

LUIS EDUARDO RUSSO
HUESKER Srl, Trieste

PIERPAOLO FANTINI
HUESKER Srl, Trieste

DIMITER ALEXIEW
HUESKER Synthetic GmbH, Gescher

FONDAZIONE DI UNO STOCCAGGIO DI MINERALI CON COLONNE INCAPSULATE IN GEOTESSILE TUBOLARE E RINFORZI ORIZZONTALI

1. Introduzione

La TKCSA (ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico) ha costruito un impianto siderurgico nelle pianure del litorale brasiliano vicino a Sepetiba, progetto che comprendeva la realizzazione di un'area di stoccaggio di materie prime (carbone/coke, minerali e additivi). L'area di stoccaggio è di ca. 800 m x 600 m, di cui la parte relativa allo stoccaggio del carbone/coke è di ca. 800 m x 350 m. La zona è costituita da terreni molto soffici ed il livello della falda freatica è appena sotto la superficie. Inoltre l'area è fiancheggiata da due fiumi. Lo spessore dello strato di terreno soffice varia dai 15 ai 20 metri ca. Oltre al sovraccarico trasmesso dallo stoccaggio delle materie prime stesse (cumuli fino a ca. 13 m di altezza con carichi di 100 a 340 kN/m²), l'area è attraversata da piste parallele per la circolazione delle gru (stacker/reclaimers), macchinari di grandi dimensioni simili a quelli utilizzati nelle cave minerarie a cielo aperto (Figura 1). Il presente articolo si concentra sugli interventi eseguiti per le fondazioni dell'area di stoccaggio e delle piste di percorso delle gru.



Fig. 1- Impianto siderurgico della TKCSA nei pressi di Sepetiba: vista dell'area di stoccaggio di materie prime attraversata dalle piste per le gru.

2. Condizioni geotecniche

Le condizioni geotecniche che caratterizzano la zona sono riportate in Figura 2: lo strato superficiale è costituito da argille molto soffici saturate fino a una profondità di circa 10 m ("argilla superiore"), a seguire per uno spessore di circa 2 m c'è uno strato sabbioso di migliori caratteristiche, e poi di nuovo argille soffici fino a 20 m di profondità, infine si trova un letto di sabbie e roccia da 30 a 50 metri sotto la superficie.

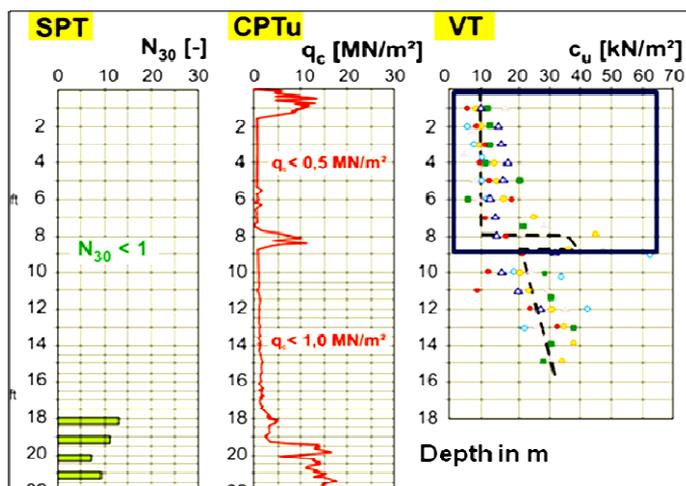


Fig. 2- Condizioni geotecniche tipiche; la più critica è la denominata "argilla superiore", contrassegnata dalla cornice

Lo strato più critico denominato "argilla superiore", di elevata plasticità e bassa consistenza, possiede in linee generali i seguenti parametri caratteristici: modulo edometrico E_s ca. 0,2 - 0,5 MN/m², coefficiente di consolidamento $c_v = 2 - 4 \cdot 10^{-8}$ m/s, coesione non drenata di appena $c_u = 5-15$ kN / m². La falda si trova praticamente al livello del piano campagna. In tali condizioni geotecniche non era in effetti possibile realizzare alcuna attività costruttiva, quindi, in un primo momento, è stata realizzata una piattaforma mediante il dragaggio di uno strato di sabbia per uno spessore complessivo di circa 1,5 - 2 m su tutta l'area.

3. Area di stoccaggio

La progettazione della fondazione dell'area di stoccaggio di carbone/coke presentava ulteriori notevoli difficoltà in quanto i cumuli, di altezza variabile fino a 13 m, cambiano di forma e posizione rapidamente ed in continuazione, generando un processo di carico-scarico in condizioni di esercizio con oscillazioni di pressioni che variano da 0 a $>100 \text{ kN/m}^2$. Inoltre, le deformazioni ammissibili della pista dovevano essere limitate per evitare spostamenti che andassero a compromettere l'operatività delle pesanti gru di 750 ton (Figure 2 e 3).

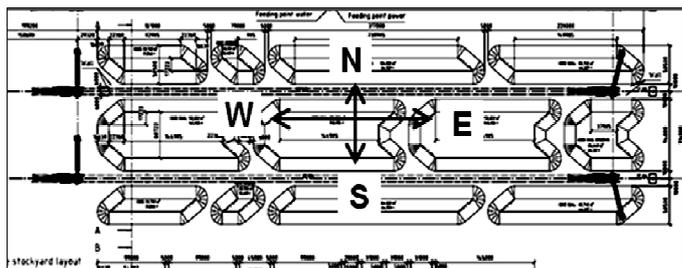


Fig. 3 – Area di stoccaggio; Area di 800 x 350 m per il carbone/coke; zone di accumulo e piste per le gru che attraversano l'area in direzione Est-Ovest

Oltre ai problemi di stabilità (che risultava insufficiente), sono stati calcolati assestamenti che arrivavano fino a 2 m. Pertanto dovevano essere trovate soluzioni tecniche ottimizzate per risolvere entrambi i problemi. Queste dovevano prendere in considerazione non solo gli aspetti tecnici, ma anche altri fattori come i costi, il limitato tempo previsto per la costruzione (circa due anni), le varie esigenze per le diverse zone, gli aspetti logistici e la disponibilità di adeguati mezzi di costruzione che potessero essere reperibili in Brasile.

3.1 Fondazione dell'area di stoccaggio di carbone/coke

La progettazione della fondazione dell'area di stoccaggio comprendeva diverse problematiche da affrontare: si dovevano raggiungere livelli adeguati di stabilità locale e globale, gli assestamenti globali e differenziali dovevano essere ridotti e, soprattutto, dovevano essere ridotti a valori accettabili gli spostamenti orizzontali dovuti all'estrusione del terreno dall'area di stoccaggio verso le piste delle gru (in direzione N-S). Il problema dell'estrusione era di rilevante importanza. Una spinta orizzontale proveniente dalle aree di stoccaggio adiacenti alle piste metteva in pericolo non solo la stabilità, ma anche il corretto funzionamento delle gru, che sono vitali per il funzionamento dell'intero impianto siderurgico. Sono stati eseguiti calcoli agli Stati Limiti Ultimi (SLU) e agli Stati Limiti di Esercizio (SLE) per le diverse forme e posizioni dei cumuli di carbone/coke, per diverse posizioni delle gru sulla pista e per i due assi principali N-S ed E-O (Figura 3), applicando sia metodi analitici che numerici (FEM) e confrontando i risultati ottenuti. In molti

casi specifici i noti metodi analitici (come ad esempio, Bishop o Janbu) non erano appropriati, quindi è stato necessario procedere con modelli analitici di calcolo sviluppati appositamente. In tutti i casi esaminati e in tutte le direzioni le analisi allo SLU e SLS hanno evidenziato la necessità di adottare geosintetici di rinforzo orizzontali in due direzioni: N-S ed E-O. In alcuni casi lo SLU era determinante nel calcolo, in altri lo SLS. Per l'ottimizzazione finale del progetto sono stati considerati anche altri fattori, tra cui: la produzione di geosintetici di rinforzo su misura per ottimizzare i costi, la produzione di rotoli di lunghezza predefinita per evitare sovrapposizioni, l'analisi dei coefficienti di interazione dei geosintetici con la piattaforma di sabbia, ecc

In linee generali la soluzione è stata la seguente: in direzione N-S sono stati posati rotoli di geotessili tessuto sotto l'area di stoccaggio e, in alcune zone, sono stati prolungati anche sotto la pista (Figura 3), successivamente ricoperti con uno strato di 15 cm di sabbia compattata. Sopra questo strato sono state posate geogriglie nella direzione E-O. Data la rilevanza della anzidetta problematica di "estrusione" del terreno di sottofondo verso le piste, i rinforzi sono stati calcolati con un metodo analitico e mediante analisi numerica FEM. Per il calcolo delle sollecitazioni dovute all'estrusione laterale alla base dei rilevati è stato adottato un metodo semplificato sviluppato per il caso specifico. Sono state calcolate, quindi, le forze di trazione nei rinforzi (Figura 4) risultanti dalle sollecitazioni generate dall'estrusione del terreno di sottofondo delle aree di stoccaggio.

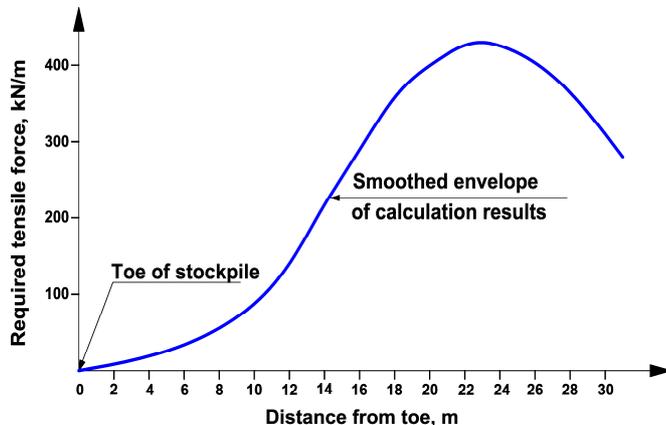


Fig. 4 - Esempio dello sviluppo della forza di trazione su un geosintetico di rinforzo a causa dell'effetto di estrusione del terreno

Sono stati calcolati gli spostamenti orizzontali ai piedi dei cumuli che insistevano sulla pista, tenendo in considerazione che la rigidità dei rinforzi (modulo elastico) varia con il tempo, integrando le deformazioni ϵ generate dalle sollecitazioni di trazione. La stessa procedura è stata applicata nella direzione E-O, anche se era meno critica.

Per soddisfare tutte le esigenze di rigidità a trazione (modulo) i geosintetici di rinforzo in poliestere ad alta tenacità (PET) risultavano insufficienti, pertanto, sono stati adottati geosintetici a basso creep in polivinilalcol

(PVA) che forniscono moduli di circa il doppio rispetto al PET (fino a circa 3.10^4 kN/m in questo caso). Questo aspetto era di fondamentale importanza per l'intero progetto (Alexiew et al, 2000). Un ulteriore effetto è stata la riduzione della pressione laterale sulle colonne incapsulate in geotessile (GEC) disposte sotto la pista (vedi sotto). I risultati degli spostamenti orizzontali ottenuti con la procedura di analisi semplificata collimavano molto bene con quelli ottenuti mediante l'analisi FEM (figura 5); questo ha permesso di stabilire con maggiore affidabilità la tipologia di rinforzo orizzontale definitivo. Sono stati adottati geotessili tessuti "Robutec" e geogriglie "Fortrac® M" (entrambe realizzate con fibre in PVA), con resistenze a trazione a breve termine (UTS) variabili da 500 kN/m a 1600 kN/m..

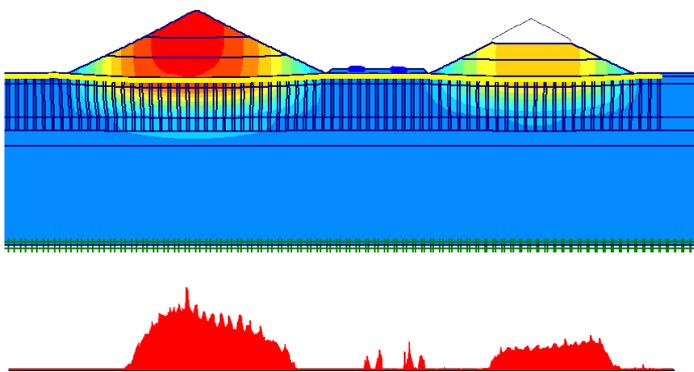


Fig. 5 - Risultati tipici dell'analisi FEM nella direzione N-S (vedi Fig. 3) e le forze di trazione dei rinforzi.

Al fine di garantire la qualità della costruzione sono stati realizzati disegni dettagliati con indicazioni precise della sequenza di posa di tutte le aree rinforzate e, inoltre, per consentire un risparmio dei costi, i rotoli dei geosintetici di rinforzo sono stati prodotti con le lunghezze specificate nel progetto.

Nonostante la presenza del rinforzo orizzontale, è stato necessario effettuare una stabilizzazione profonda supplementare del sottofondo soffice. Il progetto è stato realizzato in un lasso di tempo estremamente compatto, in considerazione della complessità dell'opera, e la sua ottimizzazione ha indotto ad effettuare una valutazione scrupolosa di diversi concetti e scenari, tenendo conto di molteplici fattori e variabili. Alla fine si è deciso di utilizzare dreni verticali poiché i tempi di consolidamento valutati erano più lunghi dei previsti, è stato implementato un programma di monitoraggio con strumentazione predisposta per consentire l'analisi continua sin dall'inizio delle lavorazioni. In questo modo era possibile controllare la fase di riempimento dell'area di stoccaggio e verificare se le condizioni del sottosuolo in un dato momento corrispondevano alle ipotesi ed ai calcoli.

È noto che anche il miglior rinforzo è meno efficace se non è manipolato o posato correttamente. A questa problematica si aggiungevano le condizioni specifiche di questo intervento come, ad esempio, la carenza di tempo, le enormi aree da rinforzare, la settorializzazione

dei rinforzi, ecc., tutte buone ragioni per programmare con molta attenzione ed in maniera dettagliata le varie fasi di costruzione. Per esempio, ai rotoli sono stati applicati etichette in fabbrica con descrizioni specifiche della posizione. Grazie alla accurata pianificazione e precauzioni adottate, la posa dei materiali in sito è stata bene organizzata e correttamente eseguita.

3.2 Fondazioni delle piste delle gru

Le piste per le gru sono sovrastrutture lineari caricate pesantemente (binari ferroviari di 8 m di larghezza) che attraversano le aree di stoccaggio. Il peso di una gru arriva a circa 750 tonnellate e, essendo che in fase operativa devono ruotare (figure 1 e 6), generano notevoli eccentricità del carico. Lungo le piste, dove sono incluse anche aree destinate all'assemblaggio delle gru, dovevano essere rigorosamente limitate tutte le deformazioni (assestamenti, assestamenti differenziali, deformazioni torsionali e spostamenti laterali). Nelle aree di assemblaggio un problema tipico era, tra l'altro, l'elevato carico concentrato sotto le piastre di supporto del veicolo di montaggio (fino a 2000 kN).

Sono stati effettuati calcoli di stabilità convenzionali e, in parallelo, analisi agli elementi finiti (FEM) in entrambe le direzioni delle piste. L'obiettivo era di ottenere una deformabilità significativamente inferiore rispetto a quella delle aree di stoccaggio ed in un tempo di costruzione più breve, in modo da consentire l'operatività immediata, considerando, allo stesso tempo, le varie situazioni di carico sfavorevoli. Una possibilità era, ad esempio, realizzare una fondazione su pali battuti in calcestruzzo prefabbricati o con elementi portanti simili, rinforzati in sommità con geogriglie di rinforzo ad alta resistenza per controllare l'effetto di punzonamento dei pali. A causa della grandezza delle pressioni laterali previste provenienti dal terreno soffice sotto le aree di stoccaggio (e nonostante le misure contro il fenomeno di estrusione menzionate in precedenza) i sistemi rigidi sono apparsi troppo rischiosi per problemi legati alla flessione / deformazione dei pali. La soluzione ottimale è stata trovata attraverso l'adozione di colonne incapsulate in geotessile tubolare riempite di sabbia compattata (GEC) (Alexiew et al 2005), le quali si comportano come elementi portanti duttili. Tutti i calcoli sono stati effettuati sulla base del metodo di Raithel (Raithel 1999 e 2005) e applicando le raccomandazioni EBGeo (EBGeo Draft 2007). Il diametro delle colonne è stato fissato in 0,78 m a causa delle dimensioni del tubo di acciaio necessario per l'infissione, disponibile in Brasile all'epoca. La lunghezza dei GEC era variabile da circa 10 a 12 m; e la maglia aveva un interasse di 2,0 x 2,0 m nella maggior parte dei casi.

Le colonne passano attraverso lo strato soffice di "argilla superiore" (Figura 2) e sono fondate sullo strato sabbioso intermedio di migliori caratteristiche. Come elemento di rinforzo sono stati impiegati i geotessili tubolari ad alto modulo Ringtrac 100/250 e 100/275. A causa della natura estremamente soffice del terreno è stato utilizzato il cosiddetto metodo dello spostamento per l'installazione delle colonne. Inoltre, il diametro del geotessile tubolare era corrispondente con il diametro interno del tubo di

installazione in acciaio per garantire mobilitazione immediata del sistema anche con assestamenti molto piccoli. La produzione per la posa delle colonne, una volta entrata a regime, è stata di 3 a 4 colonne per ora e per mezzo di installazione. Un punto di discussione è stato il comportamento a lungo termine dei GEC sotto l'azione dei pesanti carichi concentrati trasmessi dalle gru in movimento, carichi pulsanti di grande ampiezza applicati lentamente e di tipo piuttosto aleatorio. Queste preoccupazioni sono state dileguate, tra altre ragioni, dalle conclusioni dello studio di Di Prisco et al (2006), che ha trovato che i GEC si irrigidiscono dopo i cicli di carico/scarico.

La Figura 6 mostra una sezione trasversale parziale della soluzione adottata per l'area di stoccaggio e le piste.

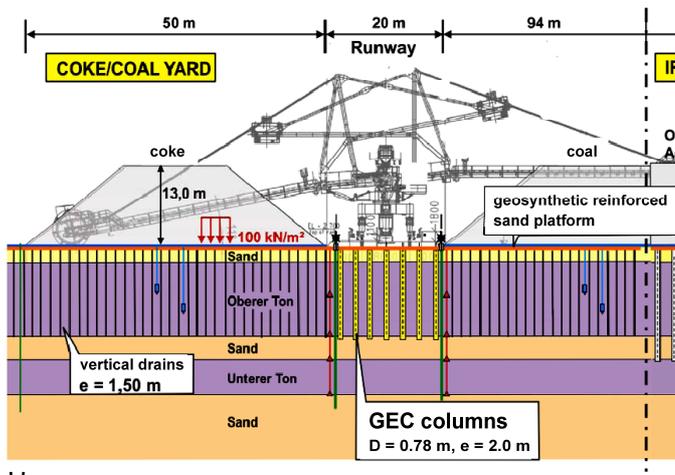


Fig. 6 - Soluzione tipica delle aree di stoccaggio di carbone / coke e delle piste

Per quanto riguarda l'analisi degli strati rinforzati lungo le piste e nelle aree di montaggio delle gru precedentemente menzionate, oltre all'analisi agli elementi finiti, in diverse situazioni di carico non vi era alcun modello analitico adatto disponibile. Alcuni sono stati sviluppati per i casi specifici: ad esempio nei casi di "punzonamento localizzato tra GECs", "punzonamento asimmetrico tra colonne dovuto all'eccentricità dei carichi", ecc, per un totale di sette situazioni specifiche di progetto e di modi di collasso. In alcuni casi sono stati sviluppati diversi modelli ed i risultati sono stati confrontati. Dovuto alla mancanza di esperienza con questi nuovi modelli la scelta finale è stata effettuata su una base di plausibilità ingegneristica. I dettagli sono omessi per brevità. Tutte le modalità di collasso analizzate richiedevano il rinforzo biassiale, il quale è stato provvisto, per uniformità, simile al rinforzo adottato sotto le aree di stoccaggio, vale a dire sovrapponendo due strati di rinforzi monoassiali (tessuti Robutec in direzione N-S e geogriglie Fortrac® M in direzione E-O). I tessuti sono stati inoltre unificati per quanto possibile, in modo da avere lunghezze continue attraverso le diverse aree di stoccaggio e le piste, minimizzando le sovrapposizioni.

Le Figure 7 e 8 mostrano rispettivamente i rinforzi posati in due direzione ortogonali e una colonna GEC finita ma

non ancora coperta.

Nell'area destinata allo stoccaggio di minerali ed additivi è stato adottato lo stesso schema di rinforzo con gli stessi tipi di geotessili tessuti e geogriglie, ma questo è al di fuori dello scopo della presente pubblicazione.



Fig. 7 - Rinforzi posati: nel senso longitudinale (E-O) geogriglia Fortrac® M 800, nel senso trasversale (N-S) i geotessili Robutec® 1600 con uno strato di sabbia intermedio



Fig. 8 - Colonna incapsulata con geotessile tubolare Ringtrac® 100/250, riempita di sabbia compattata

E' stato messo a punto un programma di monitoraggio mediante l'uso di dispositivi installati in un rilevato temporaneo di prova, realizzato nell'area di stoccaggio di carbone / coke (zona provvista di rinforzi orizzontali più dreni verticali a nastro), e nei due primi "veri" cumuli di carbone / coke (con rinforzi orizzontali più dreni verticali) al lato della pista che corre tra di loro (fondata su rinforzi orizzontali più GEC). Il monitoraggio è stato messo parzialmente in funzione nel febbraio del 2009. In generale gli assestamenti, gli spostamenti orizzontali, ecc sono nell'intervallo compreso tra i limiti inferiore e superiore dei calcoli effettuati. La pista della prima gru,

con un carico operativo variabile da 250-350 kN / m per rotaia ha soddisfatto fino adesso tutti i requisiti in termini di bassa deformabilità di ogni genere.

4. Considerazioni finali

La realizzazione della fondazione delle aree di stoccaggio e delle piste nell'impianto siderurgico della ThyssenKrupp in Sepetiba, Brasile, era una sfida importante che implicava la risoluzione complesse problematiche geotecniche. Le soluzioni adottate per ogni situazione e condizione di carico mettevano alla prova sia i presupposti progettuali che l'affidabilità dei geosintetici utilizzati come elementi strutturali.

I risultati delle misurazioni effettuate sul rilevato di prova realizzato preliminarmente, che simulava il carico trasmesso da un cumulo di carbone fondato su un sottofondo rinforzato, e primi risultati ottenuti sia dalle zone di stoccaggio sotto i cumuli "reali" sia lungo pista in funzionamento, confermano l'adeguatezza e l'efficacia dei concetti, della progettazione, le soluzioni ottimizzate ed i materiali adottati che hanno soddisfatto tutte le esigenze sia in termini di stabilità che di funzionalità.

BIBLIOGRAFIA

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 pre-design graphs, *Proc. Geo-Frontiers Conference, Jan. 2005, Austin, Texas, pp. 318 – 324.*

Di Prisco C., Galli A., Cantarelli E., Bongiorno D. (2006). Geo-reinforced sand columns: Small scale experimental tests and theoretical modelling, *Proc. 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, pp. 1685 – 1688.*

EBGEO "Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrung aus Geokunststoffen" (Recommendations for the design and calculation of soil reinforced by geosynthetics), Draft 2007, *DGGT, Essen.*

Glockner A., Igelbüscher A., Moormann C., Jud H., Linder K.-J., Kunzmann M. (2008). Bau eines neuen Stahlwerks auf weichen Sedimentböden nahe Rio de Janeiro - Geotechnische Herausforderungen in ungewöhnlichen Dimensionen. *Proc. Deutsche Baugrundtagung, Dortmund 2008, pp. 199-206.*

Raithel M. (1999). Zum Trag- and Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. *Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 6.*

Raithel M., Kirchner A., Schade C., Leusink E. (2005). 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, pp. 401 – 407.*

RIASSUNTO

Fondazione di uno stoccaggio di minerali con colonne incapsulate in geotessile tubolare e rinforzi orizzontali

La TKCSA (ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico) ha realizzato un impianto siderurgico nelle pianure del litorale brasiliano, comprendente un'area di stoccaggio di materie prime. L'area di stoccaggio è di ca. 800 m x 600 m. L'area è caratterizzata da terreni molto soffici e saturi. L'area di stoccaggio è attraversata da piste per la circolazione delle gru (stacker/reclaimers) simili ai macchinari utilizzati nelle cave minerarie a cielo aperto, sensibili ad ogni spostamento.

La fondazione doveva soddisfare diversi requisiti tecnici ed economici. La soluzione ottimale scelta è stata quella di fondare le aree di stoccaggio e le piste su geosintetici di rinforzo ad alto modulo posizionati in due direzioni ortogonali, aggiungendo colonne incapsulate in geotessili tubolari ad alta resistenza (GEC) sotto le piste. Nel presente articolo vengono brevemente descritte le condizioni ed i requisiti specifici del progetto, spiegati i principi progettuali e presentata la soluzione finale adottata.

ABSTRACT

Foundation of a ore stockyard with geotextile encased columns and horizontal reinforcement

TKCSA (ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico) is building a steel plant in the lowlands of the Brazilian seashore inclusive of a stock yard for raw materials. The stockyard area is ca. 800 m x 600 m. The terrain consists of extremely soft saturated soils. The stockyards include runways for stacker/reclaimers similar to the heavy equipment used for open cast mining being sensitive to any displacement. A foundation had to meet different technical and economical requirements. The optimum solution found was a foundation of the runways and stock pile beds on horizontal high-strength geosynthetic reinforcement in both directions adding geotextile encased columns (GEC) below the runways using a high modular encasement. The project-specific conditions and requirements to be met are shortly described, design concepts explained and the final optimized solution presented.