

MUROS SEGMENTALES REFORZADOS CON GEOMALLAS EN LOS TERRAPLENES ESTABILIZADOS CON CAL DE LA NUEVA AUTOPISTA DE CIRCUNVALACIÓN DE VENECIA (ITALIA)

Luis Eduardo Russo¹

¹ Huesker srl. (e-mail: l.russo@huesker.it)

RESÚMEN:

El “Passante di Mestre” es la nueva autopista de circunvalación de Venecia que ha sido proyectada para librar del denso tráfico la actual autopista que atraviesa la ciudad de Mestre.

En el tramo de autopista correspondiente al nudo vial de Preganziol, estaban previstos muros verticales de contención en hormigón armado a ambos lados del terraplén de la carretera, fundados sobre pilotes profundos de hormigón. Para evitar la onerosa ejecución de los pilotes y ahorrar tiempo, se decidió modificar la solución original adoptando un muro de contención flexible en grado de absorber los cedimientos previstos.

El estudio del impacto ambiental efectuado durante la fase de diseño obligaba respetar dos requisitos: el paramento del muro debía ser de hormigón y la terminación debía ser de color gris natural.

Por otro lado, como consecuencia de la escasez de suelos granulares, el terraplén de la carretera debía construirse usando los suelos limo-arcillosos locales estabilizados con cal. Esta necesidad operativa comportaba que el suelo del terraplén sería alcalino ($\text{pH} > 12$) y, consecuentemente, cualquier solución técnica debía considerar esta particular condición de agresividad química.

La solución final, que satisfacía todos los requisitos técnicos y ambientales requeridos, consistió en la realización de muros segmentales con bloques de hormigón cortados, reforzados con geomallas en polivinilalcohol (Segmental Retaining Walls). Los muros, de 89° de inclinación, se construyeron a los dos lados de las rampas de acercamiento a un puente con alturas variables desde 2,5 m a 10,5 m por una longitud de 450 m aproximadamente.

ABSTRACT:

The new Venice Bypass is designed to attract traffic away from the existing, overcrowded Mestre City highway.

In the stretch of the highway around the new Preganziol junction, concrete retaining walls were specified on both sides of the road. As a result of the presence, in this area, of soft foundation soil, a proposal was made to adopt a flexible retaining wall system, in order to avoid the need for expensive piled foundations under a rigid structure.

As part of the design brief, the environmental impact requirements specified two particular conditions for these structures; they were to be concrete faced and the facing was to be a natural grey finish.

As a consequence of the lack of locally available granular backfill material, the road embankment was to be constructed using lime stabilised soils. This resulted in an alkaline fill material ($\text{pH} > 12$) which would have to be incorporated into any alternative design proposals.

The final solution, that fulfil both, technical and environmental requirements, was a segmental retaining wall made with grey concrete blocks reinforced with PVA geogrids. The vertical walls (89°) have been constructed at both sides of a bridge approach ramps, with heights varying from 2,5 m to 10,5 m for a total length of 450 m approx.

Palabras claves: Muro segmental en bloques, refuerzo de suelos, geomallas, rampas, polivinilalcohol, alcalinidad

INTRODUCCIÓN

La Autopista A4 cruza el norte de Italia desde Turín a Trieste en dirección Oeste-Este. A lo largo de esta autopista, el tramo que atraviesa la ciudad de Mestre (Venecia) ha sido siempre un punto crítico debido al tráfico intenso, ya sea local que de larga distancia. Por este motivo, desde hace ya años se presentaba la

exigencia de construir una nueva circunvalación que “bypassase” por el norte la ciudad de Mestre de modo de derivar todo el tráfico pesado por este tramo, mientras todo el tránsito local debería continuar circulando por la autopista actual.

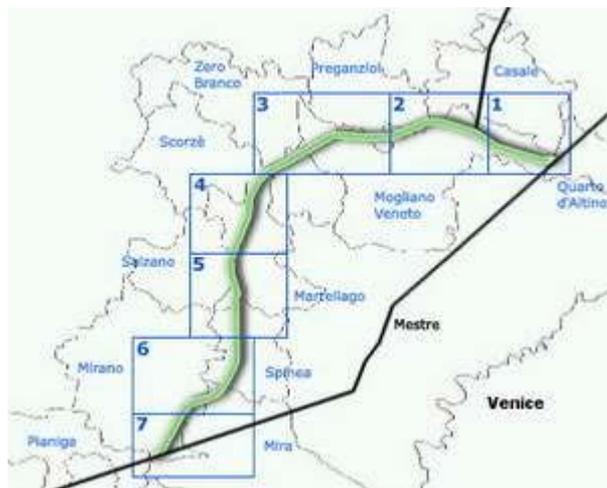


Fig. 1. Vista general de la circunvalación de Venecia

La nueva circunvalación tiene un ancho de 32,5 m y una longitud de 32,3 km y, como se puede observar en la fig. 1, atraviesa 11 municipalidades con el consiguiente problema de las continuas intersecciones con un número considerable de calles locales y rutas. Por este motivo se tuvo que planear toda la recirculación del tráfico de la zona, ya que muchas calles locales se interrumpieron y se tuvieron que proyectar numerosos sobrepasos.

Este artículo trata del proyecto y ejecución de uno de estos sobrepasos, cercano a la nueva salida de autopista de Preganziol (Treviso) (ver fig. 2), entre la progresiva km 25+250.00 y la km 26+228.50.

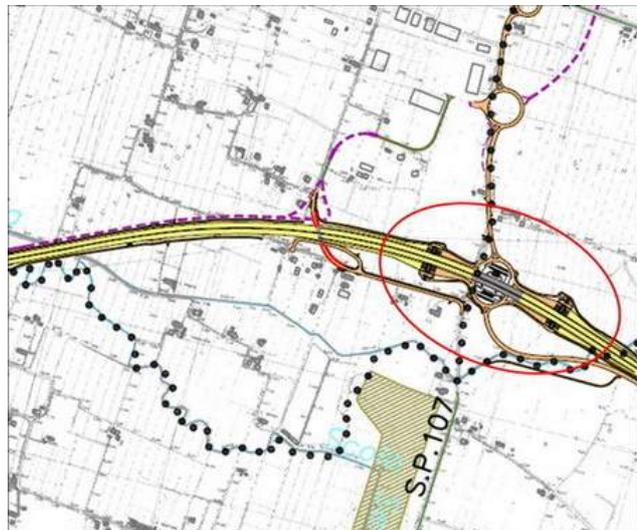


Fig. 2. Vista general de la salida de autopista en Preganziol

PROYECTO DEL SOBREPASO DE PREGANZIOL

Durante la fase de diseño del proyecto general, muchas partes de la circunvalación de Venecia no habían sido definidas completamente; por lo tanto, en muchas situaciones, la empresa adjudicataria debía proponer sucesivamente la solución que tenía que respetar todos los requisitos técnicos y ambientales fijados por las Autoridades de la Autopista.

A ambos lados de las rampas del puente, cercano a la salida de Preganziol, habían sido previstos muros de contención verticales, pero las prescripciones de los pliegos de condiciones indicaban solamente el tipo de material con el que tenían que construirse (hormigón) y la terminación (planos y de color gris). Cada una de las dos rampas de acercamiento al puente tienen una longitud de 400 m aproximadamente, con altura que varía desde 1,00 m a 10,20 m sobre el nivel del terreno.

Condiciones del terreno

Cuando la empresa principal tuvo que ocuparse del proyecto de los muros, la idea inicial era construir muros convencionales de hormigón armado, pero debido a las pobres características geotécnicas de los suelos en situ, ya sea en términos de resistencia como de deformabilidad, habrían sido necesarias fundaciones indirectas de pilotes con plateas que debían apoyarse sobre las capas profundas de suelos más resistentes.

Se realizaron muchas pruebas geotécnicas a lo largo del recorrido de la nueva circunvalación, especialmente en las zonas donde se debían construir los nuevos sobrepasos y los pasos subterráneos. Una de estas pruebas, una penetrometría, se efectuó exactamente debajo de una de las rampas del sobrepaso de Preganziol. El resultado obtenido se puede observar en la fig 3.

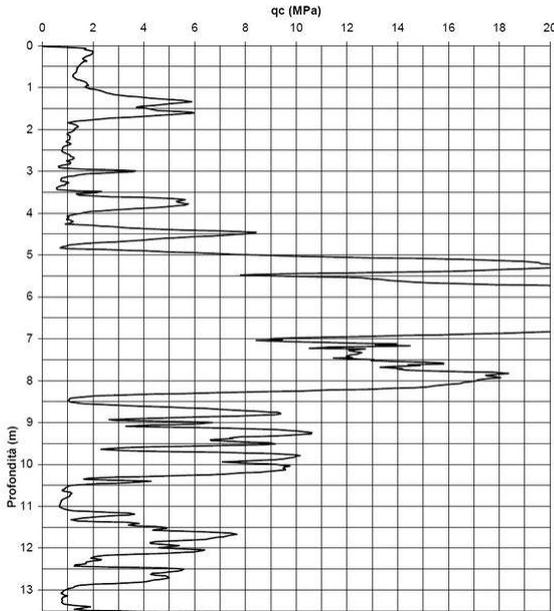


Fig. 3. Resultado de una de las pruebas penetrométricas

La interpretación de estas pruebas condujo a la definición de la estratigrafía del suelo, la cual se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los parámetros geotécnicos

Profundidad	Descripción de los suelos	ϕ' (°)	c' [kN/m ³]	γ [kN/m ³]
0,0 – 4,80	Arcillas limosas levemente arenosas	28	5	19,0
4,80 – 10,00	Arenas medio-finas levemente limosas	39	0	18,5
10,0 – 15,00	Limos arcillosos levemente arenosos	28	5	19,0
15,00 – 21,50	Arenas limosas medio finas	38	0	19,0
21,50 – 31,00	Arcillas limosas con lentes de limos arenosos	28	5	19,0
31,00 – 35,00	Arenas limosas	39	0	19,0

El nivel de la napa freática se encuentra a una profundidad variable de – 0,8 m a –1,0 m desde el nivel del terreno.

Estabilización con cal de suelos cohesivos

Otro problema importante que complicaba la construcción del terraplén era la falta de suelos granulares debido a la escasez de canteras y al consiguiente elevado costo de los inertes, lo cual obligó a la empresa a usar los suelos cohesivos disponibles in situ como material de relleno. Estos tipos de suelos no son

normalmente idóneos para emplearlos en la construcción de terraplenes de carreteras, por este motivo se realizaron pruebas de estabilización con cal o cemento para mejorarles las propiedades geotécnicas.



Fig. 4. Vista del suelo estabilizado con cal

Esta técnica de estabilización se aplica normalmente a suelos con elevado contenido de arcillas y consiste en mezclar el suelo natural con óxido de calcio (CaO) para luego compactar la mezcla con un grado optimal de humedad (suelos estabilizados con cal). Si el suelo natural posee un bajo contenido de arcilla y un mayor porcentaje de arenas o suelos granulares, generalmente se sustituye el óxido de calcio con cemento (suelos estabilizados con cemento). En caso de suelos que contienen porcentajes equilibrados de arcillas y arenas, no es posible establecer a priori cual será el mejor aditivo para usar, por lo tanto es necesario efectuar pruebas para obtener la mezcla que da el resultado optimal. Debido a la alcalinidad del óxido de calcio y el cemento, los suelos estabilizados tienen valores de pH superior a 12. Los suelos que podían usarse como relleno y que se encontraban en el area de Preganziol eran arcillas limo-arenosas y arenas limosas grises medio finas. Ambos suelos se mezclaron con cal y se probaron en laboratorio para definir las características geotécnicas. Aún si los resultados de estas pruebas mostraban una mejoría consistente de los parámetros geotécnicos del terreno, ya sea en términos de ángulo de fricción interna (se obtuvieron valores de ϕ variables entre 35° y 39°) como de cohesión (valores de C variables entre 40 y 90 kPa), para el diseño de los muros de contención se adoptaron valores conservativos ($\phi = 32^\circ$; $C = 0$ kPa) para prevenir eventuales heterogeneidades de los valores medidos e imprecisiones durante la mezcla en obrador.

Requisitos estéticos

La circunvalación de Venecia es una de las obras públicas más importantes de las últimas décadas, con la consecuente complejidad e intersección entre disciplinas que proyectos similares comportan, inclusive desde un punto de vista estético. Como se indicó anteriormente, los pliegos de condiciones indicaban que los muros debían ser de hormigón de color gris uniforme; por lo tanto si la empresa adjudicataria quería proponer una terminación diferente, tenía que preparar una vista virtual tridimensional usando imágenes fotográficas, de modo que la Comisión Ambiental pudiera evaluar el aspecto final de la obra insertada en el contexto del paisaje circunstante para luego proceder a la aprobación.

LA SOLUCIÓN

La solución definitiva de los muros de contención debía tener en consideración diferentes aspectos:

- Pobres propiedades geotécnicas de los suelos de fundación
- Uso de los suelos locales estabilizados con cal (con valor de $\text{pH} > 12$) como material de relleno de los terraplenes.
- Aprobación del impacto ambiental de parte de la Comisión Ambiente.
- Conveniencia económica

La solución que la empresa principal presentó a las autoridades de la autopista consistió en muros segmentales en bloques reforzados con geomallas en polivinil alcohol, fundados directamente sobre el terreno existente, sin realizar pilotes como fundaciones profundas.

Se eligió esta solución porque reunía las características necesarias para enfrentar los aspectos descriptos, es decir:

- Se obtuvo un sistema flexible con un mejor comportamiento respecto a los muros rígidos en hormigón armado fundados sobre pilotes, ya sea en términos de deformabilidad como de capacidad de absorber posibles cedimientos absolutos y diferenciales.
- Era resistente a los ambientes alcalinos
- Respetaba los requisitos estéticos exigidos
- Permitía obtener un ahorro en términos económicos y de tiempo

Análisis estática

Como la altura de los muros variaba de 1,00 a 10,20 m, se analizó la estabilidad de diferentes secciones intermedias para optimizar el costo de toda la obra. Se optimizó también la configuración estructural de cada sección cambiando la resistencia y la longitud de las geomallas con respecto a la altura misma del muro.

En la parte superior de los muros, gracias al nivel más bajo de tensiones, se emplearon geomallas en PVA de 55 kN/m de resistencia a tracción, mientras en sector intermedio se utilizaron geomallas de 80 kN/m y en la parte inferior geomallas de 110 kN/m.

Las características técnicas de las geomallas de refuerzo se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2: características de las geomallas

Material	Fortrac [®] 110 MP	Fortrac [®] 80 MP	Fortrac [®] 55 MP
Descripción	geomalla tejida de polivinil alcohol (PVA) con revestimiento polimérico		
Resistencia nominal a la tracción (longitudinal)	110 kN/m	80 kN/m	55 kN/m
Deformación a la tensión nominal	≤ 6 %	≤ 6 %	≤ 6 %
F_{creep} : factor de reducción por fluencia (120 años)	0,65	0,65	0,65
f_{m11} : Factor de reducción por homogeneidad de manufactura y disponibilidad de datos	1,00	1,00	1,00
f_{m12} : Factor de reducción por extrapolación (120 años)	1,30	1,30	1,30
f_{m21} : Factor de reducción por daños durante la instalación (gravas y arena)	1,06	1,06	1,09
f_{m22} : Factor de reducción por efectos ambientales (pH ≥ 9)	1,00	1,00	1,00
Tensión de diseño a largo plazo (120 años)	51,89 kN/m	37,74 kN/m	25,23 kN/m

La tensión de diseño a largo plazo (Long Term Design Strength: LTDS) de cada geomalla se calculó según la norma BS 8006 usando la siguiente fórmula:

$$LTDS = (F_{creep} \cdot P_{ult}) / (f_{m11} \cdot f_{m12} \cdot f_{m21} \cdot f_{m22})$$

Todos los factores de reducción adoptados fueron confirmados con oportunos certificados de laboratorios independientes, ya que el grado de seguridad de la obra depende directamente de la veracidad de los mismos.

Con las curvas isócronas se puede obtener la variación de la deformación a diferentes niveles de carga aplicada a los geosintéticos, expresada como porcentaje de la tensión última de rotura (Ultimate Tensile Strength: UTS). En la Fig. 5, se muestran las curvas isócronas relativas a las geomallas en PVA. En este gráfico se puede observar como, por ejemplo, al 50% de la carga de rotura la diferencia entre la deformación instantánea (2,8%) y la deformación a 114 años (4,2%) es muy baja. Esta es una característica peculiar de las geomallas en PVA, es decir, poseen elevado módulo elástico y baja fluencia.

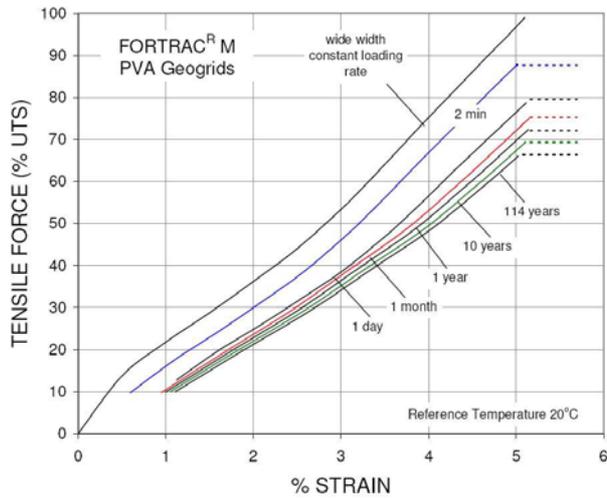


Fig. 5: Curvas isócronas tensión-deformación de la familia de geomallas Fortrac® M en PVA

La estabilidad global del muro se calculó empleando el método de Bishop simplificado (1955), asumiendo superficies potenciales de deslizamiento circulares. El coeficiente de seguridad se definió, por lo tanto, de la relación entre la resistencia al corte disponible (τ_f) y la tensión de corte actuante (τ_m), la cual tiene que ser movilizada para mantener la condición de equilibrio límite.

Los cálculos de estabilidad interna y compuesta del muro segmental se efectuaron analizando superficies de deslizamiento circulares (Bishop) y poligonales (Janbu modificado).

Particular atención se dió al cálculo de la resistencia de la conexión entre bloques y geomallas, ya que una falla por arrancamiento puede causar el colapso parcial de la estructura. En esta óptica se requirieron certificados de pruebas de conexión específicas de los materiales utilizados.

La estabilidad de las conexiones se verificó para cada nivel de bloque/geomalla, siguiendo el procedimiento de la American Federal Highway Administration (FHWA, 2001).

El espacio vertical entre geomallas se fijó en 0,60 m para toda la altura del muro. Además, se agregaron refuerzos secundarios más cortos entre las geomallas principales, en aquellas zonas donde faltaba resistencia de la conexión y para prevenir deformaciones imprevistas del paramento.

En la Fig. 6 se muestra la geometría de una sección típica usada en los cálculos con la respectiva distribución de las geomallas adoptadas y las características geotécnicas de los suelos considerados.

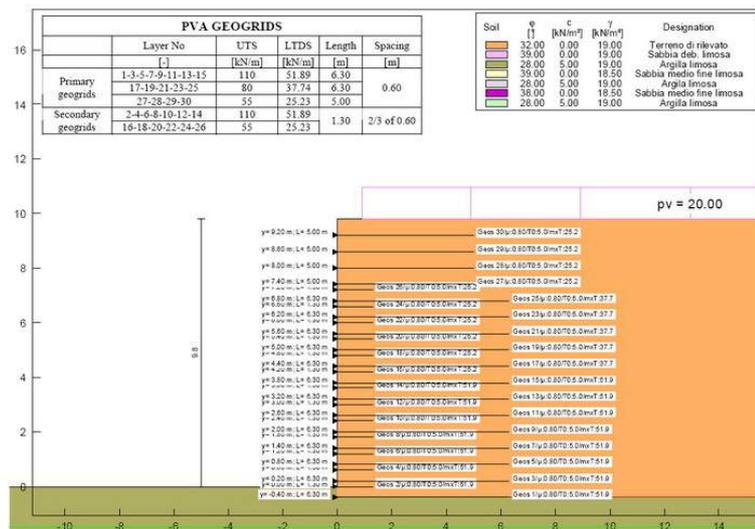


Fig. 6: Sección transversal del muro segmental de 10,2 m de altura

En los cálculos realizados se consideró un efecto sísmico con aceleración horizontal de 0,04·g, y la napa freática a una profundidad de -1,0 m.

La tensión de diseño LTDS de las geomallas se introdujeron en los cálculos de estabilidad de modo de obtener un coeficiente de seguridad mínimo de 1,3; como preveía la normativa italiana vigente.

En este proyecto en particular, la elección de geomallas en PVA era obligatoria debido al ambiente básico en el cual se disponían los refuezos y para limitar la deformabilidad de la estructura vertical. El Polivinil alcohol es un polímero que garantiza valores elevados de módulo elástico, posee baja fluencia y elevada resistencia química, aún en ambientes alcalinos como los suelos estabilizados con cal ($\text{pH} > 12$).

Aspecto estético

El último paso, antes de la aceptación final de parte de las Autoridades de Autopistas, fue la aprobación del muro desde un punto de vista estético y ambiental. Para respetar las condiciones preliminares de los pliegos de condiciones, se eligió el muro segmental tipo Rockwood Classic realizado con bloques de hormigón vibrocomprimidos grises con la faz plana cortada de modo de obtener un aspecto irregular similar a las rocas.



Fig. 7: Vista virtual de la rampa (cortesía de *Venice Link*)

Se prepararon muchas vistas virtuales en tres dimensiones de toda la obra, como las mostradas en las figs. 7 y 8 que fueron presentadas a la Comisión Ambiente para obtener la aprobación.



Fig. 8: Vista virtual del apoyo del puente (cortesía de *Venice Link*)

Las imágenes precedentes sirvieron para demostrar que la solución propuesta no sólo no contrastaba con los requisitos fijados, sino que era además posible obtener una mejoría desde un punto de vista estético respecto a los muros de hormigón armado previstos.

EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

La construcción de un muro segmental es simple y veloz, por esta razón todo el trabajo de construcción se ejecutó en breve tiempo, sobre todo si se compara con el tiempo que hubiera requerido la construcción del muro tradicional de hormigón fundado sobre pilotes profundos.

Los aspectos fundamentales que involucraron la construcción del muro segmental reforzado con geomallas realizado en Preganziol son los siguientes:

- Ejecución de un plano de nivelación con hormigón pobre de 15 cm de espesor y 100 cm de ancho directamente sobre el suelo compactado para garantizar la horizontalidad del primer curso de bloques y el contacto homogéneo de los mismos.
- Rápida construcción del muro: por contrato se instalaron 70 m² de muro por día laboral con una escuadra de siete obreros, usando un compactador y un excavador.



Fig. 9: vista del muro segmental durante la ejecución.

- Coordinación en obra entre la empresa que debía construir el muro segmental (instalación de los bloques, de las geomallas y del suelo de relleno) con la empresa que debía proveer el suelo estabilizado con cal, y que debía extenderlo y compactarlo en el núcleo del terraplén no reforzado.
- Seguridad de los trabajadores: para prevenir eventuales caídas, los obreros trabajaron ligados a un cable de acero que corría paralelo al frente, fijado sobre bloques de hormigón dispuestos alineados a 5-6 m de distancia del frente. De este modo también podían circular sin obstáculos los medios mecánicos (ver Fig. 10).



Fig. 10: Bloques de hormigón y cable de seguridad para ligar los obreros



Fig. 11: vista del muro segmental en la fase final

CONCLUSIÓN

La elección de los muros segmentales de bloques reforzados con geomallas en PVA demostró ser una alternativa válida a los muros en hormigón armado, ya sea desde un punto de vista técnico como desde un punto de vista estético.

Debido a la flexibilidad del sistema fue posible obtener un mejor comportamiento en términos de deformabilidad y de capacidad de redistribuir los cedimientos diferenciales y absolutos, respecto a los muros rígidos en hormigón armado.

La adopción de geomallas en PVA permitió utilizar la tecnología de muros segmentales en terrenos estabilizados con cal, gracias a la óptima resistencia a los ambientes alcalinos, abriendo así una nueva alternativa de aplicación en un campo donde otros geosintéticos de refuerzo no pueden ser utilizados.

Este sistema de muros dió la posibilidad de construir todo el terraplén contemporáneamente con el muro, sin tener que esperar el tiempo de fraguado del hormigón antes de poder extender y compactar el suelo de relleno, como sucede en el caso de muros tradicionales en hormigón armado.

Además se cumplieron con todos los requisitos estéticos fijados por el comitente, dando al terraplén un aspecto agradable y más natural. Se usaron también bloques cortados sólo como revestimiento del muro de hormigón armado de apoyo del puente, de manera de dar un aspecto armónico a toda la estructura.

Los muros laterales de las dos rampas cubren una superficie total de 8.000 m² aproximadamente, es decir más o menos 4.000 m² por rampa.



Fig. 12: vista aerea de la primera rampa

Agradecimientos: se agradece al Consorzio Venice Link, contratista principal, Lago Rosso, subcontratista ejecutor de los muros y a Alberto Simini por la preciosa colaboración técnica.

Contacto: Luis Eduardo Russo, Huesker S.r.l., Piazza della Libertà, 3, Trieste, Trieste, 34132, Italy. Tel: +39 040 363605. Email: l.russo@huesker.it.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Bathurst, Clarabut Geotechnical Testing Inc. 2001. Rockwood Classic Block unit with Huesker Fortrac MP connection capacity testing.

Bishop, A.W. (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 5 (1), 7-17.

British Standard BS 8006:1995. Code of practice for Strengthened/reinforced soils and other fills.

FHWA. 2001. Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design & construction guidelines. FHWA-NHI-00-043.

Italian Ministry of Public Works. 1988. Technical regulations on soil investigation and slope stability design and execution (in Italian).

TRI. 2000. Installation damage testing of Huesker Geosynthetics.

TRI. 2002. Creep and creep-rupture behaviour of Fortrac[®] M (PVA) products.