

De la tierra al cielo: experiencias en el diseño y construcción de estructuras de suelo reforzado *Terramesh*[®] y *Paramesh*[®]

Este artículo, a partir de interesantes casos reales, se centra en una de las soluciones que más ha crecido en los últimos 15 años: el refuerzo del suelo para construir estructuras de terreno reforzado, sobre todo con la técnica, exclusiva de *Maccaferri*, *Terramesh*[®], basada en refuerzos metálicos a base de enrejados de triple torsión y con la solución mixta *Paramesh*[®], que combina refuerzos metálicos con refuerzos sintéticos y que permite la realización de estructuras de contención de gran altura.

Palabras clave: MURO DE CONTENCIÓN, PARAMESH[®], REFUERZO METÁLICO CON ENREJADO DE TRIPLE TORSIÓN, REFUERZO SINTÉTICO, TERRAMESH[®].

 Alex ESEVERRI*, Juan C. PORTELA*, y Robert MAJORAL*.
* A. BIACHINI INGENIERO, S.A. - España

Fundada en 1908, *Bianchini*, una empresa del grupo *Maccaferri*, es una referente en el sector de la Obra Civil en España y Portugal, proporcionando a lo largo de todos estos años soluciones innovadoras en obras de geotecnia y medio ambiente. Desde sus inicios, los gaviones fabricados con malla de Triple Torsión en la factoría de *Bianchini* en Montornés del Vallés tuvieron una rápida aceptación e implantación en España, sobretodo en el sector de la obra hidráulica y la malla de triple torsión en el sostenimiento de taludes. La incorporación de las fibras para el refuerzo estructural del hormigón (de gran utilización en túneles y pavimentos industriales) sumada a la gama de productos fabricados por *Bianchini*, ha dado en los últimos 5 años un empuje aún mayor a la empresa, convirtiéndola en pionera y referente del sector en el ámbito de la Península Ibérica.

Con más de 130 años de existencia, *Maccaferri* ha investigado, diseñado, desarrollado, fabricado y construido soluciones técnicamente avanzadas para resolver problemas complejos en obras civil y de protección del medio ambiente. Con más de 2.500 empleados, está presente en 5 continentes y en más de 100 países distintos. Esta experiencia global, junto con el conocimiento local, ha permitido a *Maccaferri* po-

sicionarse como una empresa líder y de referencia a nivel mundial en el sector de la Obra Civil y en la preservación del Medioambiente.

En *Bianchini*, gracias a nuestro exclusivo *know-how* adquirido a lo largo de los últimos 100 años y gracias a pertenecer a un grupo internacional de primer nivel, podemos ofrecer al mercado una amplia gama de soluciones y productos: fibras metálicas, geocompuestos de drenaje, mallas volumétricas para control de la erosión, geomallas para el refuerzo del asfalto, estabilización de plataformas y refuerzo en suelos blandos, mallas metálicas y barreras dinámicas para estabilización de taludes y evitar la caída de piedras, soluciones para la estabilización de fondos marinos y protección de tuberías y emisarios submarinos, protección de costas, así como una amplia gama de muros y estructuras de contención.

Ámbitos de aplicación de las estructuras de suelo reforzado de *Maccaferri*

Las tipologías de muros y taludes de suelo reforzado que dispone *Maccaferri*, tales como los tradicionales muros de tierra armada, muros verdes, muros combinados, muros reforzados con acabado de piedra o los muros de bloques de hormigón, son de aplicación en multitud de sectores: carreteras (*Fig. 1*), ferro-

carriles (*Fig. 2*), vertederos (*Fig. 3*), reparación de deslizamientos en laderas, puertos, aeropuertos, barreras Duna contra la caída de grandes bloques de piedras (*Fig. 4 y 5*), obras residenciales, obras marítimas (*Fig. 6*), obras hidráulicas (*Fig. 7*) o Minas (*Fig. 8*), por citar algunos ejemplos.

Los sistemas de suelo reforzado exclusivos de *Maccaferri*

Terramesh[®] System (*Tresma*[®] Gavión) y *Green Terramesh*[®] (*Tresma*[®] Verde)

Los sistemas modulares *Terramesh*[®] System y *Green Terramesh*[®] son utilizados para la ejecución de muros y taludes de suelo reforzado. Ambos sistemas han sido desarrollados por *Maccaferri* y están fabricados por enrejados metálicos de malla de Triple Torsión 8x10 de alambre galvanizado *Galfan*[®] (Zn95Al5) y revestido en PVC gris, Ø = 2,70/3,70 mm que actúa como refuerzo. En ambos sistemas, el paramento externo y la armadura de refuerzo metálica constituyen una única estructura continua, excluyendo toda operación de corte y montaje a pie de obra.

Las longitudes de las colas de refuerzo metálico se fabrican a medida y son variables en función de los requisitos de diseño.



[Fig. 1] .- Muro de suelo reforzado *Paramesh*[®] de 26 m de altura diseñado y ejecutado por *Bianchini* en la Autopista A2. Tramo *Ericira - Mafra* (Portugal, 2007).



[Fig. 2] .- Muro *Macres*[®] de 9 m de altura de escamas de hormigón y refuerzo sintético *Paraweb*[®] ejecutada en Italia (2008).



[Fig. 3] .- Mota de contención con suelo reforzado y técnica del Wrap - Around (envuelta de las geomallas en el paramento exterior) de 47 m de altura ejecutada en el Vertedero de Aydin, Turquía (2007).



[Figs. 4 y 5] .- Las barreras Duna de Maccaferri son estructuras de contención de tierras bi-faciales con refuerzos metálicos capaces de contener grandes bloques de piedra. Maccaferri puede diseñar barreras Duna capaces de absorber energías de hasta 20.000 kJ.



[Fig. 6] .- El exclusivo sistema Green Terramesh®, fabricado en alambre galvanizado Galfan® y posterior recubrimiento en PVC, es altamente resistente a fenómenos de corrosión y permite la construcción de estructuras de suelo reforzado al lado del mar, como el muro Terramesh® ejecutado en 2002 en Polonia que se muestra en la fotografía.



[Fig. 7] .- Los módulos Terramesh® System rellenos de piedra, gracias a disponer de un paramento drenante muy resistente a los flujos de agua, constituyen una excelente solución para construir estructuras de suelo reforzado de cierta altura en orillas de ríos, arroyos y encauzamientos tales como muros, taludes o mota de contención.



[Fig. 8] .- Estructura vertical Paramesh® de 21 m de altura en la mina de extracción de platino de Marikana (Sud-África, 2002). El diseño (elaborado por Maccaferri Southern Africa) gracias a la rigidez de los módulos Terramesh® System, permite que camiones y maquinaria de 200 Toneladas trabajen en el frente de la estructura.



[Fig. 9] .- Módulo Terramesh® System. Es indispensable colocar un geotextil en la parte posterior para evitar la pérdida de finos en la zona de contacto con el terreno reforzado.

Como veremos en algunos de los ejemplos del presente artículo, estas características únicas dotan de gran versatilidad a ambos sistemas y permite la ejecución de estructuras de suelo reforzado impensables o de muy complicada ejecución en otros tipos de estructuras de suelo reforzado ejecutadas con métodos más convencionales (por ejemplo con encofrados metálicos perdidos).

En el **Terramesh® System** (Fig. 9), el paramento exterior es una caja de malla de triple torsión (sección 0,8 x 1 m, similar a un gavión) con la inclusión de la malla de refuerzo del terreno. La tapa, la cara exterior y la malla de refuerzo son un único paño de tela metálica. La caja se cierra con otra malla trasera, cosida al frontal. Mediante **Terramesh® System** es posible ejecutar muros de suelo reforzado de inclinaciones casi verticales con un paramento permeable y drenante.

En el caso de **Green Terramesh®** (Fig. 10), y con el fin de dotar al módulo de una mayor rigidez, se incluye en el proceso de fabricación un panel de mallazo electrosoldado en la parte posterior del paramento junto con una serie de tirantes y rigidizadores; todo ello fabricado en acero corrugado. Así mismo el paramento incluye una red de control de erosión fabricada en polipropileno o con fibras naturales de coco.

Sistema Paramesh®

Es una solución de suelo reforzado desarrollada por **Maccaferri** que combina refuerzos metálicos con refuerzos sintéticos (**Macgrid®**, **Paragrid®**, **Paralink®** o **Paradrain®**). Las geomallas actúan como elemento principal de refuerzo del terreno y garantizan la estabilidad global, combinada e interna de la estructura. Los elementos metálicos (módulos **Terramesh®** o **Green Terramesh®**) configuran el frente del muro, actúan como elemento de refuerzo se-

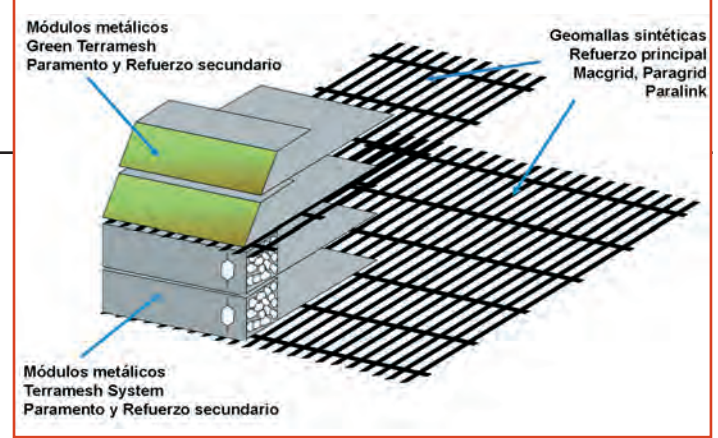
cundario y permiten una mejor compactación, además de garantizar la estabilidad del frente del muro o talud reforzado.

El sistema **Paramesh®** (Fig. 11 y 12) combina las virtudes de los módulos **Terramesh®** (elementos prefabricados que no requieren encofrados por lo que son rápidos y fáciles de instalar, sin fluencia y resistentes al fuego) con las virtudes de las geomallas de refuerzo sintéticas (elevadas resistencias a la tracción).

En comparación con otros sistemas de suelo reforzado, **Paramesh®** es el sistema más fácil de instalar y el que mayores rendimientos de instalación proporciona, posee un paramento sólido, rígido y resistente al fuego, perfectamente conectado con los refuerzos principales que proporciona un acabado de alta calidad. Además, gracias a la combinación de refuerzos principales y secundarios, no es necesario colocar geomallas de refuerzo en cada tongada y éstas se pueden espaciar hasta 3 m.



[Fig. 10] .- Instalación de módulos Green Terramesh®.



[Fig. 11] .- Esquema de una estructura mixta de suelo reforzado Paramesh®.



[Fig. 12] .- Foto de la unión entre los módulos Terramesh® System y Paragrid®. Es necesario diseñar la cola necesaria del módulo Terramesh® System para que la superficie de contacto con Paragrid® sea suficiente para que el conjunto trabaje adecuadamente.



[Fig. 13] .- Los refuerzos sintéticos Paralink® son muy usados en bases de terraplenes como sistemas de refuerzos sobre suelos blandos, para puentear subsidencias o como sistemas de reparto de cargas en cabezas de pilotes.

Los refuerzos sintéticos de Maccaferri Paragrid® y Paralink® (Fig. 13) son elementos de refuerzo formados por bandas geosintéticas mono-axiales. Cada banda longitudinal tiene un núcleo formado por tendones de poliéster de alta tenacidad recubiertos por una funda protectora de polietileno. Las bandas mono-axiales están conectadas entre sí por bandas no resistentes de polietileno, dando al geocompuesto una configuración final de tipo malla.

Paragrid® y Paralink® tienen el certificado CE y BBA. Destacan por tener coeficientes reductores de fluencia (coeficiente reductor de 1,38), de daños mecánicos y de durabilidad extremadamente bajos y unas elongaciones inferiores a las geomallas tejidas convencionales de poliéster. A diferencia de otras geomallas, y gracias a la funda de protección de polietileno, pueden ser utilizadas en ambientes de pH extremos, por ejemplo, en el interior de Vertederos o en suelos estabilizados con Cal. Las geomallas Paralink® se pueden fabricar con resistencias a la tracción en sentido longitudinal de hasta 1550 kN/m, manteniendo unos niveles de elongación a rotura del 9%.

Macgrid® es una geomalla tejida formada por multifilamentos de poliéster de alta tenacidad y recubiertas con recubrimiento polimérico

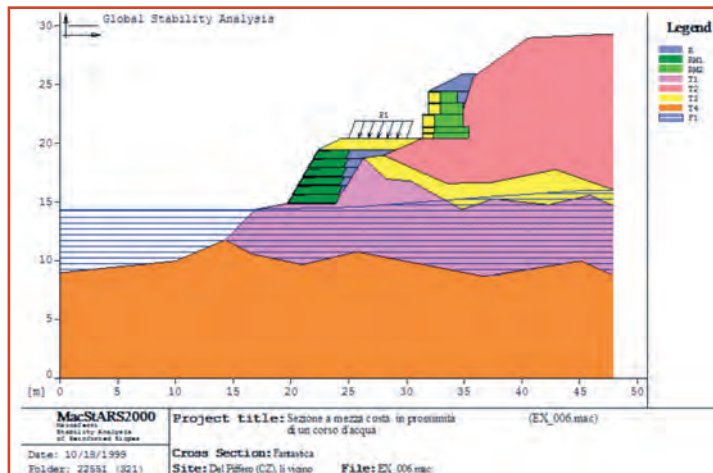
(normalmente PVC). Disponen de certificado CE. Poseen bajos coeficientes de fluencia (del orden de 1,55) pero su rango de aplicación es menor que el de las mallas Paragrid® y Paralink®. Tienen un excelente comportamiento hasta resistencias a la tracción de 200 kN/m con elongaciones a rotura limitadas al 12%. Pueden fabricarse con resistencias a la tracción superiores (hasta 800 kN/m) con elongaciones a rotura limitadas al 16%.

Software Macstars®

Macstars® es un potente software desarrollado por Maccaferri para el cálculo, entre otros, de Muros y Suelos Reforzados. Permite calcular la estabilidad interna y externa de estructuras complejas (Fig. 14). En el programa están introducidos los parámetros característicos de los distintos elementos de refuerzo de Macca-

ferrí (geomallas de refuerzo, Terramesh®, etc.), previamente analizados y certificados en Laboratorios independientes, así como la interacción de estos elementos entre sí y entre los distintos tipos de suelo. El comportamiento de las conexiones entre los elementos metálicos Terramesh® y los elementos sintéticos de refuerzo (ángulos de fricción, pull-out, etc.) introducidos en Macstars® han sido ensayados en el Laboratorio Bathurst, Jarret and Associates Inc.

Macstars® ha sido validado mediante la motorización de estructuras reales y validado con software de elementos finitos (FLAC). Dentro de las bases de datos del software están introducidas también las principales Normativas existentes (con los coeficientes reductores y amplificadores y las combinaciones de acciones definidas en las Normas).



[Fig. 14] .- Ejemplo del Software Macstars®.

Obras significativas

Autopista Scut Norte. Tramo C entre Vila Real y Régua (Portugal).

Con el objetivo de mejorar las comunicaciones de la comarcas interiores de Portugal, se planificó en la zona norte del país la construcción de la *Autopista Scut Norte*, entre las ciudades de Viseu y Chaves. El trazado de la nueva autopista transcurre en una zona de montaña en el corazón de la zona de viñedos de la región de Oporto. El relieve angosto de la región requiere la construcción de numerosos terraplenes, desmontes y estructuras de contención y en muchas partes del trazado las secciones son a media ladera.

Para la realización de las estructuras de contención, de alturas variables entre los 15 y 24 m de altura, la empresa *Norinter*, del grupo *Eiffage*, y concesionaria del tramo C (Vila Real – Régua) escogió la técnica *Paramesh*® con unidades *Terramesh*® *System* rellenas de piedras en el frente del muro y refuerzos geosintéticos *Paralink*® como refuerzo principal (Fig. 15).

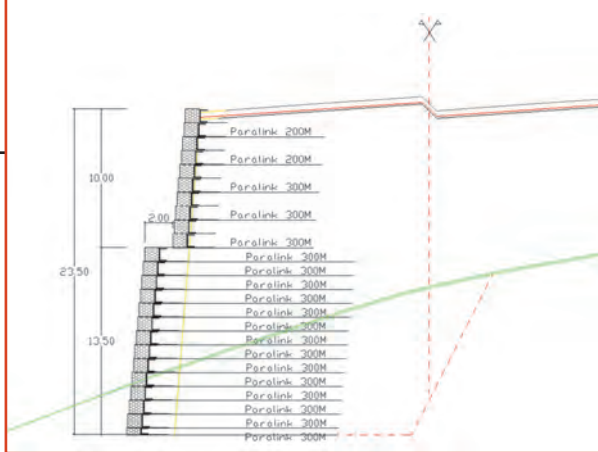
El diseño de los muros de suelo reforzado fue realizado entre *France Maccaferri* y *Bianchini* con el software *Macstars*® (Fig. 16). La solución fue validada por el departamento Técnico de *Norinter (Eiffage – Egis)*. La solución se adaptó a los requisitos de la Obra: muros de gran altura, (la mayoría situados en media ladera), uso del material de relleno de la zona, rapidez de construcción, estética y adaptabilidad al entorno paisajístico. Las estructuras se diseñaron en condiciones estáticas y sísmicas.

En total se construyeron 15.000 m² de muro reforzado, con alturas máximas de 24 m. Se utilizaron más de 15.000 m² de *Paralink*® y los rendimientos medios de instalación a lo largo de la Obra fueron de 44 m²/día, con un equipo de 4 personas trabajando 8 h. Las obras empezaron en julio de 2002 y terminaron en noviembre de 2003 (Figs. 17 y 18).

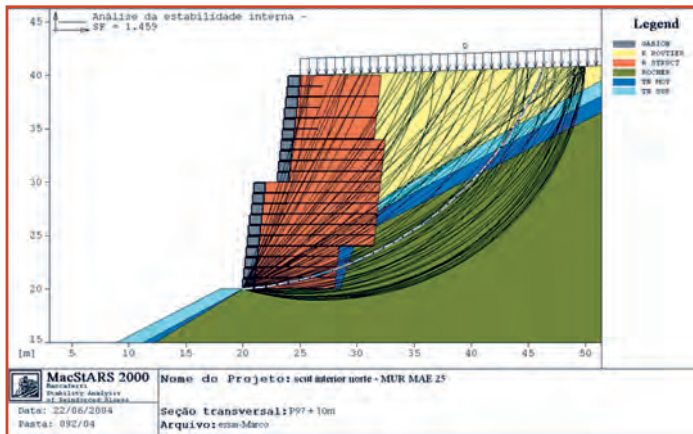
Depósito de almacenamiento de Gas en Tahití

La obra que se describe a continuación no destaca precisamente por su dimensión, pero es un ejemplo de la versatilidad y de las posibilidades que ofrece el sistema *Green Terramesh*®, así como un ejemplo de la presencia geográfica del grupo *Maccaferri*.

La empresa *Gaz de Tahiti* encargó a la empresa *Tissot*, líder mundial de sistemas de almacenamiento de petróleo, gas y criogénico, la construcción de una esfera de almacenamiento de gas propano. La esfera se diseñó siguiendo las últimas especificaciones francesas en materia de protección y riesgos sísmicos. Por ello, se decidió protegerla con una capa de tierras con un espesor mínimo de 1 m.



[Fig. 15] .- Sección tipo de la obra en la autovía Scut Norte en Portugal.



[Fig. 16] .- Cálculo de la estabilidad interna mediante el Software Macstars®.



[Fig. 17] .- Foto de los muros Paramesh terminados.



[Fig. 18] .- Vista desde la carretera de los muros Paramesh terminados.

France Maccaferri colaboró con *Tissot* en el diseño y concepción de la solución. La solución adoptada fue el sistema *Green Terramesh*®, fabricado con enrejados de triple torsión recubiertos en PVC. Los módulos *Terramesh*® (paramento + control de erosión + refuerzo en un solo producto) se fabricaron a medida y permitieron el triple efecto necesario para llevar a cabo la complicada tarea de cubrir por completo la esfera con tierra: refuerzo y contención del suelo, favorecer el

crecimiento de la vegetación y la compactación del suelo (Fig. 19). El volumen total de suelo reforzado fue de 2.165 m³, con un diámetro en la base de 22.5 m y una altura total de 18 m.

La Obra se ejecutó en la ciudad de Papeete, en la isla de Tahití (Polinesia Francesa) en el año 2002. Esta Obra es sólo uno de los ejemplos de depósitos de almacenamiento de gas cubiertos con tierra y estructuras *Green Terramesh*® realizados en todo el mundo.



■ [Fig. 19] .- Distintas etapas de la cubrición con tierra del depósito con módulos Green Terramesh®.

Barreras Duna CEPAV UNO entre la Autopista A1 y la Línea de Alta Velocidad Milán – Bolonia (Italia)

En los tramos donde la Línea de Alta Velocidad Milán – Bolonia transcurre paralela a la autopista A1, el ente público R.F.I. – Italferr decidió construir una barrera de seguridad entre ambas infraestructuras para proteger su obra de eventuales colisiones producidas por vehículos.

Por falta de espacio, en gran parte del recorrido no era factible construir un terraplén con pendientes 2V/3H (solución tradicional) por lo que la solución que ideó la Ingeniería Lotti Associati de Roma, en colaboración con Maccaferri, consistió en estructuras **Duna** de suelo reforzado bi-faciales que permitieron reducir el espacio en planta a base de verticalizar las pendientes de los taludes.

De los distintos tipos de sistemas **Duna** de Maccaferri, los más utilizados fueron:

- Duna simétrica 60/60 (Fig. 20), con inclinaciones a ambos lados de 60° y una altura de 3 m.
- Duna asimétrica 90/60 (Fig. 21), de inclinación 90° por el lado de la Línea de Alta Velocidad y de 60° por el lado de la autopista y una altura de 3 m.

Todos los elementos de refuerzo de los sistemas **Duna** utilizados están constituidos por enrejados de Triple Torsión de alambre galvanizado **Galfan**® y plastificado $\varnothing = 2,20/3,20$ mm.

El paramento revegetable de inclinación 60° está constituido por elemento en malla electrosoldada galvanizada **Galfan**® plastificada con apertura 90 x 83 mm de alambre de 6 mm de espesor y una manta de coco insertada en el interior para favorecer el crecimiento de la vegetación.

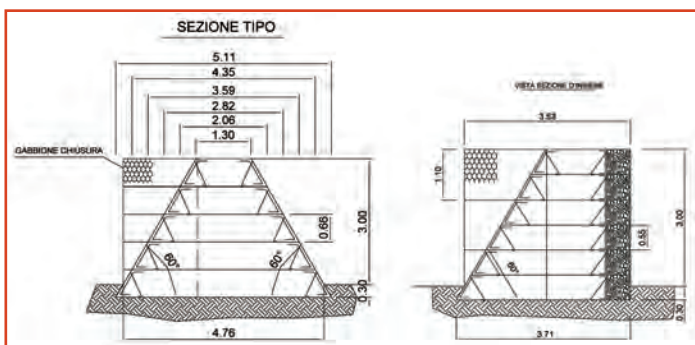
El paramento vertical está constituido por un panel de malla electrosoldada con apertura de malla más reducida (50 x 50 mm), por la necesidad de rellenar el frente del paramento con el balasto existente ($\varnothing 60 - 120$ mm).

El terreno del terraplén estructural se compactó en tongadas de 30 cm. El material provenía de las propias excavaciones de la Obra y pertenece a los grupos A4, A5, A6 y A7 de la clasificación *UNI 10006:2002*, con un ángulo de fricción mínimo de 20° y una densidad comprendida entre 18 y 20 kN/m³. La compactación exigida fue del 80% del *Proctor Normal*. Una vez se terminó el sistema **Duna** se procedió a la realización de una hidrosiembra en los paramentos de 60° de inclinación.

Las Barreras de seguridad **Duna** de **Maccaferri** cumplieron con los requisitos establecidos por el proyectista y las dos Administraciones involucradas:

- Capacidad para absorber grandes cantidades de energía cinética. El sistema **Duna** debe de constituir un obstáculo insalvable.
- Se diseñaron para poder utilizar el terreno existente en el lugar, de bajas características mecánicas
- Elevada durabilidad, garantizada gracias al recubrimiento **Galfan**® y al posterior recubrimiento plástico de los refuerzos metálicos de enrejado de triple torsión.
- Elemento resistente frente a los incendios.
- Facilidad en la instalación por la utilización de elementos prefabricados realizados a medida.
- Facilidad en el mantenimiento en el caso de daños causados por el impacto de vehículos.
- Bajo impacto ambiental, sobretudo en el lado de la autopista donde la Administración exigía un revestimiento vegetalizable.
- Solución versátil para adaptarse a las cambiantes geometrías debido a las múltiples interrupciones e intersecciones de las barreras **Duna** a lo largo de la traza de la infraestructura: zanjas, caminos y canales transversales (Fig. 22).

En total, se construyeron 100 km de **Duna**, lo que representa una medición de 600.000 m² de cara vista (Figs. 23 y 24).



■ [Figs.20y21] .- Duna 60/60 (izquierda) y Duna 90/60 (derecha).



■ [Fig. 22] .- Detalle de la terminación de un tramo de Duna.



■ [Fig. 23].- Vista general de la Obra.



■ [Fig. 24].- Tramo de Duna 60/60, ya finalizado.

Refuerzo

Muros Paramesh® en la autopista RRESHEN-KALIMASH (Albania)

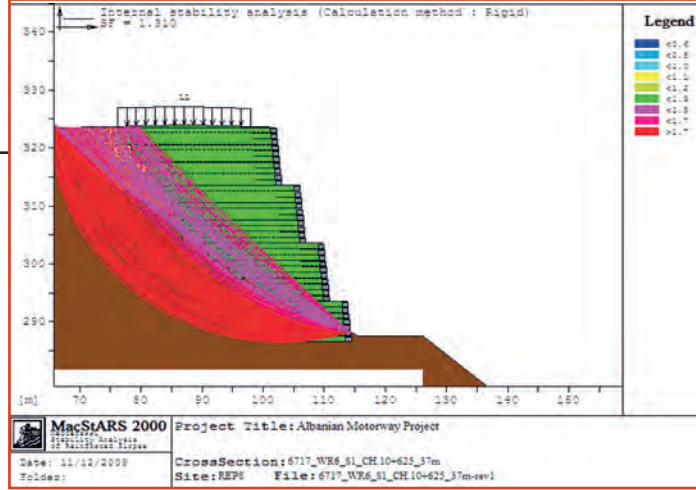
La autopista, de 103 km de largo, es una conexión clave entre Durres, el principal puerto de Albania en el mar Adriático, y Kosovo. La autopista, ya terminada, ha permitido reducir el tiempo de conexión entre los dos lugares de las 6h que se tardaba a las 2h actuales, y ayudará a estimular la economía de la región del noreste de Albania. El tramo central de la autopista, entre Rreshen y Kalimash, tiene una longitud de 61 km y fue adjudicado a la UTE *Bechtel Enka (BEJV Joint Venture)*. Las obras terminaron en septiembre de 2009.

La autopista, de cuatro carriles de 3,75 m de ancho (dos en cada sentido) más dos arce-nes de 2 m de ancho se encuentra en una zona de difícil acceso rodeada de montañas con picos de más de 1000 m de altura y lade-ras de fuerte inclinación y longitud. Debido a la cambiante morfología del terreno muchos de los tramos eran a media ladera, por lo que se tuvieron que construir grandes terraplenes y desmontes. Fueron necesarias soluciones de refuerzo, de control de la erosión y revegetación así como soluciones de protección contra la caída de piedras.

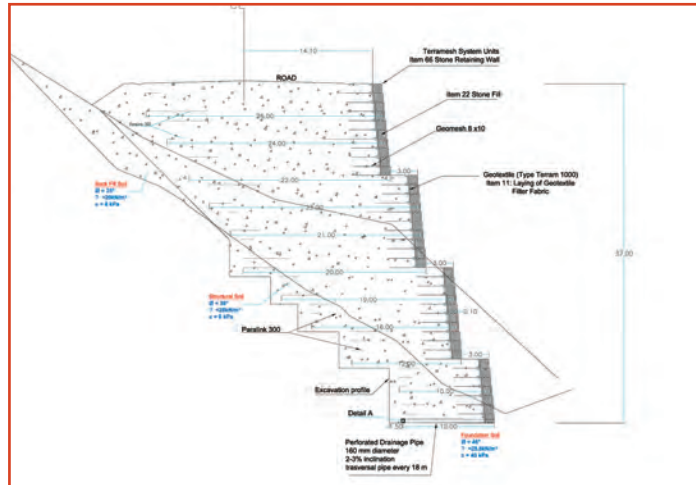
Maccaferri, a través de su sucursal *Albania Draht*, fue la empresa responsable del diseño, que se realizó con el software *Macstars®* y utilizando la norma *British Standard (Fig. 25)*, suministro, instalación y asistencia completa du-rante la fase de construcción de 30 muros de suelo reforzado, que contabilizaban más de 35.000 m² de cara vista con alturas de hasta 37m (*Fig. 26*). Los muros tenían que tener una inclinación de 84° y la solución adoptada fue el sistema *Paramesh®* de *Maccaferri* con unida-des *Terramesh® System* en el frente del muro y geomallas *Paralink® 300* como refuerzo principal, colocadas en tongadas horizontales y separadas 1 o 2 m dependiendo del diseño y de la zona del muro (*Fig. 27*). Los muros de suelo reforzado construidos en Albania por *Maccaferri* fueron, en su día, de los más altos jamás realizados en todo el mundo con esta tipología de diseño.

En los desmontes resultantes se aplicaron soluciones *MacRo* de *Maccaferri*, en concre-to: *geocompuestos Steelgrid®* como sistema de protección contra los desprendimientos, *barreras dinámicas CTR 05-07-B* para evitar la caída de bloques en la carretera y geocom-puestos volumétricos *BianMat® R1 6822 GN* para control de la erosión y revegetación.

En la zona del muro *Paramesh®* de con-tención reforzado mas alto de la Obra y debi-do a los problemas de estabilidad que presen-taba uno de los principales desmontes se construyó otra estructura *Paramesh®* de 35 m de alto, reforzada con bulones con el objeti-vo de mantener la estabilidad de la ladera dentro



[Fig. 25].- Cálculo de estabilidad interna del muro mas alto de la Obra realizado con *Macstars®*.



[Fig. 26].- Sección tipo del muro mas alto de la Obra.



[Fig. 27].- Muro *Paramesh®* en construcción. Puede apreciarse la pendiente de la ladera por la que transcurre la autopista.



[Fig. 28].- Doble estructura *Paramesh®*, como sistema de contención (muro inferior, de altura 37 m) y como muro situado a pie de ladera (muro superior, de 35 m de altura).

de los límites aceptables definidos en el Pro-yecto. Esta doble muro *Paramesh®* (37 m +

35 m), es uno de los mas altos jamás proyec-tados y construidos por *Maccaferri (Fig. 28)*.

Vía de comunicación entre la Villa de Lousada y la EM 562 (Portugal)

Durante la construcción de la vía de acceso a la Zona Industrial de Lustosa, entre la A11/IP9 y la A4/IC26, se debía salvar una vaguada natural. De las distintas soluciones que se propusieron la elección fue una estructura de suelo reforzado bi-facial (2500 m² de muro en un lado y 2100 m² en el otro) mixta **Paramesh**[®] formada por módulos **Green Terramesh**[®] y **Terramesh**[®] System y refuerzos sintéticos **Macgrid**[®] y **Paralink**[®]. La Obra se ejecutó en 2010 y se utilizaron 30.000 m² de refuerzo sintético y 1900 módulos **Terramesh**[®].

Los módulos **Green Terramesh**[®] se utilizaron en la parte central de la estructura y constituían la mayor parte de los muros (80% del área total). Los módulos **Terramesh**[®] System se utilizaron en los extremos de los muros, justo en la zona de contacto con el terreno natural, en coronación y en la parte inferior del muro. El objetivo era doble.

La *Dirección de Obra (Fiscalização)* quería aislar completamente la estructura (la zona ha recibido en los últimos años varios incendios) y crear una barrera para evitar la propagación del fuego que podría dañar la estructura. Los módulos **Terramesh**[®] System, fabricados con enrejado de triple torsión de alambre galvanizado **Galfan**[®] y recubierto de PVC y con una terminación en forma de cestas rellenas de piedra son una excelente solución ya que son completamente resistentes al fuego (**Fig. 29**).

La presencia de un arroyo que atraviesa el muro bifacial, y que se canalizó mediante cajones de hormigón, obligaba a colocar en la zona inferior de los muros un frente de muro resistente al flujo de agua y que además evitara la socavación por erosión en el caso de fuertes crecidas de agua. De nuevo los módulos **Terramesh**[®] System rellenos de piedra fueron la mejor opción (**Fig. 30**).

Aeropuerto de Pakyong en Sikkim (India)

Sikkim existe como Estado de la India desde 1975. Al no disponer de costa, los únicos accesos son por carretera. Debido a su hermoso paisaje, variedad de fauna y flora y su privilegiado emplazamiento en la cordillera del Himalaya (**Fig. 31**), Sikkim es un reclamo turístico con un potencial enorme. La estación de ferrocarril más cercana es New Jalpaiguri y el aeropuerto más cercano es el de Bagdogra. Ambos están situados a 120 km de Gangtok, la capital de Sikkim. La región posee unas amplias posibilidades de desarrollo turístico, pero al no disponer de aeropuerto, no existe un acceso directo. Por estos motivos, se propuso la construcción de un nuevo aeropuerto en Pakyong, situado a 33 km de la capital Gangtok.

El aeropuerto de Sikkim, que se encuentra situado en Pakyong y ocupa una superficie de 81



[Fig. 29].- Vista general de la obra.



[Fig. 30].- vista general de la obra.

ha en una zona montañosa rodeada de valles y estribaciones. La pista de despeje y aterrizaje está situada en dirección N-S, tiene una longitud de 1820 m y un ancho de 150 m. El terreno de la zona donde se ubica la pista es una ladera natural en dirección O (zona de excavación)-E (zona de terraplenado). Las condiciones que impuso la Autoridad Aeroportuaria para validar las soluciones propuestas fueron las siguientes:

- El material para realizar el terraplenado debe de ser el material procedente de la excavación.
- Los desmontes tienen alturas comprendidas entre los 4 y los 111 m de altura y los terraplenes resultantes alturas de 4 m a 72 m. Los volúmenes de movimiento



[Fig. 31].- Foto de la ladera natural donde se emplaza el aeropuerto de Sikkim, antes de empezar las obras.

de tierras involucrados (6,5 millones de m³) se debe compensar.

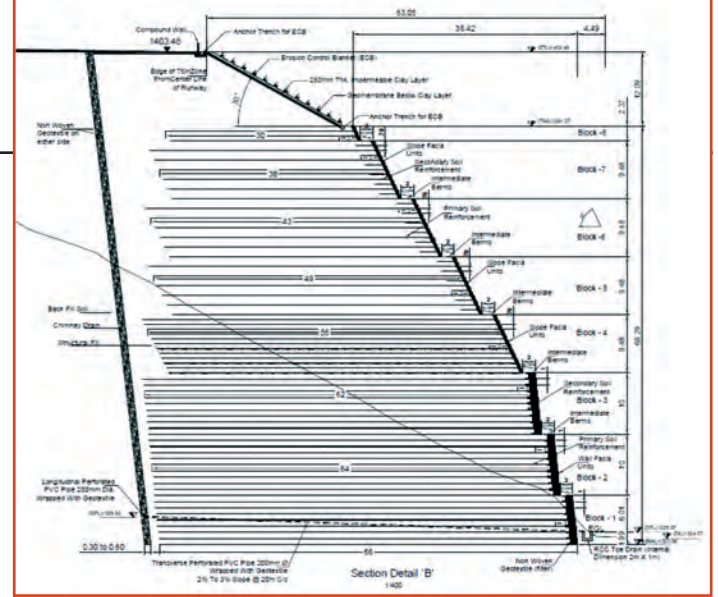
- Debido a las elevadas precipitaciones de la zona, el drenaje de las aguas pluviales y subterráneas es uno de los aspectos primordiales del Proyecto. Éste debe de estar perfectamente definido y diseñado siendo indispensable dar continuidad a los arroyos que cruzan la pista del aeropuerto para seguir asegurando el abastecimiento de agua de los habitantes que viven aguas abajo de la infraestructura.
- Las estructuras proyectadas tiene que ser ecológicas y no pueden provocar efectos negativos ni en el medioambiente y en los hábitos locales (el aeropuerto es visible desde la autopista, desde la terminal de pasajeros y desde casas situados en el pie de la ladera).

Mott Macdonald India, el proyectista de la Obra y la constructora principal *Punj Lloyd*, con sede en Delhi, han confiado en *Maccaferri Environmental Solutions Pvt. Ltd India* para llevar a cabo los diseños y la construcción de las estructuras de terraplén de suelo reforzado, los sistemas de estabilización y control de la erosión de los desmontes y parte de los sistemas de drenaje de la Obra (**Fig. 32**). En concreto, *Maccaferri Environmental Solutions Pvt. Ltd., India* ha propuesto para esta Obra las siguientes soluciones:

- Estructuras de suelo reforzado **Paramesh**[®] para estabilizar los terraplenes de la Obra y cuyas alturas van desde los 4 a los 72 m de alto.
- Muros de contención de gaviones.
 - Sistemas de control de la erosión en los taludes de desmonte y de terraplén mediante la utilización de mantas orgánicas **Biomac**[®] CC.
 - Estructuras de drenaje para canalizar las aguas superficiales, formadas por gaviones en forma de cascada.



[Fig. 32].- Vista aérea de la obra.



[Fig. 33].- Sección tipo de una de las estructuras de contención Paramesh® de la Obra.

El terreno de la zona es una mezcla de tierra y piedras. En los estratos superiores el terreno estaba fragmentado y muy meteorizado. A medida que se excavaba en profundidad, el grado meteorización disminuía hasta llegar a la roca sana. Debido a la situación del aeropuerto en relación a las colinas colindantes, la posición de la pista estaba fijada, por lo que el diseño debía de adaptarse a este condicionante.

Gran parte de la ladera se excavó y el material se utilizó para construir el terraplén. Se diseñaron muros de gaviones de 3 m de alto en el pie de los desmontes resultantes con un doble objetivo: estabilizar los taludes y proporcionar tacones de drenaje. Los taludes de desmonte se recubrieron con mantas de coco (ancladas al terreno con piquetas en forma de U) con el objetivo de reducir la erosión superficial y favorecer el crecimiento de la vegetación. De esta forma se conseguía que los elevados desmontes se estabilizasen de una forma rápida y segura y se integrasen plenamente en el entorno.

Los muros de gaviones se diseñaron siguiendo las normas BS 8002:1994 y AASHTO y se verificó que los FS obtenidos para las comprobaciones de deslizamiento, vuelco, presión en la cimentación y estabilidad global fuesen superiores a los exigidos en la norma americana AASHTO.

Para mantener el terraplén dentro de los límites del aeropuerto en el lado valle, se planificaron estructuras de contención de tierras casi verticales con alturas comprendidas entre los 4 y los 72 m. El sistema Paramesh® fue la solución adoptada para la construcción de los terraplenes reforzados. Se introdujeron capas de Paralink® (de rango comprendido entre los 200 kN/m y los 900 kN/m) como refuerzo principal (Fig.33). Para prevenir desprendimientos locales y mejorar la compactación en el frente del muro se utilizaron como revestimiento frontal módulos Green Terramesh®, Terramesh® System o una combinación de ambos sistemas. La elección de uno u otro sistema fue en función de la disponibilidad de espacio y de las necesidades de introducir cajones de hormigón (drenaje transversal) (Figs. 34 y 35).

Una vez la estructura Paramesh® esté terminada, será una de las estructuras de suelo reforzado construidas más altas en el mundo.

El diseño de las estructuras de suelo reforzado se realizaron siguiendo la Norma británica BS: 2006 y para el análisis sísmico la Norma AASHTO y los criterios de la FHWA. Para la determinación de los coeficientes sísmicos se utilizó la Norma India IS 1893 (Parte 1): 2002. Todas las secciones fueron calculadas mediante el software Macstars®. Se realizaron cálculos de estabilidad interna (deslizamiento,

Pullout y Rotura de los elementos de refuerzo) y estabilidad externa (global, deslizamiento y comprobación de la cimentación) en condiciones normales y de sismo (Fig. 36).

La zona donde está ubicado el aeropuerto de Sikkim recibe unas precipitaciones anuales muy elevadas (el promedio de los últimos 5 años es de 4000 mm/año). Debido a la magnitud de estas intensidades de lluvia, la planificación y diseño de la red de drenaje de la Obra era uno de los aspectos más importantes del Proyecto.

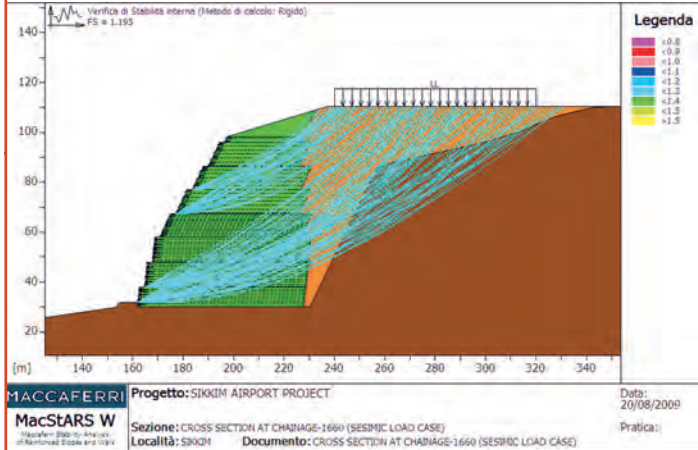
En total se contabilizaron 11 arroyos (Jhoras) dentro del límite de la Obra. El sistema de drenaje propuesto debía permitir la continuidad aguas abajo de los 9 arroyos que la pista del aeropuerto intercepta. Estos arroyos se interceptan al excavar los desmontes. La solución fue canalizarlos mediante gaviones escalonados en forma de cascada que se extendían desde las partes altas de los desmontes hasta la zona de los muros de gravedad de gaviones situados al pie de los desmontes. La canalización de los arroyos más la escorrentía superficial se recoge en unas zanjas drenantes situadas a lo largo de toda la longitud de la pista. El gradiente de estos drenes longitudinales se diseñó para distribuir el flujo de agua en 4 cajones de hormigón que cortan transversalmente la pista del aeropuerto y que desembocan en la zona inferior de las estructura Paramesh® (Fig. 37).



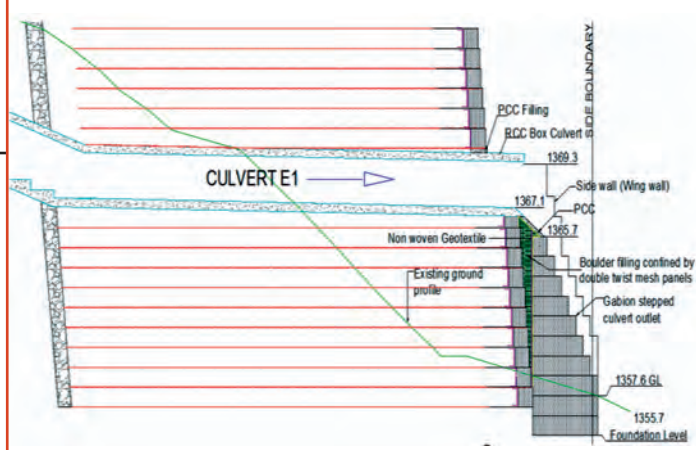
[Fig. 34].- Vista general de la Obra donde se aprecian las geomallas Paralink®.



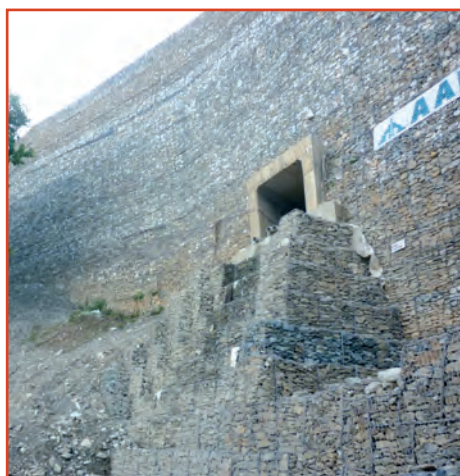
[Fig. 35].- Vista general de la estructura Paramesh®, con los módulos Terramesh® System en el frente de la estructura de contención.



[Fig. 36].- Cálculo de la estabilidad interna en condiciones de sismo realizada con Macstars®.



[Fig. 37].- Detalle constructivo de la estructura Paramesh®.



[Fig. 38].- Detalle de la salida de los cajones de hormigón y la estructura escalonada de gaviones.



[Fig. 39].- Panorámica de las estructuras Paramesh®.



[Fig. 40].- Panorámica de las estructuras Paramesh®.



[Fig. 41].- Panorámica de las estructuras Paramesh® con vegetación.

Como la altura entre la salida de los cajones de hormigón y la base de las estructuras **Terramesh®** era relativamente alta (entre 9 y 11 m), se han construido estructuras escalonadas de gaviones en forma de cascada para disipar la energía, proteger el frente del suelo reforzado y la cimentación de la estructura **Paramesh®** (Fig. 38).

En el trasdós de la estructura de suelo reforzado se ha colocado una capa de gravas envuelta entre dos geotextiles (que actúan como anticontaminante de finos) con el objetivo de cortar los flujos de agua subterránea.

Estado actual del Proyecto

La Obra se empezó a construir en el año 2009 y su finalización está prevista en 2013. En total, se habrán ejecutado unos 56.000 m² de **Paramesh®** y se habrán utilizado 1.500.000 de m² de **Paralink®**, 12.000 unidades de **Terramesh® System** y 20.000 unidades de **Green Terramesh®** (Fig. 39, 40 y 41).

La construcción ha sido especialmente difícil debido a las fuertes lluvias caídas durante la construcción (sobre todo durante las primaveras y durante los periodos del monzón de verano).

La robustez y el diseño del terraplén reforzado ha quedado demostrado al soportar la estructura, en setiembre de 2011, un sismo de magnitud 6.8. Este terremoto ha dañado significativamente otras infraestructuras de la zona (incluso han colapsado algunos muros de contención) y ha producido importantes deslizamientos de tierras cerca de la zona de la Obra. La estructura **Paramesh®** ha permanecido intacta, lo que demuestra la gran flexibilidad y el excelente comportamiento frente a sismos que presentan las estructuras **Paramesh®**.

El Proyecto del Aeropuerto de Sikkim ha recibido entre otros los siguientes premios: *Premio de Oro*, que ha entregado la Fundación *Greentech Foundation* al Cliente final del Proyecto y el *Premio Proyecto internacional del*

año, que ha entregado la revista *Ground Engineering* a *Maccaferri*.

Agradecimientos

Los autores de este artículo quieren agradecer la ayuda y colaboración prestada en la realización de este artículo a *Matt Showan* (International Marketing Manager *Maccaferri*), *Jayakrishnan P.V.* (Corporate *MacRes* Specialist & International Projects Manager *Maccaferri*), *Moreno Scotto* (Geosynthetics International Manager *Maccaferri*) y *Marco Vicari* (International Technical Manager *Maccaferri*).

BIANCHINI INGENIERO
 Diputación, 279 - 1º •
 080007 Barcelona.
 ☎: 934 961 300
 Fax: 934 961 301
 Web: www.bianchini.es