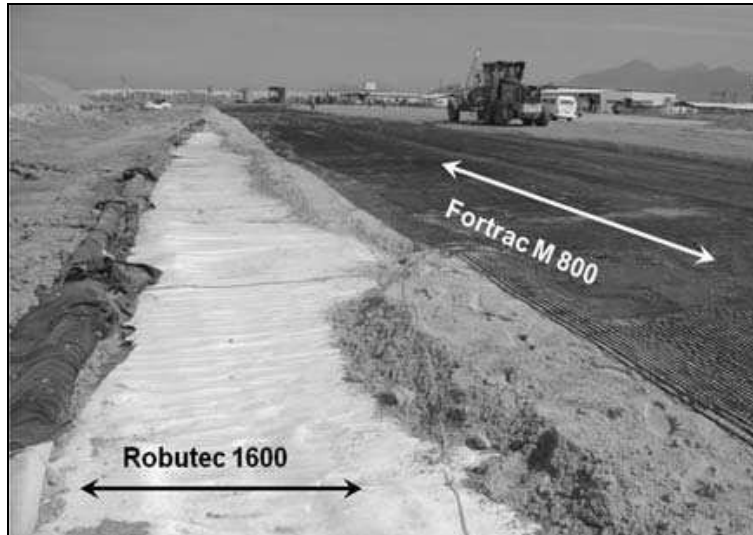


Figura 6. Instalación de las capas de refuerzos geosintéticos: sentido longitudinal – geogrilla Fortrac[®], Sentido transversal – geotextil tejido Robutec[®] con una capa intermedia de arena

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 la 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 tuvo que considerar 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 alteamiento (excesos de presión de poros, resistencia al corte, etc.). Ver Fig. 7.

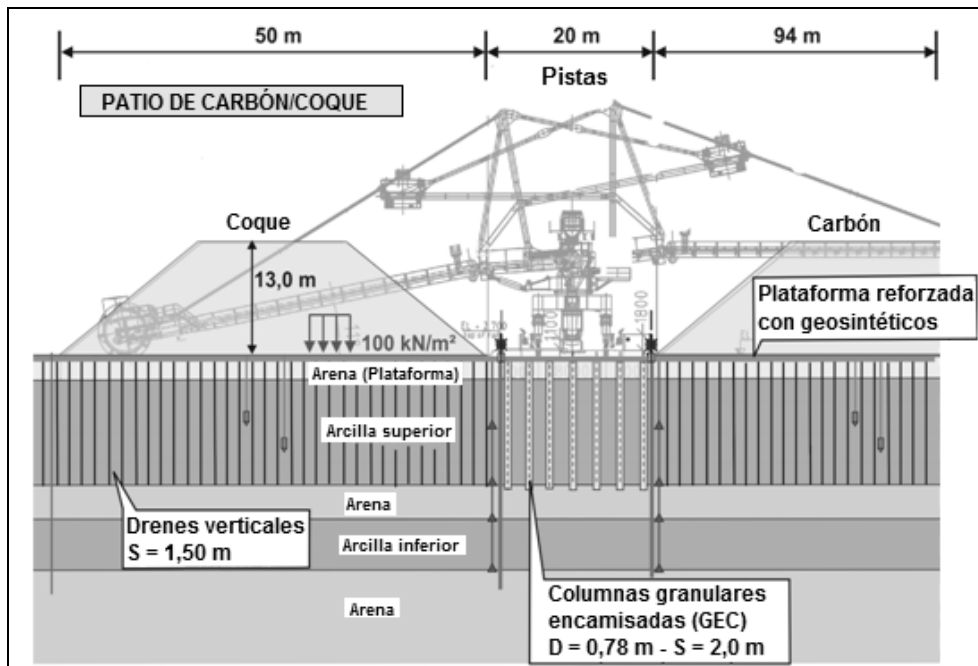


Figura 7. Sección transversal con las soluciones de fundación implementadas

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

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 máquinas 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 Ringtrac® (o GEC por sus siglas en ingles: geotextile-encased columns) [Ref. 3], generando un sistema con alta rigidez a la compresión, provisto de comportamiento dúctil y autonivelante.

La instalación de las columnas Ringtrac® 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 percibidos 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 alteamento constructivo de las pilas de material.

El dimensionamiento estructural del sistema fue realizado con base en el Método de Raithel [Ref. 4 y Ref. 5] y en las orientaciones de la Recomendación Alemana EBGEO [Ref. 6]. 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. [Ref. 7], 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 la capa de arena intermedia. El espaciamiento típico entre columnas fue de 2 m x 2 m. El refuerzo geotextil tubular utilizado fue el Ringtrac® 100/200, 100/250 y 100/275, con resistencia a la tracción nominal diametral 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 Robutec® en el sentido transversal, seguido de una capa de arena, y una capa de geogrilla Fortrac® M superior 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 Ringtrac® fue ejecutada por la propia ThyssenKrupp mediante el método de “desplazamiento del suelo blando”, utilizando martillos vibradores 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 los tubos metálicos 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 o embudo. 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 recomendadas por la recomendación EBGeo. En esta obra también fueron ejecutadas columnas Ringtrac® con grava fina en un área significativa del otro patio de disposición de materiales (patio de mineral de hierro), lo cual no significó ninguna dificultad al proceso constructivo. En función 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 Ringtrac®, e instalados más de 1 millón de metros cuadrados de geotextiles e geogrillas con resistencia a la tracción nominal de hasta 1.600 kN/m para el refuerzo horizontal, constituyéndose como la mayor obra de ingeniería con geosintéticos de refuerzos de suelo ejecutada en Brasil hasta el momento.



Figura 8. Ejecución de las columnas granulares encamisadas con geotextil

5 CONSIDERACIONES FINALES

Las primeras investigaciones y monitoreos confirmaron bajos valores de deformación en las pistas de operación y pequeños desplazamientos horizontales en el suelo blando provocados por el peso de pilas de disposición de materiales. 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 máquina 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 2 años, 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 diseños adoptados se mostraron altamente efectivos y adecuados para las condiciones y desafíos impuestos por el proyecto.

6 CONSIDERACIONES FINALES

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