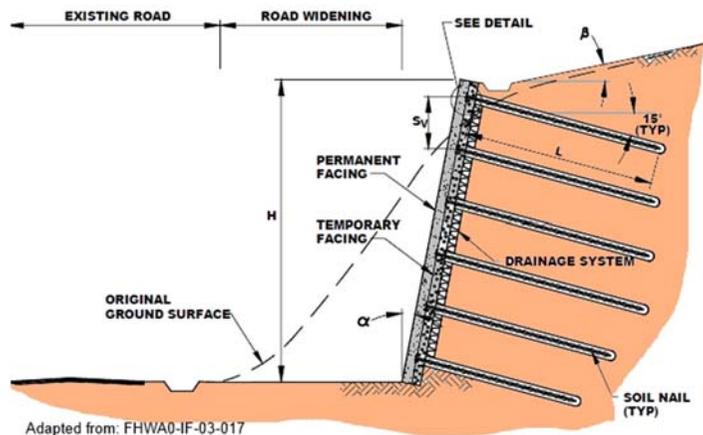


Muro de geomallas. Estabilización de talud. Ronda Este de Málaga

Tomada de Internet (Tierra Armada Chile S.A.)



Adapted from: FHWA0-IF-03-017

Internet. Página de Deep Excavations

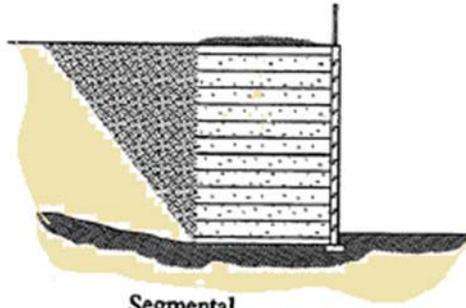
ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO I GENERALIDADES

Luis Ortuño
Uriel & Asociados, S.A.
Universidad Politécnica de Madrid

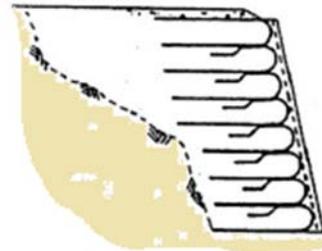
- 1.- Introducción. Definición y origen
- 2.- Tipos de contenciones de suelo reforzado
- 3.- Principios de funcionamiento
- 4.- Suelo claveteado (Soil Nailing)
- 5.- Muros de “tierra armada” y taludes de suelo reforzado

- El suelo es un material clástico con resistencia eminentemente friccional. Apenas resiste a tracción
- La idea de reforzarlo para que soporte tracciones es muy antigua. Quizás el adobe sea el ejemplo más antiguo de refuerzo del suelo
- **El suelo reforzado es básicamente un material compuesto por una matriz de suelo y unos elementos, lineales, superficiales, abiertos o cerrados, embebidos en la matriz, que trabajan predominantemente a tracción**

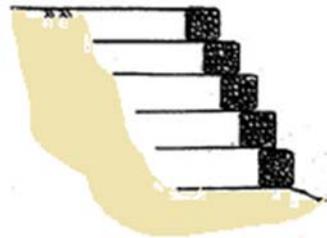
Definición tomada de Geotecnia y Cimientos III.



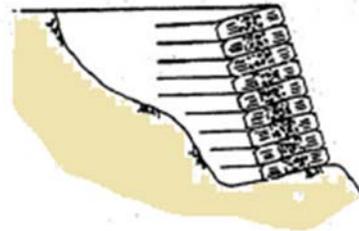
Segmental
Precast Concrete



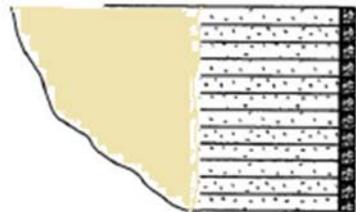
Geotextile
Wrapped-Facing
with Shotcrete Cover



Gabion-Facing



Tire-Facing Units



Modular Block Wall Units

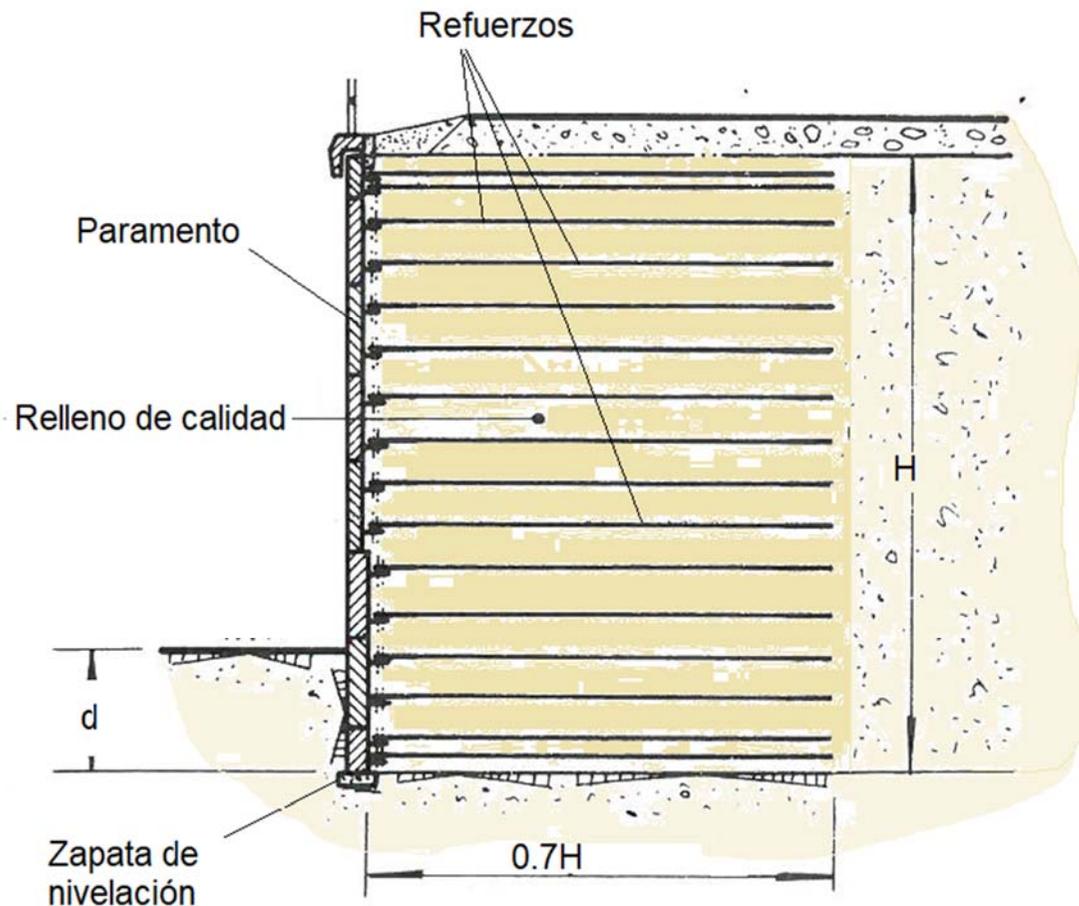


Full-Height Concrete Panel

Los muros de suelo reforzado son estructuras destinadas a conseguir desniveles verticales o de ángulo pronunciado mediante el empleo de suelos de calidad, compactados por tongadas y reforzados con elementos metálicos o geosintéticos que funcionan fundamentalmente a tracción

Son económicos, fáciles de construir y sustancialmente flexibles (admiten asentamientos considerables)

ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN MURO DE SUELO REFORZADO (CASO DE TIERRA ARMADA)



La longitud de los refuerzos suele ser del orden de $0.7H$ como mínimo ($0.5H$ en algunos países). Dependiendo de las condiciones de estabilidad (global, hundimiento, etc), o de carga (apoyos de vigas cargadero) la longitud final de refuerzo puede aumentar significativamente

- El empotramiento de la zapata es al menos del orden de 60 a 70 cm

- El uso de refuerzos a tracción se remonta a los zigurats de Mesopotamia

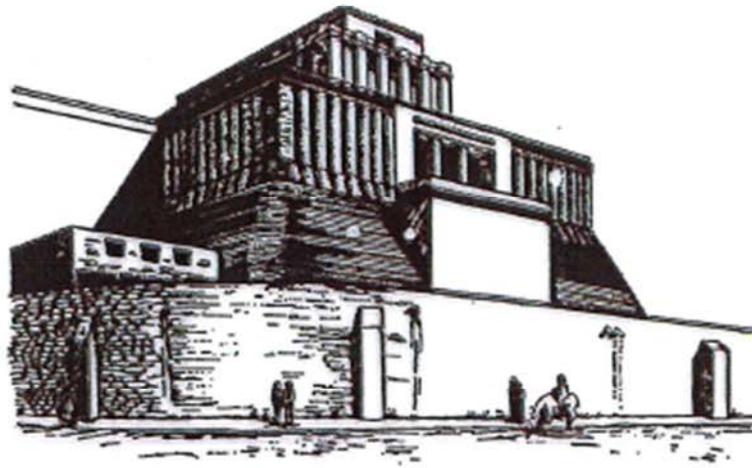
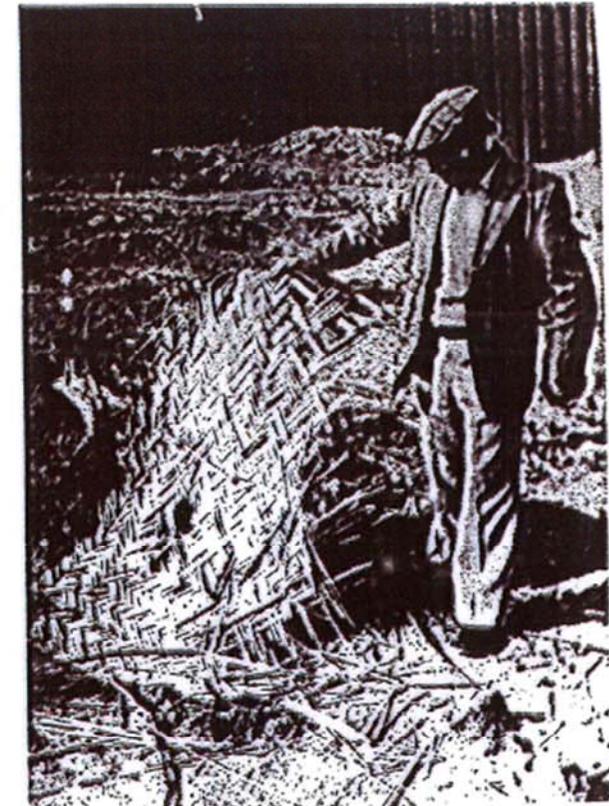


Photo 4. Reconstruction of Temple I at Eridu, by M. E. Weaver (after Lloyd).



Tomadas de Kerisel, J., op. cit.

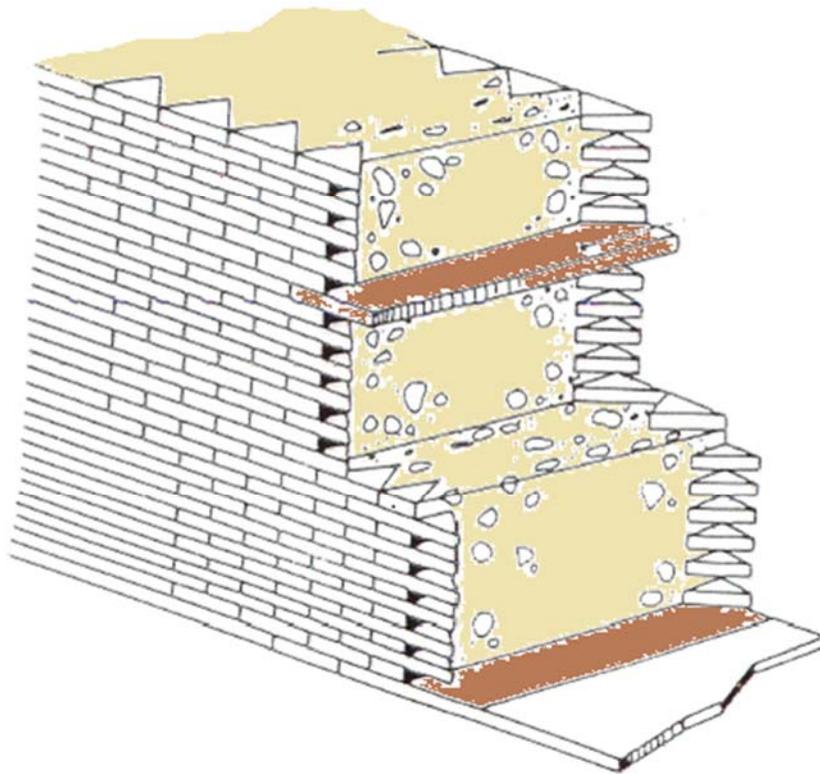
- “... the ziggurat at Aqar Quf was built on sun-dried bricks with, every eight or nine courses, an 8 cm layer of sand containing mats of woven reeds and powerful cables of plant tissue which together absorbed the horizontal thrust that tended to split the mass of the ziggurat”...

- La muralla China está construida con los materiales que había en cada lugar. En algunas zonas desérticas se construyó con arena armada con ramas de tamarisco y de caña



Tomadas de internet





- Muro de hormigón romano entre paredes de ladrillo para cimentaciones. Los tablonces de madera funcionan como tirantes para contrarrestar el empuje del hormigón fluido

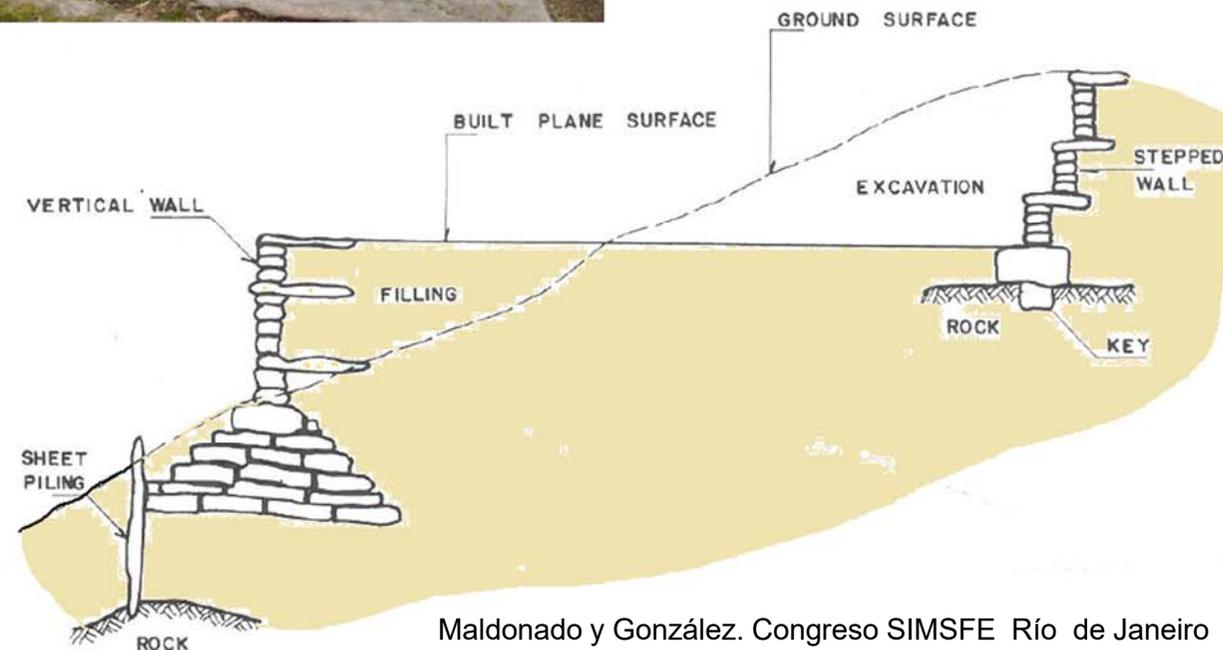
Tomada de Kerisel, J. op. cit.



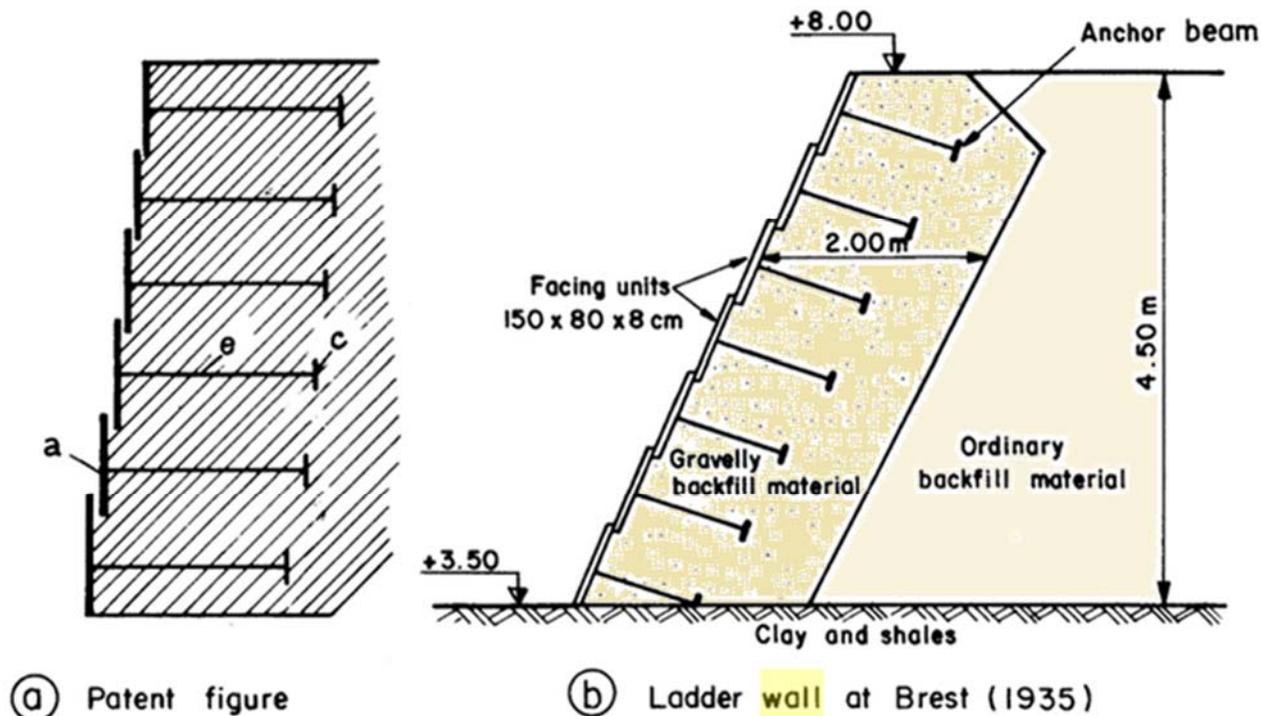
Tomada de Internet

Muros de Tairona (siglos VIII - IX)

Refuerzo con lajas de piedra



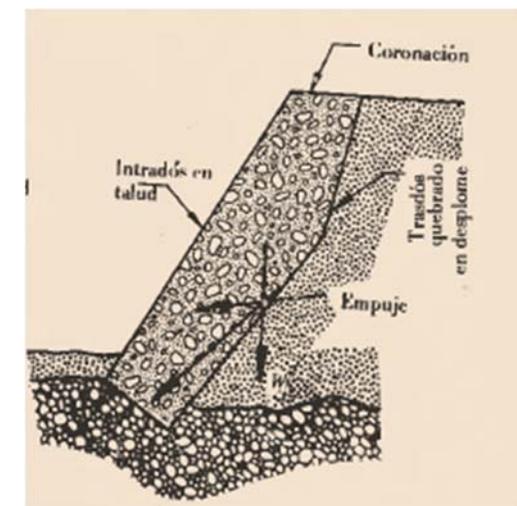
Maldonado y González. Congreso SIMSFE Río de Janeiro



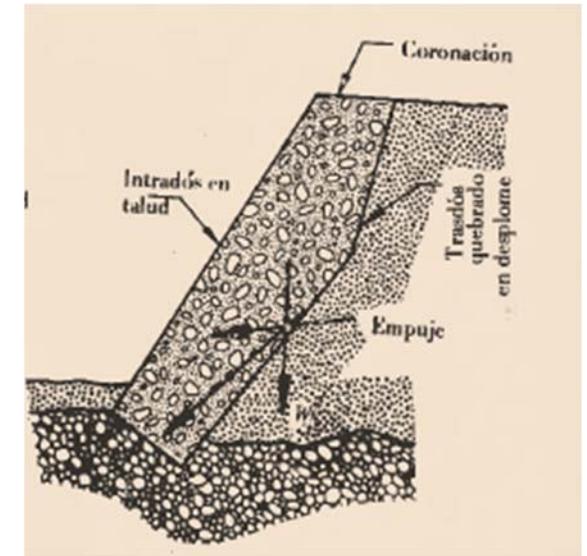
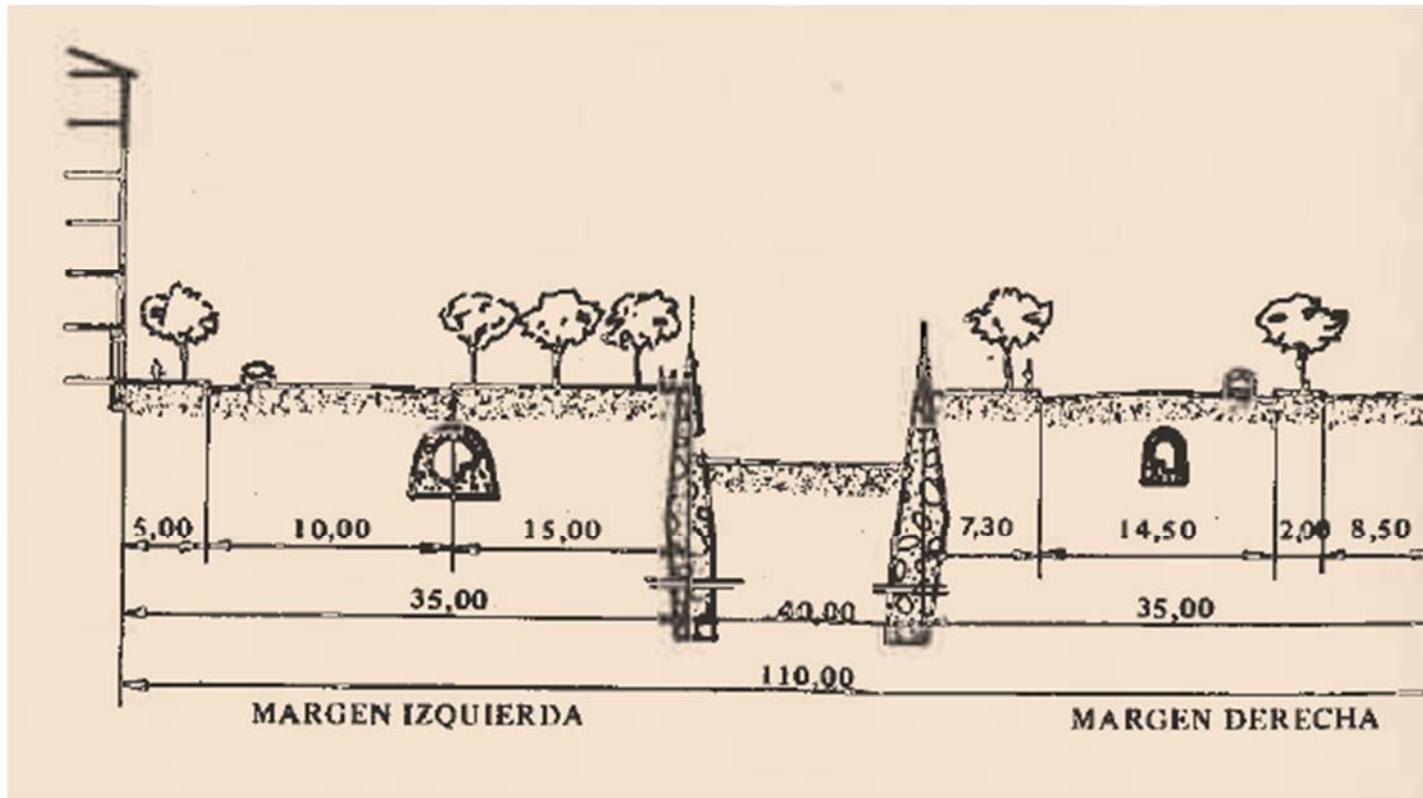
Tomada de Schlosser & Delage op. cit.

Muros reforzados patentados por el ingeniero francés André Coyne en 1929.

Muy efectivo gracias al desplome



Tomadas de Jimenez Salas, Geotecnia y Cimientos II.



Tomadas de Jimenez Salas, Geotecnia y Cimientos II.

El trasdós en desplome permite mejorar la estabilidad y ahorrar material, aunque puede ser más difícil de construir. En el límite, si el desplome llega a ser tal que coincide con el talud estable del terreno, el muro deja de ser de contención para pasar a ser de simple revestimiento. El ejemplo de la izquierda muestra los muros de la canalización del Río Manzanares realizada en 1958 (Fuentes López, L. (1958), R.O.P.)

TIPO DE TERRENO

VALIDO EN SUELOS Y ROCAS FRACTURADAS

TIPO DE REFUERZO

INEXTENSIBLES

ACERO (galvanizado)

- Pletinas
- Barras (redondos)
- Mallas y mallazos
- Cables
- Chapa ondulada y corrugada
- Hormigón

EXTENSIBLES

NATURALES Y SINTÉTICOS

- Geomallas
- Geotextiles
- Fibras
- Compuestos

- **TIERRA ARMADA**
- **SUELO REFORZADO**
- **CLAVETEADO (SOIL NAILING)**
- CAMINOS SIN PAVIMENTAR
- TERRAPLENES SOBRE ARCILLA BLANDA
- ENSANCHE DE TERRAPLENES

Patente de Henri Vidal, 1963

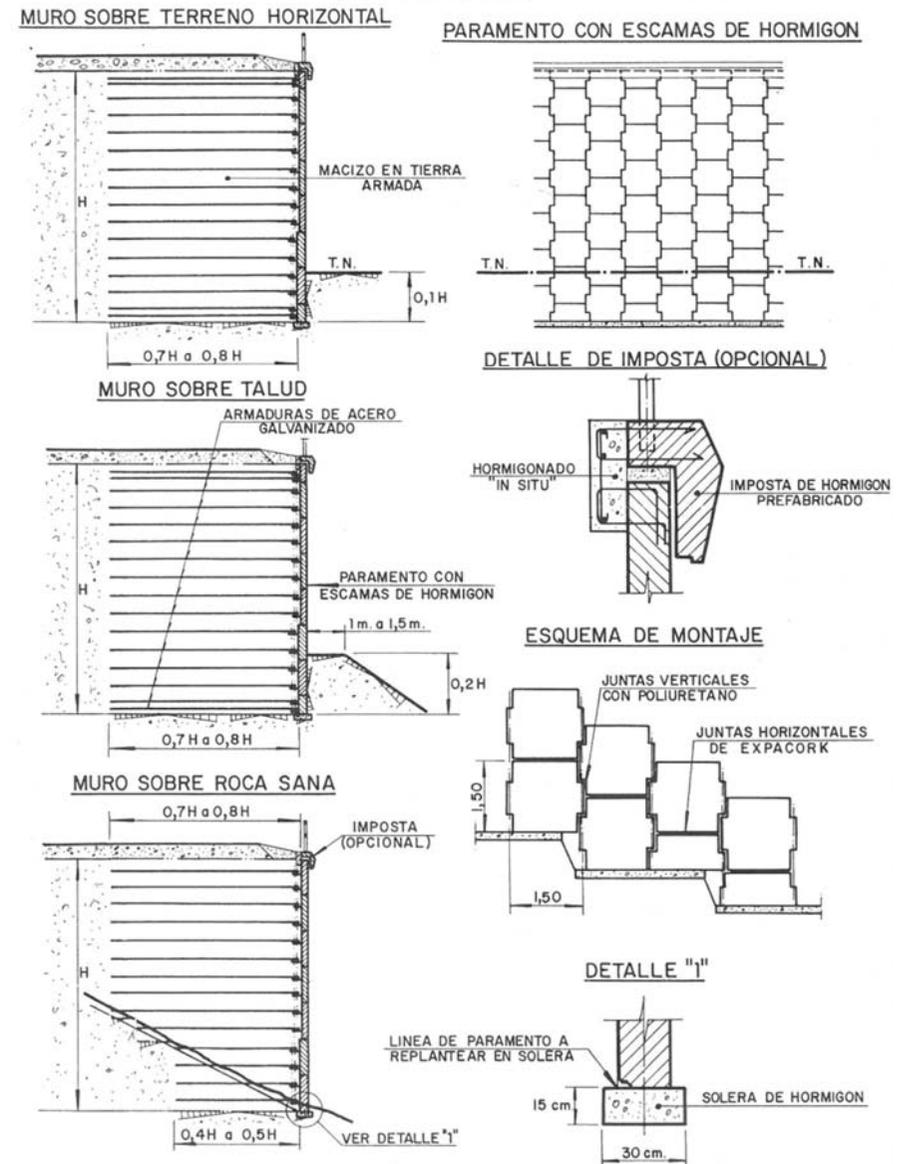
(las playas de Mallorca e Ibiza?)



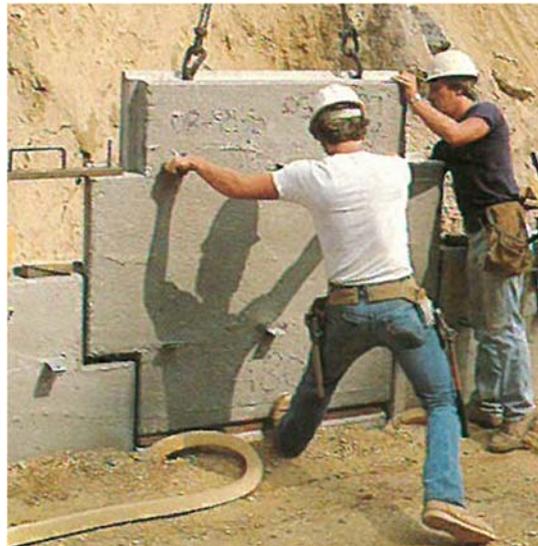
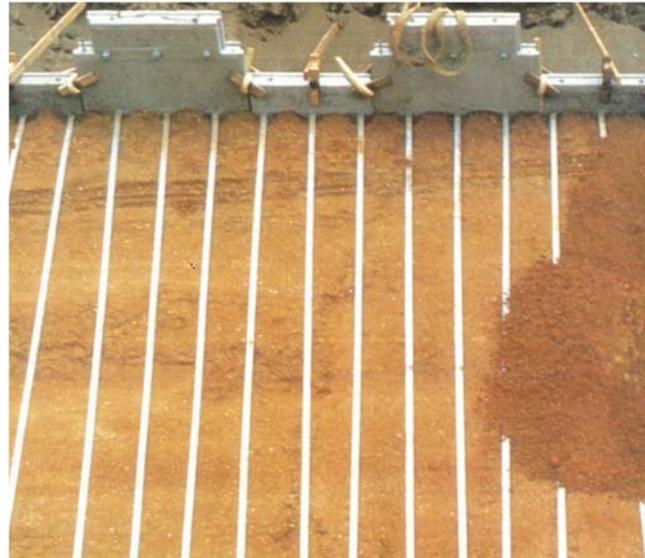
Sea Tac Airport. MSE Wall de 42 m de altura. Tomada de FHWA GEC 011 (2009)

El refuerzo a tracción consiste en flejes de acero galvanizado, nervados, de tan sólo 45 o 50 mm de ancho

MUROS TIPO

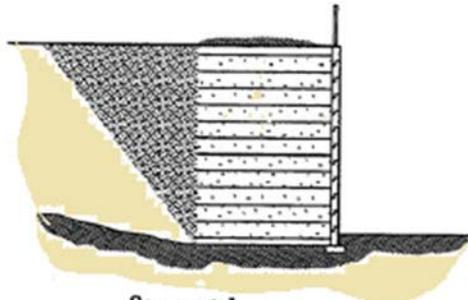


TIERRA ARMADA

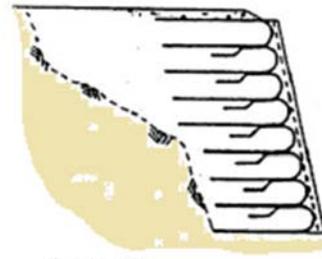


Tomado de catálogos de Tierra Armada

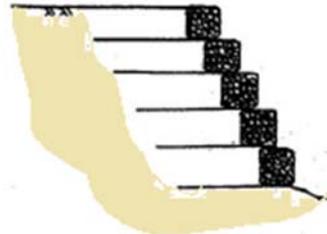
CONSTRUIDOS POR TONGADAS, DE ABAJO HACIA ARRIBA.



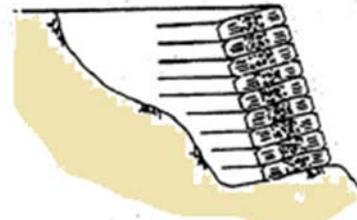
Segmental
Precast Concrete



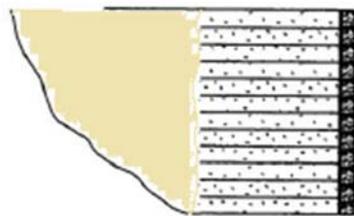
Geotextile
Wrapped-Facing
with Shotcrete Cover



Gabion-Facing



Tire-Facing Units



Modular Block Wall Units



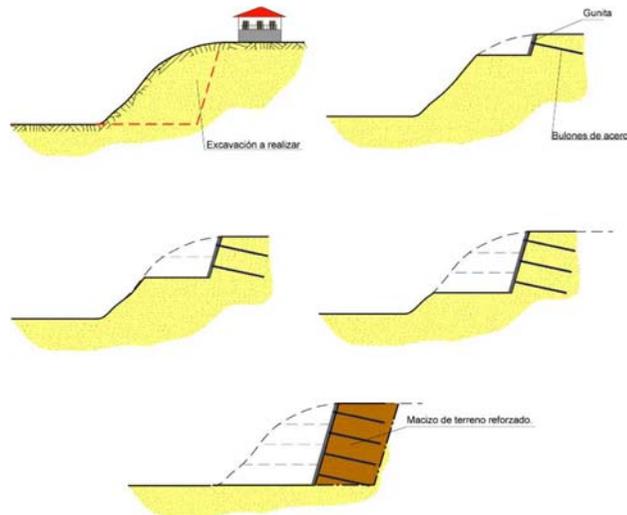
Full-Height Concrete Panel



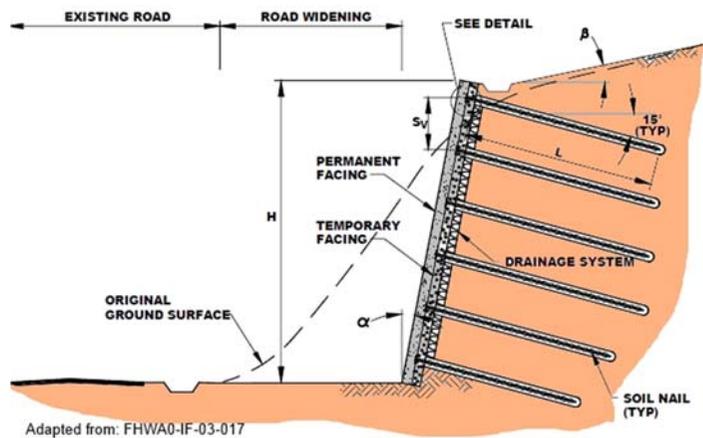
Tomada de Internet

Tomadas de FHWA GEC 011 (2009)

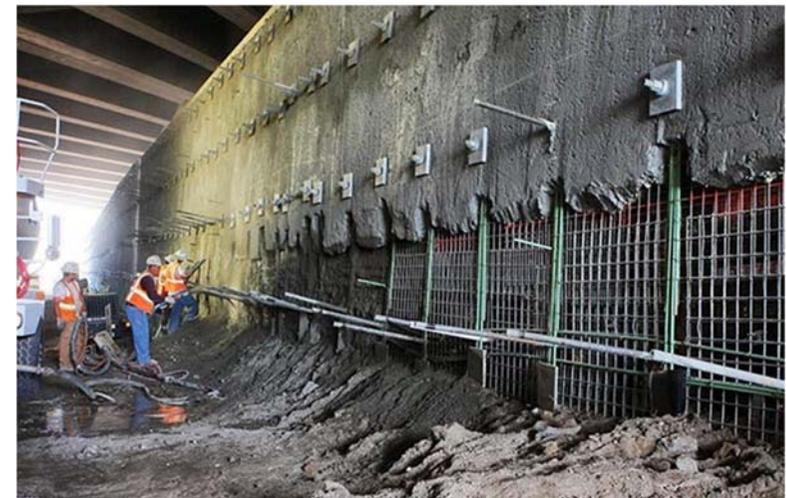
EXCAVADOS POR BANQUETAS, DE ARRIBA HACIA ABAJO (SOIL NAILING)



Internet. Página de Hayward Baker



Internet. Página de Deep Excavations



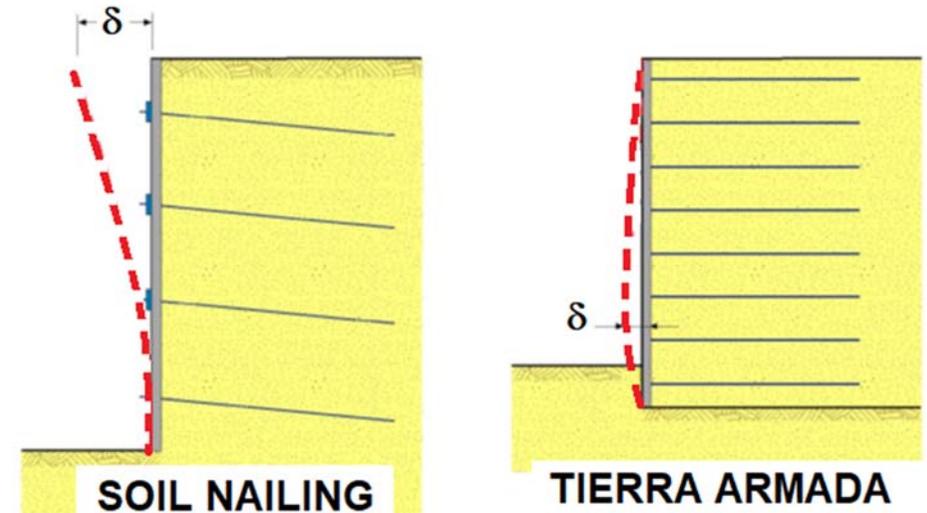
Internet. Página de Sinorok

CONCEPTOS BÁSICOS

Ya sea por la ejecución de nuevas tongadas (tierra armada) o por la excavación de una nueva bancada (suelo claveteado), la reducción de confinamiento lateral hace que el terreno tienda a desplazarse lateralmente (a relajarse).

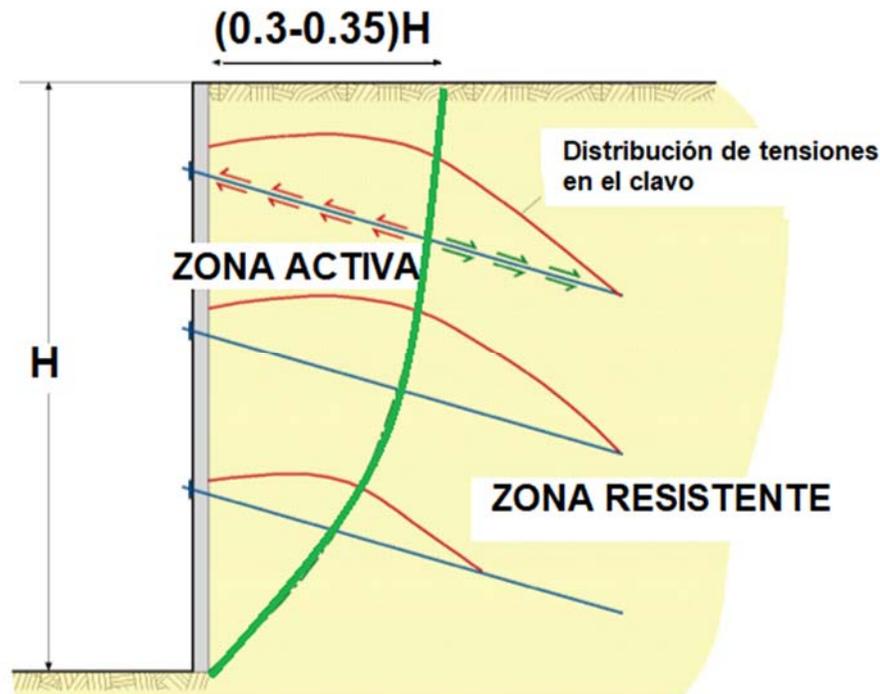
Los elementos de refuerzo introducidos en la masa de suelo suponen una restricción a ese movimiento. Las partículas de suelo tienden a “arrastrarlos” consigo, pero si están bien “anclados” hacia el interior de la masa de suelo, se “resisten” y entran en carga .

Dependiendo de la orientación de los refuerzos con respecto a las direcciones preferenciales de deformación del terreno, y de la propia rigidez de los mismos, dicha carga se traducirá en tracciones, momentos y esfuerzos cortantes.



EN PARTICULAR,

- Si los elementos de refuerzo se instalan de tal manera que las deformaciones de extensión (relajación) en el terreno induzcan en ellos deformaciones también de extensión, su efectividad resulta óptima



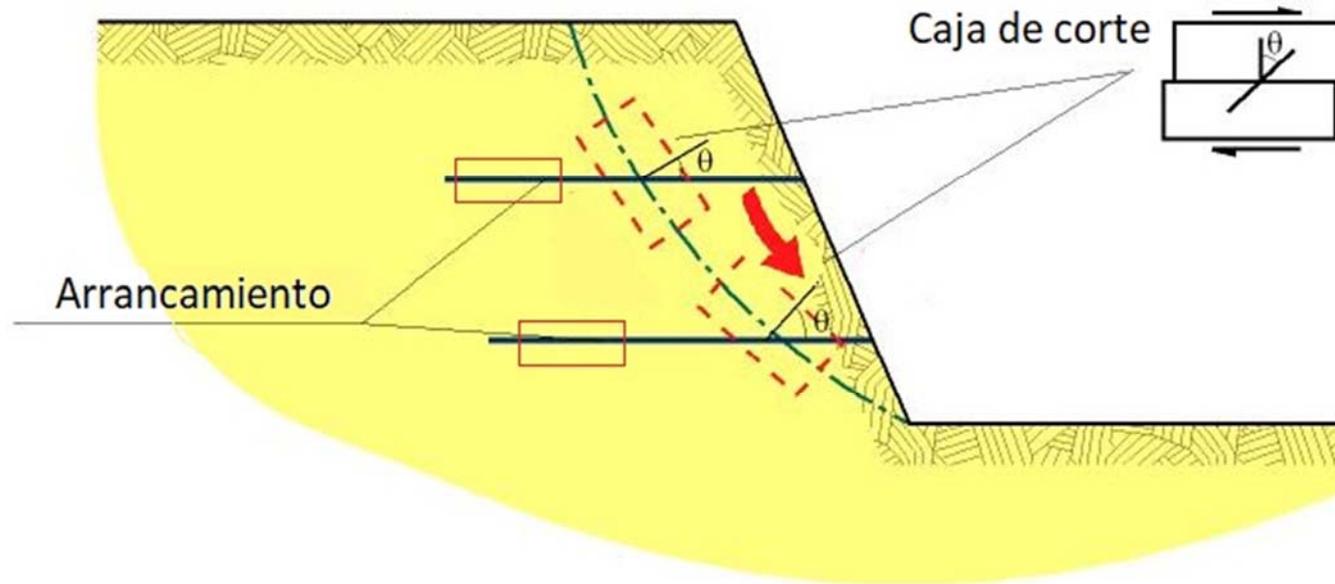
Distribución típica de tracciones en un clavo de refuerzo

- OBSERVACIONES BÁSICAS

- Las tracciones máximas se producen en el interior del macizo reforzado

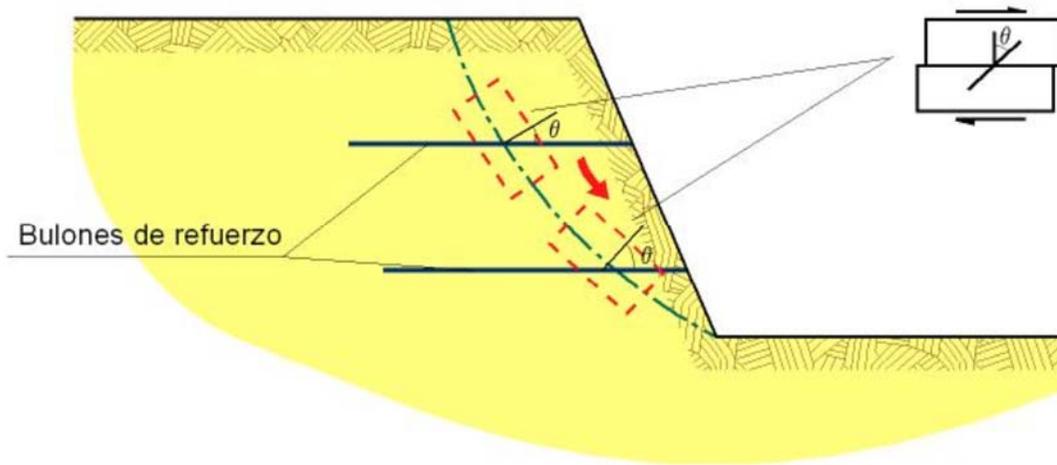
- La línea de tracciones máximas adopta una directriz que separa una zona “activa” (lado paramento) de otra “resistente” o “pasiva” (lado suelo)

- El suelo situado junto al paramento también ha de ser contenido. Por ello el refuerzo se conecta al paramento. Las tracciones en esta conexión resultan sustancialmente inferiores a las máximas

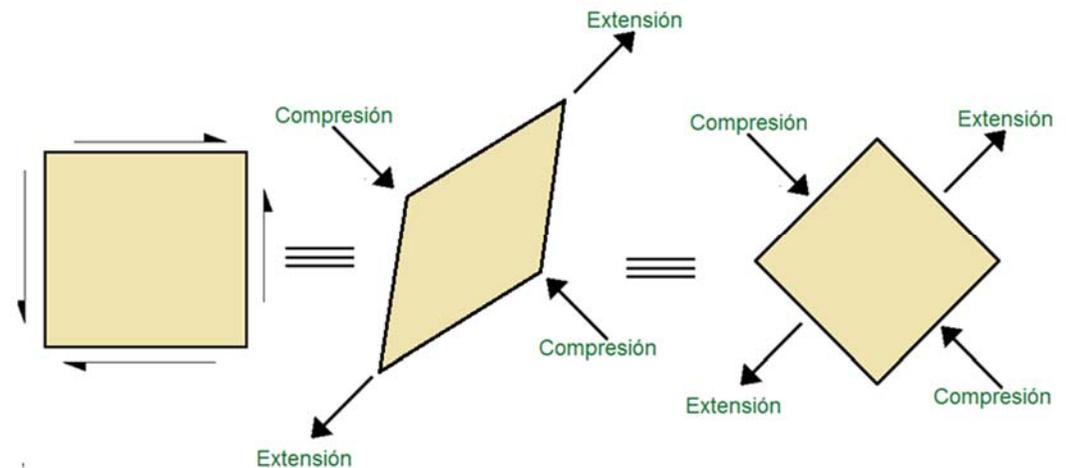
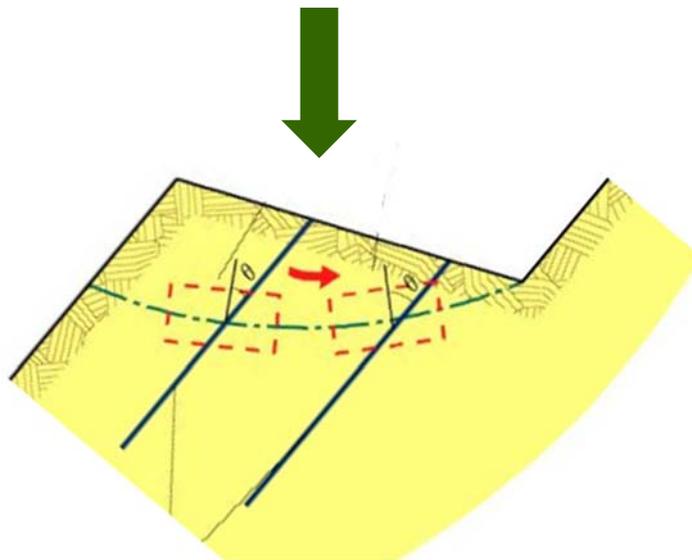


Los elementos de refuerzo intersectan superficies de deslizamiento potencial y entran en carga (analogía con caja de corte)

Los refuerzos se oponen al deslizamiento gracias a su longitud de anclaje en el terreno estable situado por detrás de la superficie de deslizamiento (arrancamiento)

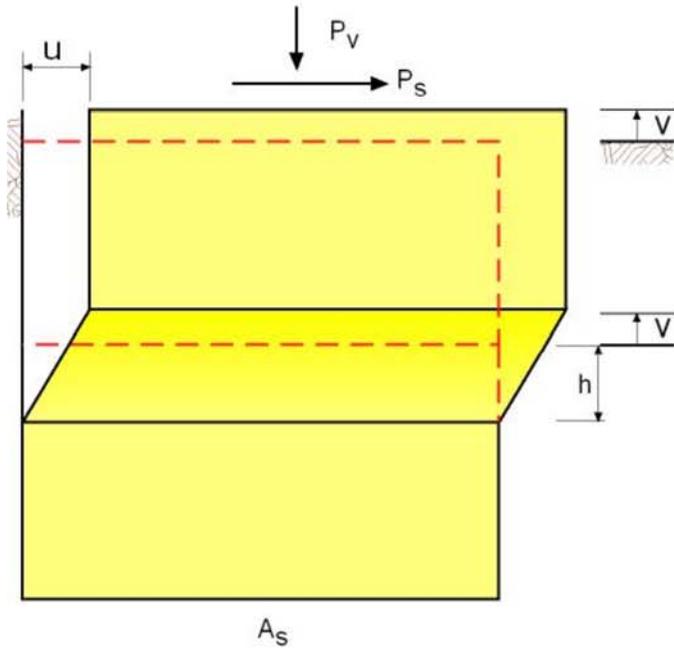


La analogía de la caja de corte



CONCLUSIÓN: Los elementos de refuerzo horizontales se ajustan bien a las direcciones de máxima extensión, luego se generan tracciones

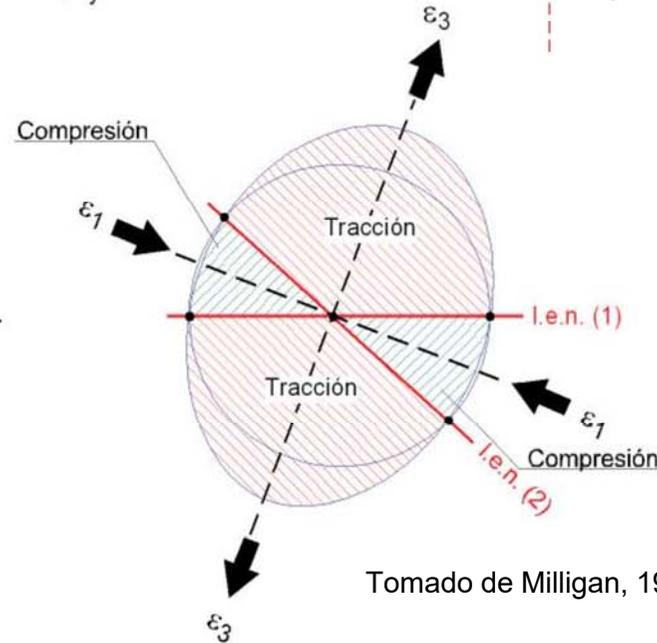
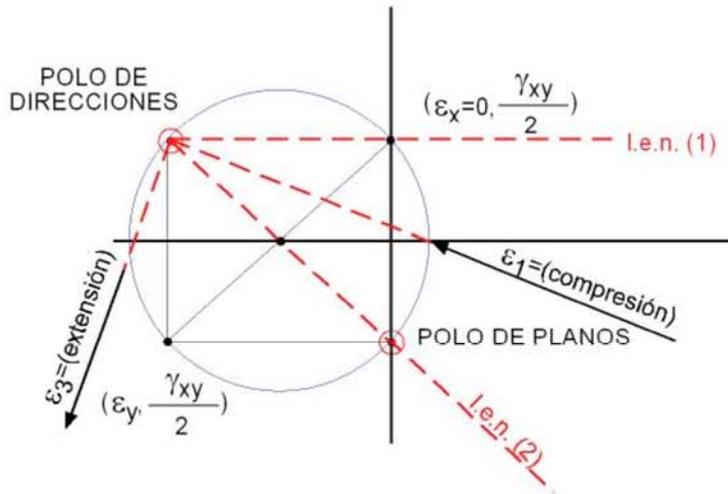
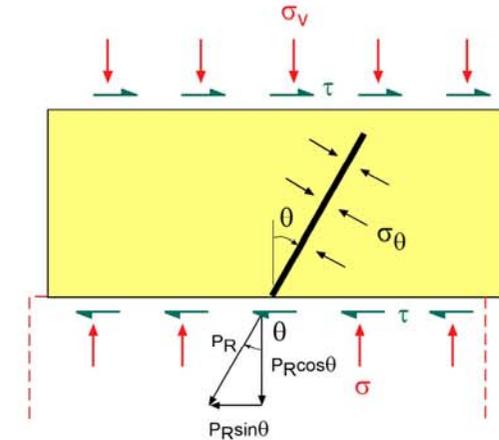
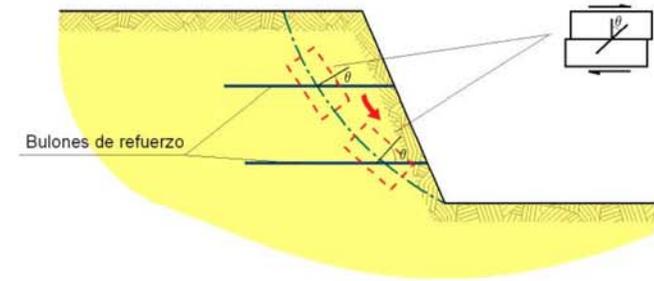
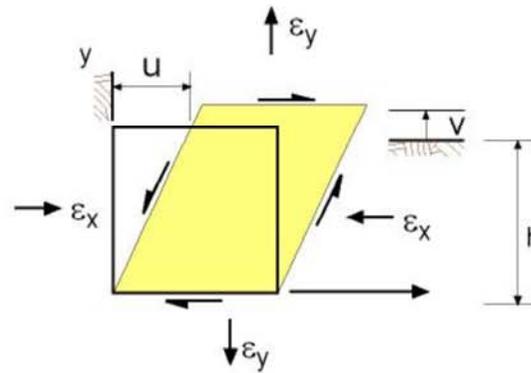
PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO



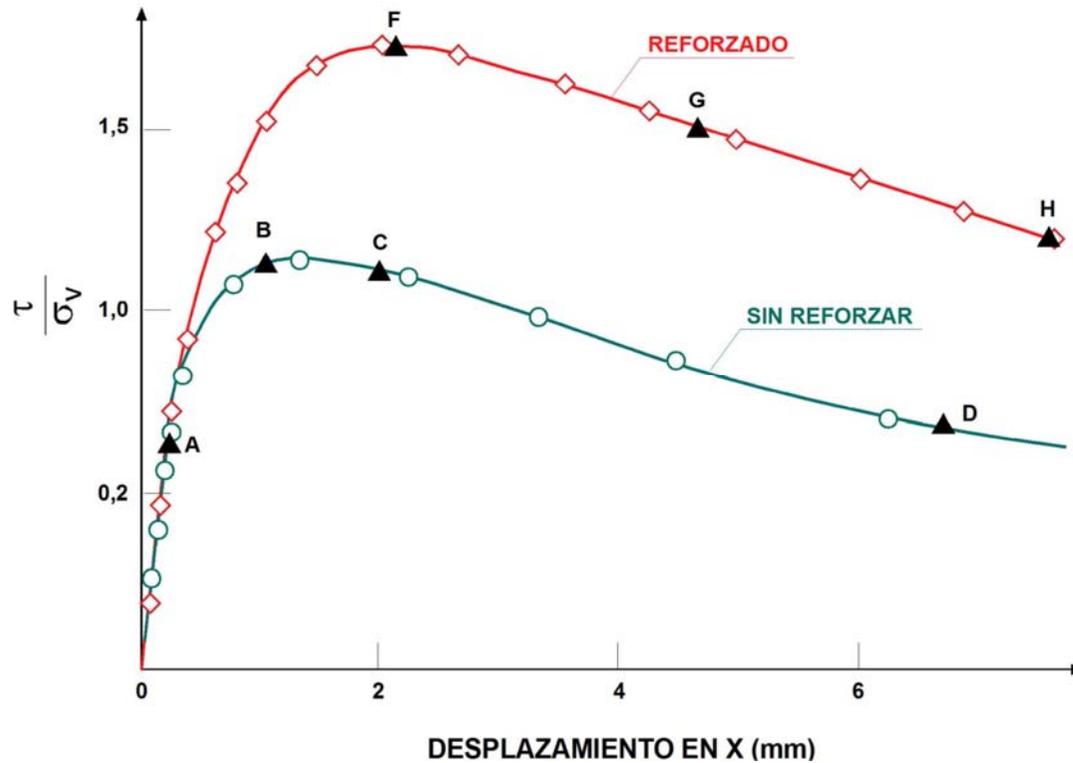
$$\sigma_v = \frac{P_v}{A_s} \quad \epsilon_x = 0$$

$$\tau_v = \frac{P_s}{A_s} \quad \epsilon_y = \frac{-v}{h}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{u}{h}$$

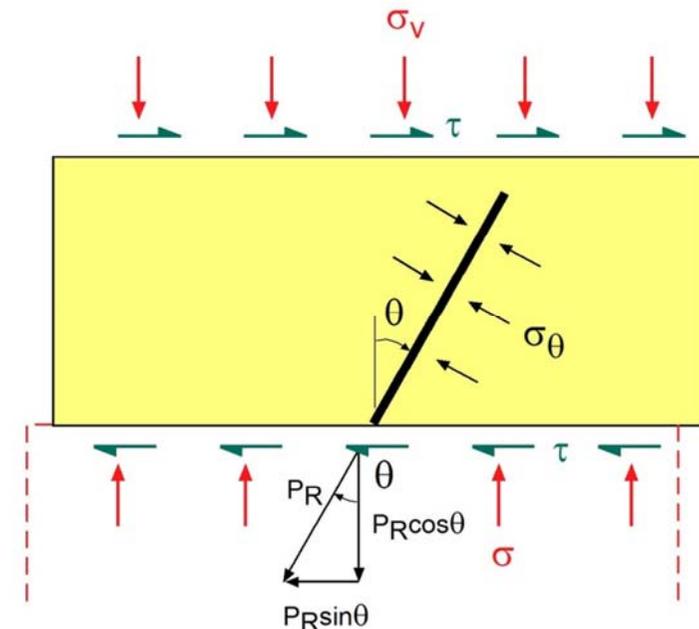


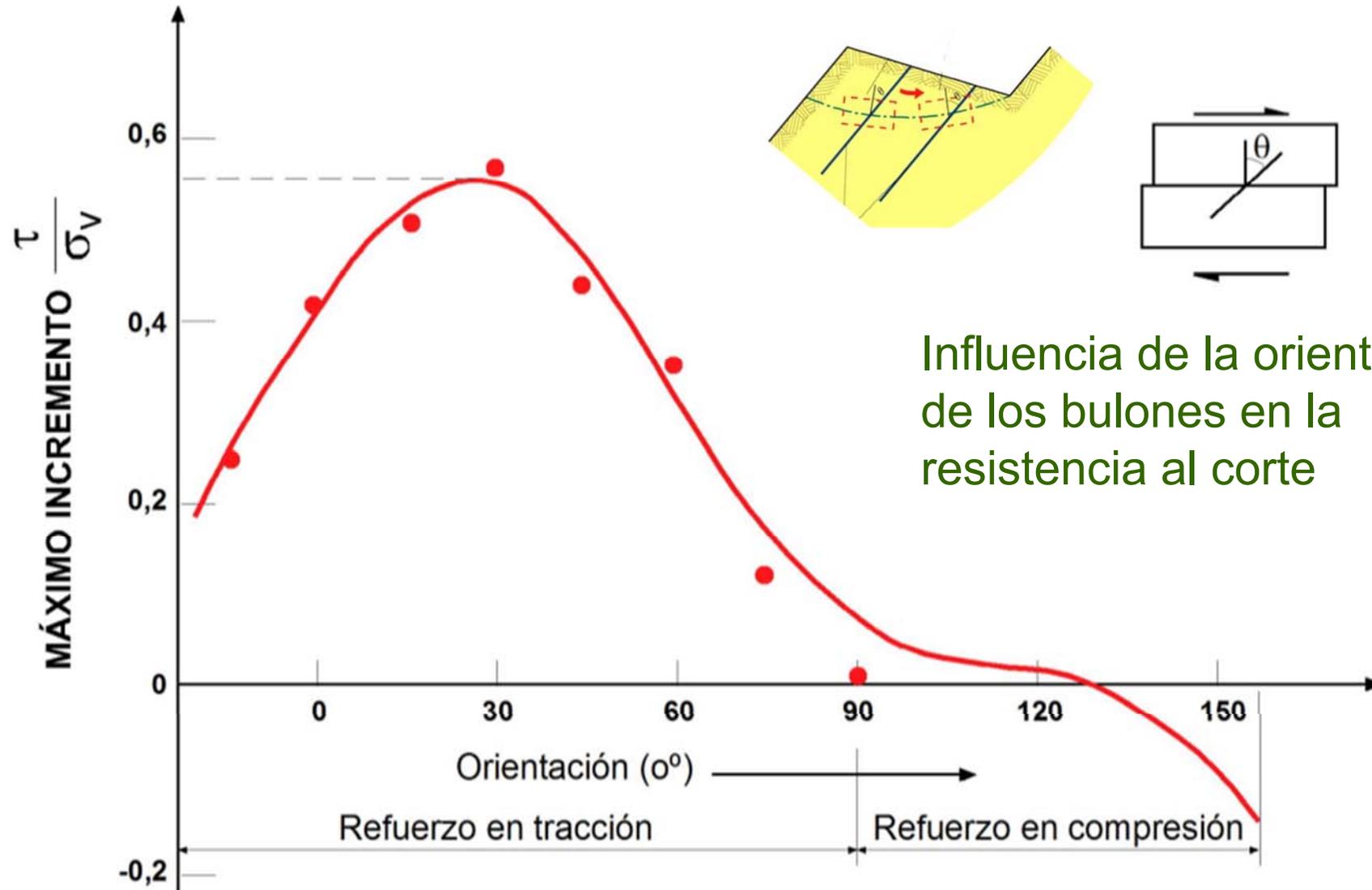
Tomado de Milligan, 1994



Incremento de resistencia al corte normalizada (τ/σ_v)
Ensayo con refuerzo inextensible

Efecto doble: Disminuye la tensión tangencial en el suelo y aumenta la tensión normal

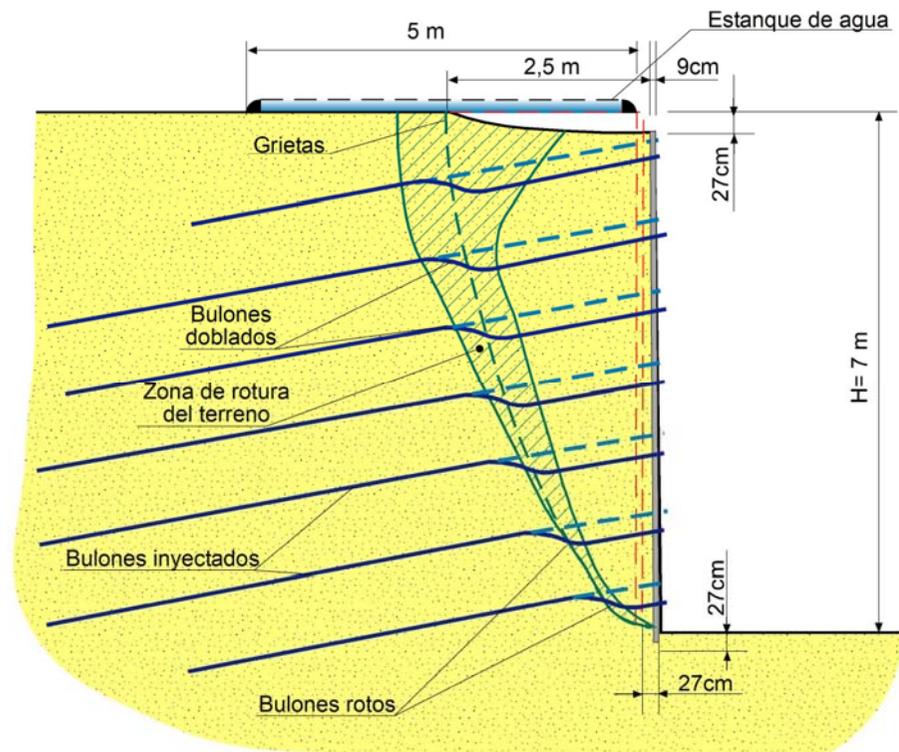




Tomado de Milligan, 1994

Contribución de los refuerzos a flexión y cortante

Depende obviamente de la rigidez del elemento de refuerzo. Las barras (redondos) de acero pueden contribuir de esta manera. Los flejes metálicos, geotextiles y geomallas claramente no. En todo caso se reorientan para seguir funcionando a tracción. Incluso con barras de acero (soil nailing), para movilizar la resistencia a flexión y cortante son necesarias deformaciones muy importantes



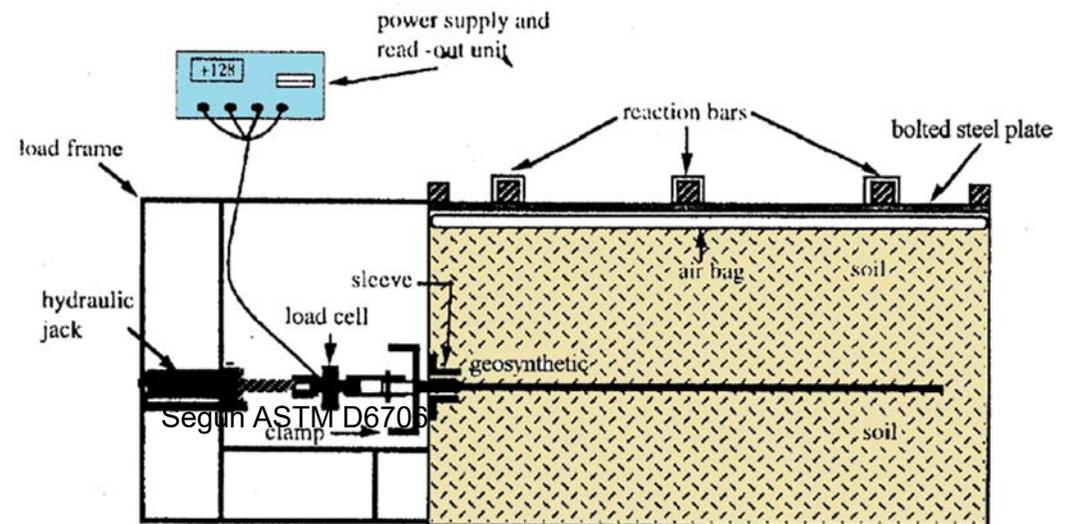
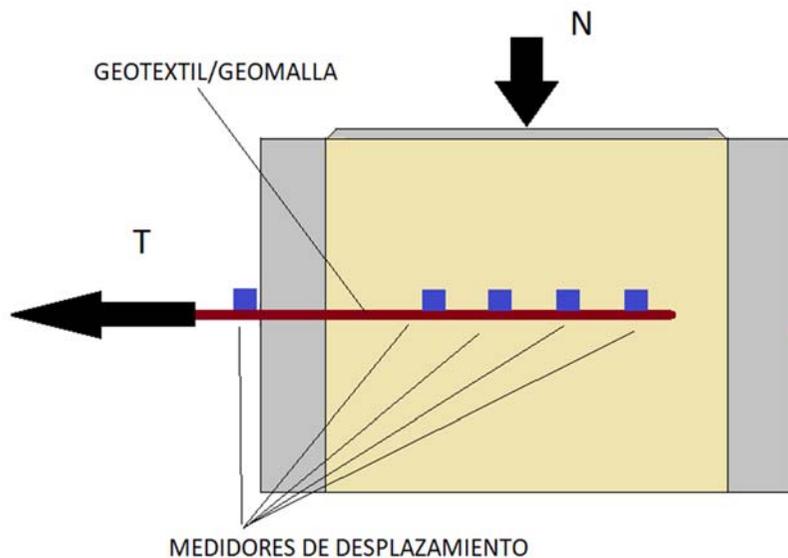
Tomada de RECOMMANDATIONS CLOUTERRE 1991

Los modelos de experimentación a escala real parecen sugerir que la resistencia a flexión de las inclusiones sólo se moviliza realmente en las proximidades de la rotura (deslizamiento)

CONCLUSIÓN: RESULTA RAZONABLE LLEVAR A CABO UN DISEÑO BASADO EXCLUSIVAMENTE EN EL FUNCIONAMIENTO A TRACCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE REFUERZO

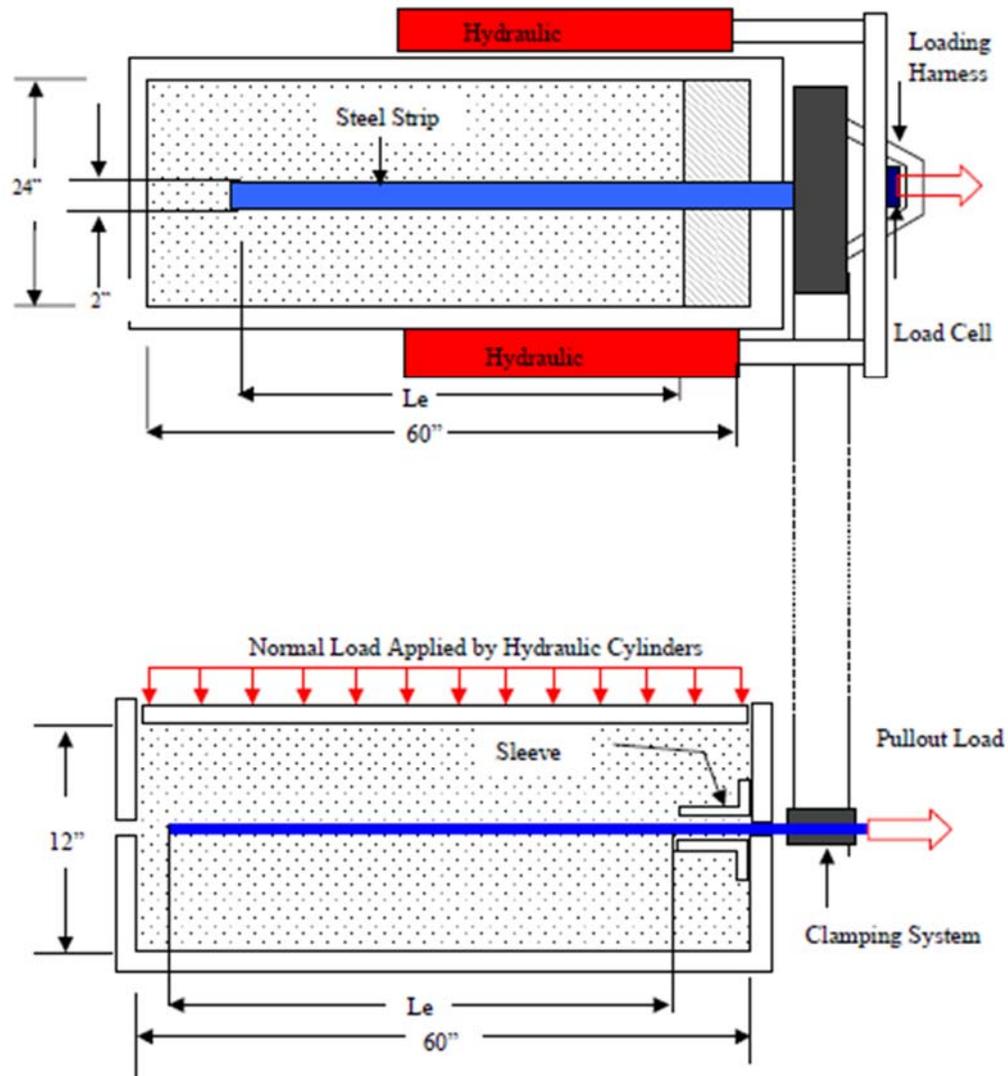
RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO.

Este mecanismo es común a todos los tipos de refuerzo a tracción. Para el caso de muros de suelo reforzado se puede medir en caja de arrancamiento (pullout box).. En taludes clavados habría que ejecutar pruebas in situ en bulones ya instalados (ver apuntes de anclajes y bulones).



RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO

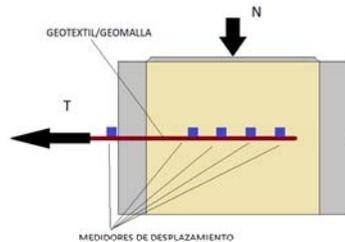
Ejemplo: Caso de flejes metálicos (tierra armada)



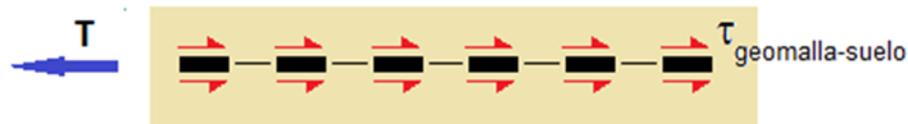
(NOTE: NOT TO SCALE)



Figure 3. Setup of RECO 2" wide galvanized steel strip pullout test within 570-1" crushed limestone.



Para una geomalla se dan dos componentes:



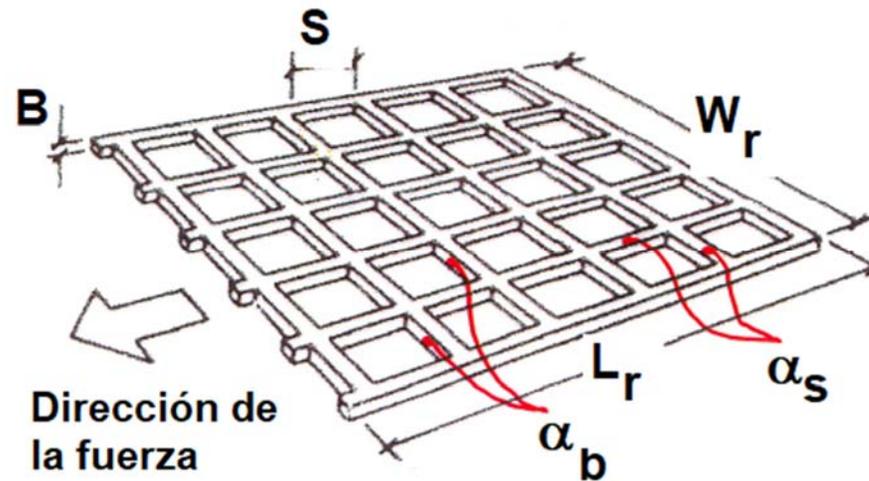
Tensión tangencial entre los nervios del refuerzo (longitudinal transversal) y el terreno



Tensión normal (capacidad de carga) de los cantos transversales de la geomalla

En este caso no hay tensión tangencial suelo-suelo dado que no hay movimiento relativo del terreno entre caras opuestas de la malla.



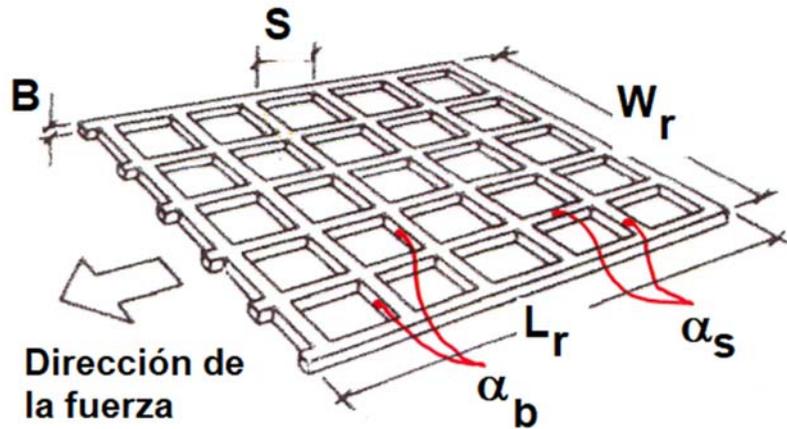


$$A_r = W_r \cdot L_r$$

α_s = parte proporcional de área horizontal de geomalla en contacto con el terreno en cada cara (fracción de área de geomalla "sólida" para rozamiento geomalla-terreno)

α_b = parte proporcional del área vertical de los "cantos" de geomalla en contacto con el terreno (fracción de área de "canto" de geomalla disponible para resistencia pasiva)

Tomado de Milligan, 1994



Componente de rozamiento

Componente res. pasiva

RESISTENCIA TOTAL:

$$P_r = 2 \cdot L_r \cdot W_r \cdot \sigma'_n \cdot f_b \cdot \tan \phi'$$

$f_b < 1$: Factor de arrancamiento

$$(P_r)_\tau = 2 \cdot \alpha_s \cdot L_r \cdot W_r \cdot \sigma'_n \cdot \tan \delta'$$

$$(P_r)_\sigma = \frac{L_r}{S} \cdot W_r \cdot B \cdot \alpha_b \cdot \sigma'_b$$

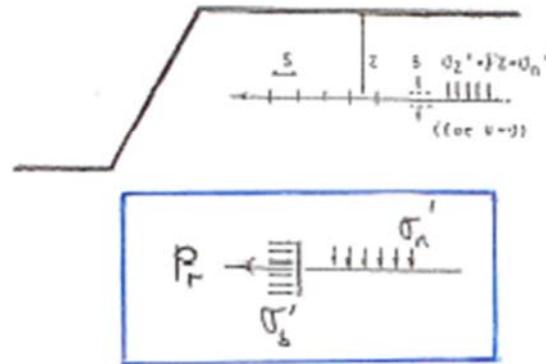
$$f_b = \alpha_s \cdot \left(\frac{\tan \delta'}{\tan \phi'} \right) + \left(\frac{\alpha_b \cdot B}{S} \right) \cdot \left(\frac{\sigma'_b}{\sigma'_n} \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot \tan \phi'}$$

En un geotextil: $\alpha_b=0$; $\alpha_s=0$



$$f_b = \frac{\tan \delta'}{\tan \phi'}$$

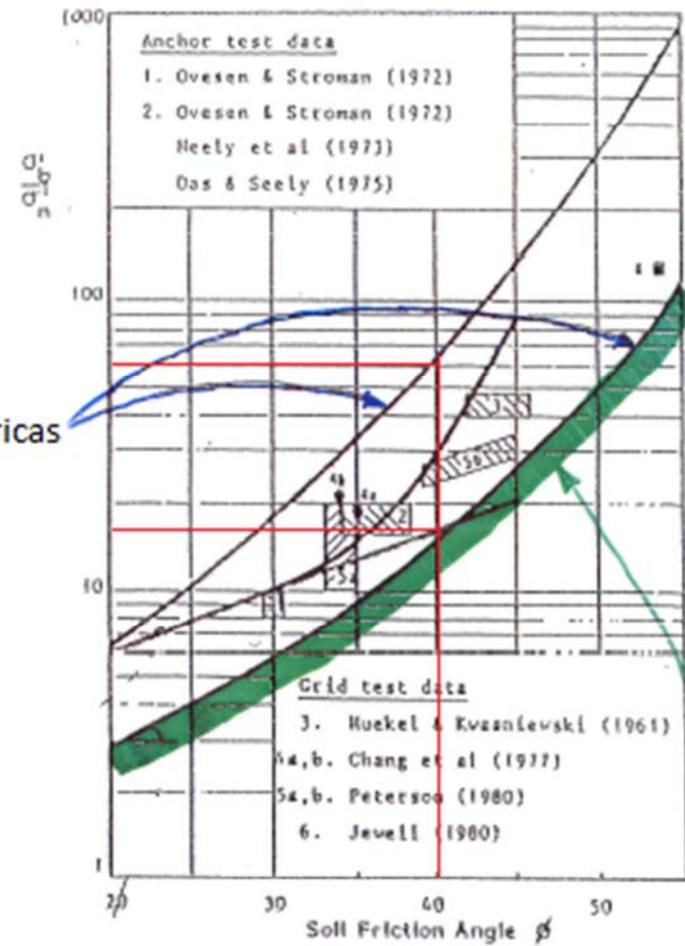
RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO



Expresiones teóricas

Para suelos de buena calidad ($\phi' = 40^\circ$):

$$\frac{\sigma'_b}{\sigma'_n} = 15 - 60$$



Buen límite inferior para cálculo

Tomado de Milligan, 1994

EFEECTO DE ESCALA:

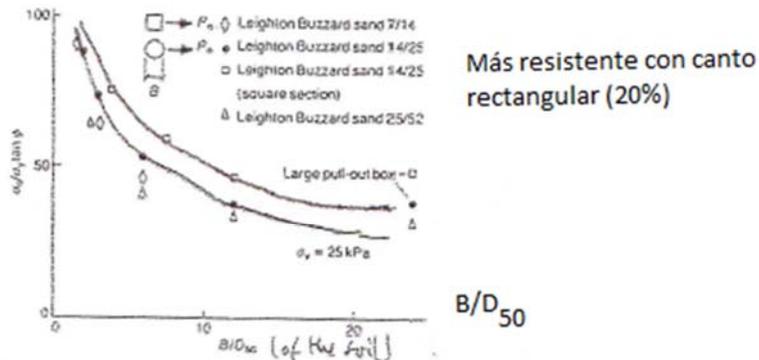


Fig. 17. Influence of member diameter to particle diameter ratio on bearing stress ratio

- Con geomallas, usualmente σ'_b es más importante que τ , aunque para movilizarse necesita más desplazamiento

- Con S muy pequeño (malla cerrada), el funcionamiento se asemeja al de una lámina continua rugosa

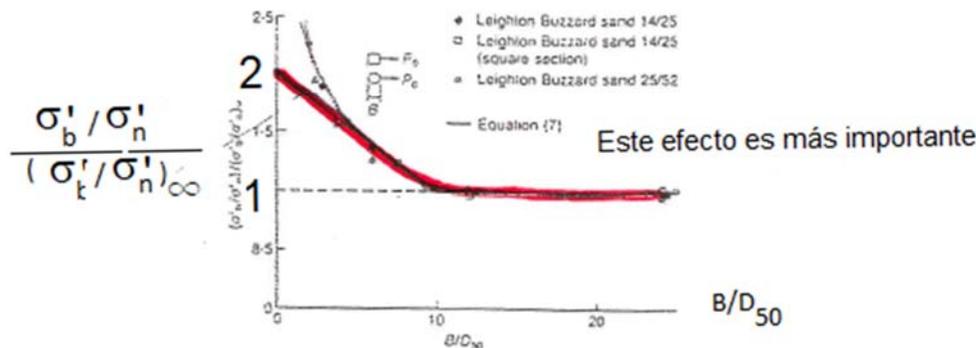
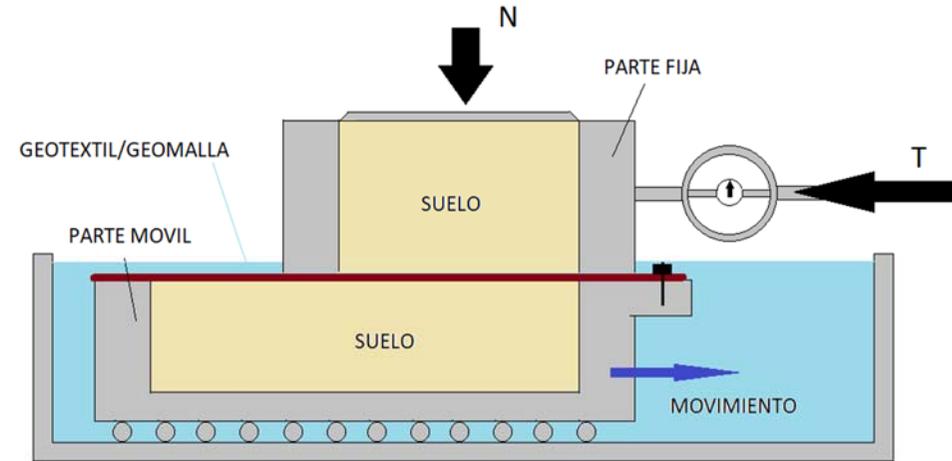
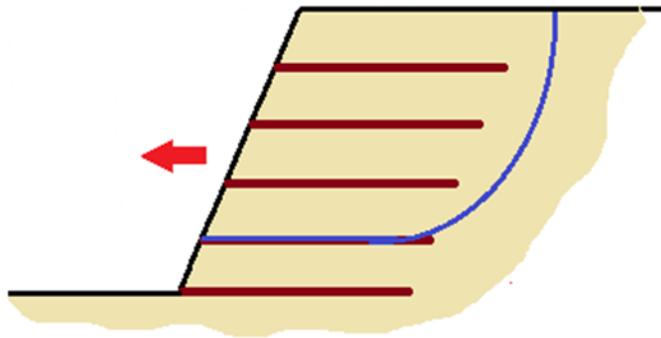


Fig. 3. Influence of particle size B/D_{50} on measured bearing stress, replotted from Fig. 17. Palmeirs & Milligan (1989)

Milligan (1994) sugiere:

- Usar el mínimo del gráfico general para determinar σ'_b
- Incrementar un 20 % si el canto es recto
- Si $B/D_{50} < 10$. aplicar el gráfico

La presencia de un “refuerzo superficial” (no lineal como una barra o pletina) puede condicionar la resistencia al deslizamiento en su plano. Se mide en una caja de corte modificada*

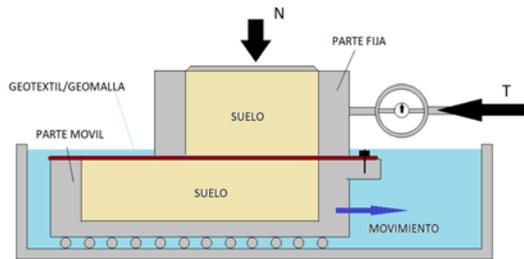


Con un geotextil (continuo), el contacto es suelo-geotextil. La resistencia resulta:

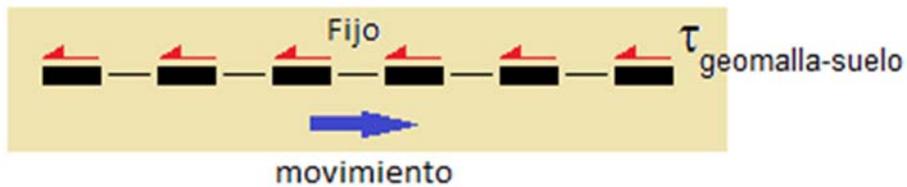
Granular

$$\tau = \sigma'_n \tan \rho \quad \rho' \leq \phi'$$

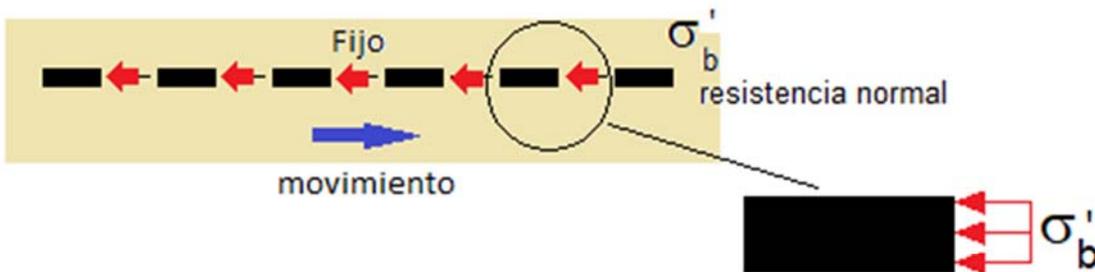
- La parte inferior de la caja suele tener mayor longitud para asegurar el mantenimiento del área de contacto geocompuesto-suelo
- La norma ASTM D5321 regula este ensayo en USA



Con geomalla o refuerzo no continuo, el movimiento relativo es soportado por:



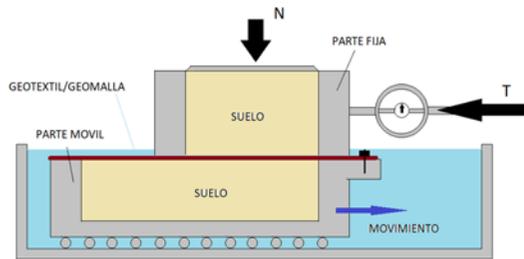
Tensión tangencial entre los nervios del refuerzo (longitudinal transversal) y el terreno



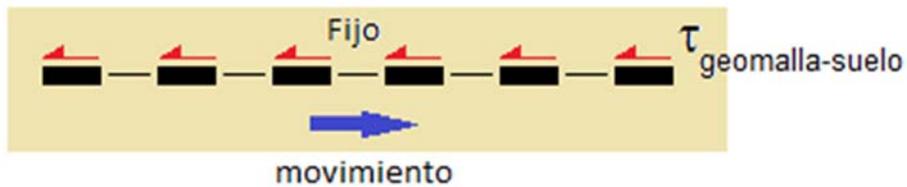
Tensión normal (capacidad de carga) de los cantos transversales de la geomalla



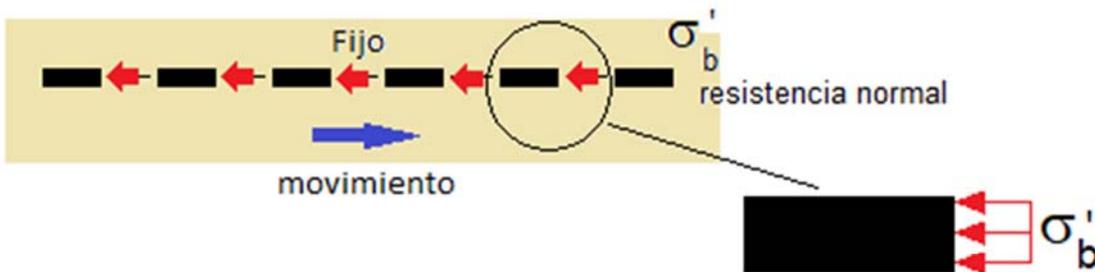
Tensión tangencial suelo - suelo



Con geomalla o refuerzo no continuo, el movimiento relativo es soportado por:



Tensión tangencial entre los nervios del refuerzo (longitudinal transversal) y el terreno



Tensión normal (capacidad de carga) de los cantos transversales de la geomalla



Tensión tangencial suelo - suelo

- “ADDITIF 2002 AUX RECOMMANDATIONS CLOUTERRE 1991”. Presses de L’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, 2002.
- AFNOR (2009): NF P 94-270. “Calcul géotechnique. Ouvrages de soutènement. Remblais Renforcés et massifs en sol cloué”
- BLONDEAU, F., CHRISTIANSEN, M., GUILLOUX, A. & SCHLOSSER, F. (1984): “TALREN, Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée”. Renforcement en place des sols et des roches. Paris, Presses de l’ENPC.
- BS 8081 (1989): “Ground Anchorages”. British Standard Code of practice
- BUSTAMANTE, M., “Un método para el cálculo de los anclajes y de los micropilotes inyectados”, Boletín de la SEMSC, nº 81-82, Madrid, 1986.
- BRITISH STANDARDS (2002): “prEN 14490 Execution of Special Geotechnical Works. Soil Nailing” (Borrador para comentarios).
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (MINISTERIO DE FOMENTO), 1998: “Manual para el Proyecto y Ejecución de Estructuras de suelo reforzado
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (MINISTERIO DE FOMENTO), 2001: “Guía para el diseño y la ejecución de anclajes al terreno en obras de carreteras”.
- FHWA (1998): “Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls”. U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA-SA-96-069R.
- FWHA (2015): “Soil Nail Walls. Reference Manual”. Publication No. FHWA-NHI-14-007. FHWA GEC 007

- FHWA (2009): “Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Slopes”. FHWA GEC 011
- HP 8-96 (1996): “Recomendaciones para el Proyecto, Construcción y Control de Anclajes al Terreno”. ATEP. ICET. CICC.
- JEWELL, R.A. (1980): “Some Effects of Reinforcement on the Mechanical Behaviour of Soils”. PhD Thesis. Cambridge
- JIMENEZ SALAS, J.A. (1980): Geotecnia y Cimientos III. Cap. 15. (Autor: Rodrigo Molina). Editorial Rueda. Madrid
- KERISEL, J. (1987): “Down to Earth. Foundations Past and Present: The Invisible Art of the Builder”. A.A. Balkema. Rotterdam. ISBN 90 6191 688 7
- MILLIGAN, G.W.E. (1994): “Mechanics of Reinforced Soil. Action and Interaction”. Course on Reinforced Soil: Mechanics and Design. Department for Continuing Education. University of Oxford.
- “RECOMMENDATIONS CLOUTERRE 1991”. Presses de L’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, 1991.
- SCHOLSSER, F. & DELAGE, P. (1987): “Reinforced Soil Retaining Structures and Polymeric Materials” . Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on the Application of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures, Kingston. Ontario. Canada. Kluwer Academic Publishers”
- UNTERREINER, P., BENHAMIDA, B. & SCHLOSSER, F. (1997): “Finite Element Modelling of the Construction of a Full-Scale Experimental Soil-Nailed Wall. French National Research Project CLOUTERRE”. Ground Improvement, 1, 1-8.