

EXPANSION DEL VADEMECUM

Augusto Espinosa Silva*

1. INTRODUCCION

Hace diez años, por esta misma época, se reunió el II ENCUENTRO, retomando con ello una iniciativa fructífera, que había sido en el pasado el escenario propicio para feroces enfrentamientos entre colegas que sostenían diferentes puntos de vista. Ahora esos choques entre tendencias son, por fortuna, parte de la historia. Han sido reemplazados por una lucha más vil originada en la ola globalizadora a la que se ha sometido el país; la recesión así desencadenada, una de las tantas **marchas de la estupidez** de que hablara la historiadora **Barbara Tuchman** [17], se ha traducido en globalizar los egresos, haciéndolos orgullosamente iguales a los de los países desarrollados, sin caer en la cuenta de que para que eso sea viable, hay que igualar también los ingresos. La lucha ahora, quien lo creyera, es por la supervivencia clara y neta, sin importar lo demás; si se violan los **principios** matemáticos, no se puede esperar nada en relación con los demás, que se convierten así en sombrío augurio de ominosos finales.

En artículo anterior, presentado al Segundo Encuentro [6] el autor tuvo la oportunidad de hablar sobre los progresos alcanzados en el diseño y la construcción de pilotes en el ámbito de la Sabana de Bogotá. En 1998 [7] se refirió a la conversión de la mecánica de suelos en GEO y a la invasión de nuevas técnicas y productos. En esta ocasión se hará referencia a algunas de las

* IC Universidad Nacional de Colombia
M. Sc. University of Illinois, USA
Socio Fundador AREAS LTDA

técnicas que han alcanzado su madurez en la última década, gracias a los desarrollos mecánicos o industriales que les sirven de soporte.

2. LA PRACTICA PRIMERO QUE LA CIENCIA

Hace treinta años **M.T. Davisson** [5] se refirió a **pilotes de alta capacidad**, definiéndolos como aquellos con cargas de trabajo superiores a 80 o 100 ton e inferiores a 2400 ton o 3600 ton, intentados entonces con destino a la industria petrolera en pleno desarrollo en el Golfo de México. Hoy los primeros son pan diario en el ejercicio de la geotecnia en Bogotá y se han construido para la Cámara de Comercio, pilotes preexcavados de 600 ton y hasta 800 ton de capacidad individual a 58 m de profundidad con motivo del nuevo Edificio Sede para la institución.

Los últimos 20 o 30 años han sido testigos de un desarrollo inusitado de nuevas técnicas y de una verdadera revolución industrial de productos fabricados con destino al ejercicio de la geotecnia.

Si Einsten fue primero que la bomba atómica o Edison primero que el disco, no puede decirse lo mismo en este caso. La **tierra armada** ideada por **Henri Vidal** en 1966→1969 [18] fue concebida por este arquitecto francés sin que existiera soporte técnico o científico, el cual solo se desarrollaría después cuando la realidad obligó a buscarle las causas y fundamentos. Algo parecido ocurrió con los geotextiles y con tantas otras así llamadas **modificaciones** de los suelos, que se describen en el presente trabajo. No se trata de inventos susceptibles de patentar, pero la técnica específica para llevar a cabo las obras sí está amparada por patentes en Japón, Suecia, Francia y otros países.

Pero lo que interesa a esta presentación es que, una vez aparecido el producto -y es el caso de los geotextiles- éste es adoptado de forma inmediata

por los ingenieros de la práctica como si lo estuvieran esperando desde siempre y no necesitaran de explicación o de educación adicional para darle aplicación correcta.

Es una realidad que excavaciones de cinco niveles en suelos como los de Bogotá, o taludes de 25 m de altura a 70° con la horizontal como en Cali, o carreteras en los pantanos del Chocó, o controles contra la erosión marina como en Santa Marta y Cartagena, o barreras contra la contaminación de recursos hidráulicos como los que se construyen en la mina de El Cerrejón no hubieran sido posibles antes de la aparición de estas técnicas.

De consiguiente, merecen estudio y divulgación.

CUADRO No. 1-FECHA DE INTRODUCCIÓN Y REFERENCIA			
		AÑO	AUTOR
1	Compactación Profunda Deep Compaction	1977 1981	HAUSMANN, M. 1990
2	Columnas de Piedra y Gravas Stone Columns	1974 1981	BROMS, B. 1991
3	Drenes Verticales – Wick Drains		KOERNER et.al. 1986
4	Jet Grouting	1970	WINTERKORN, H.F. 1991
5	Deep Mixing	1954 1967	BRUCE, D.A. & BRUCE, M.E. 1999
6	Tierra Armada Terre Armée	1966 1969	SCHLOSSER F BASTICK, M.
7	Soil Nailing	1981	JURAN, I. ELIAS, V, 1991
8	Geotubos	1967 1982	HAUSMANN, M. 1990
9	Pantallas Plásticas Slurry Trench cut-off walls	1979	EVANS, J. 1991

3. LAS MODIFICACIONES, TRANSFORMACION CREADORA

3.1 Antecedentes

Las modificaciones de los suelos son tan antiguas como la humanidad. Los babilonios, hace más de 3000 años, construyeron sus **zigurats** haciendo uso de suelos reforzados. La Biblia, en el Exodo trata de adobes reforzados con paja y fibras; los incas son famosos por haber construido fantásticos muros de adobes, por ejemplo en San Pedro del Raschi, con base en refuerzo de fibras vegetales y animales, que aún se mantienen en pie pese al paso del tiempo y del azote de los terremotos.

Los pájaros y los castores se citan dentro de los maestros de los constructores primitivos, que por lo mismo debieron tener tan desarrollado ingenio como los artistas que pintaron en **Altamira** hace 17.000 años, o **Lascaux** hace 20.000 años, o en la recientemente descubierta cueva de **Chauvet** en el **Ardèche** Francés, hace tanto como 35.000 años.

A continuación se citan algunas de las modificaciones ideadas para mejorar los materiales geotécnicos naturales. Los principales son: modificaciones por medios mecánicos, modificaciones hidráulicas, físico-químicas, por inclusiones y por confinamiento. (**Hausmann** [10]).

3.2 La Modificación Mecánica

La modificación mecánica empieza por la compactación pura y simple, con rodillos cilindros, cilindros pata de cabra y termina con la adición de sistemas de vibración a estos mismos equipos. Es la compactación superficial.

Aquí quiere hacerse énfasis en la compactación profunda, dentro de la cual las siguientes técnicas están disponibles:

- Explosiones controladas.
- Apisonamiento fuerte y consolidación dinámica.
- Vibro-compactación y Vibro-reemplazo.
- Columnas de grava y piedra.

3.3 La Modificación Hidráulica

La estabilidad, ya se ha dicho, se logra con drenaje, drenaje y más drenaje. Al bajar la presión de poros, sube como es de esperarse el esfuerzo geostático efectivo de los suelos que controla, en últimas, su comportamiento.

En este caso definitivamente se tiene la teoría y han hecho falta los instrumentos para producir el drenaje fácil y económico de grandes masas del suelo.

Algunas de las técnicas planteadas con el correr del tiempo han sido:

- Consolidación Radial
- Drenes Verticales
- Drenes Transversales
- Electro-Osmosis

3.4 La Modificación Físico-Química

Este tipo de modificaciones existen desde que a alguien se le ocurrió mezclarle suelo seco a uno muy húmedo o saturado, y comprobó cómo mejoraba su manejabilidad y estabilidad. En el curso de la historia las mezclas se han hecho con suelo granular o arcilla -según la necesidad- cal, cemento, cloruro de

calcio, cenizas, escoria, bitumen y alquitrán, sin contar productos sintéticos con supuestas propiedades mágicas.

Además de las tradicionales, dos técnicas, desarrolladas recientemente, llaman particularmente la atención, aunque su fundamento es básicamente el mismo, que es agregar cemento y cal. La diferencia ocurre en cuanto a la metodología de agregación y mezcla.

En este caso, se tienen:

- Acción térmica (Por congelación o cocción)
- Agregados químicos
- Inyección a presión (**Jet grouting**)
- Mezcla profunda (**Deep Mixing**)

3.5 La Modificación por Inclusiones

3.5.1 Geosintéticos y Afines

La fecha de largada de la carrera de los **geosintéticos** puede fijarse en 1970 (**Koerner & Welsh [12]**). A partir de este momento empieza a aparecer un número creciente de publicaciones técnicas relacionadas y desde luego se inicia la fabricación de fibras y telas poliméricas con aplicación precisa. Aquí es particularmente cierto el hecho de que fue primero la función que el producto, y todos los geotecnistas y los ingenieros estructurales empezaron a pensar en sus términos; el vademécum de la ingeniería y la construcción se acababa de ampliar para satisfacer una necesidad sentida pero que nadie podía definir de antemano.

Hoy día, los geosintéticos de todos los tipos imaginables han sido utilizados con éxito en las siguientes funciones:

- Separación
- Refuerzo
- Drenaje
- Control de erosión
- Impermeabilización
- Confinamiento
- Formaletería

Como la variedad es grande y las funciones en ocasiones muy precisas, se hace necesario dar algunas definiciones que aclaran el panorama aparentemente confuso. Estas son:

- i. **Geotextiles.** Son productos poliméricos, porosos y flexibles, fabricados para cumplir algunas funciones dadas en la lista anterior, como separación, refuerzo, filtración y drenaje. No sirven como barreras de humedad. Se fabrican en dos variedades: **tejidos** y **no-tejidos**.
- ii. **Geomallas (*Geogrids*).** Son materiales poliméricos, deformados o no deformados, en forma de malla o reja, utilizados en la ingeniería geotécnica y la construcción específicamente como refuerzo.
- iii. **Geored (*Geonet*).** Son materiales poliméricos, deformados o no deformados, en forma de red, utilizados en la ingeniería geotécnica y en la construcción como drenaje planar.
- iv. **Geomembrana (*Geomembrane*).** Son hojas impermeables, hechas de materiales poliméricos, que se utilizan en la ingeniería geotécnica y ambiental como barreras para líquidos, en aplicaciones como forro para rellenos sanitarios. En este último caso, debe considerarse que se fabrican con una o las dos caras

corrugadas de manera que el ángulo de fricción con el material que contiene sea superior al ángulo natural de la superficie lisa, que es apenas de 8° (**Augello** et al [1]).

3.5.2 Pernos y Tendones

La primera aplicación conocida de refuerzo de taludes mediante pernos en roca, fué diseñada y patentada por el ingeniero francés **André Coyne** en 1929.

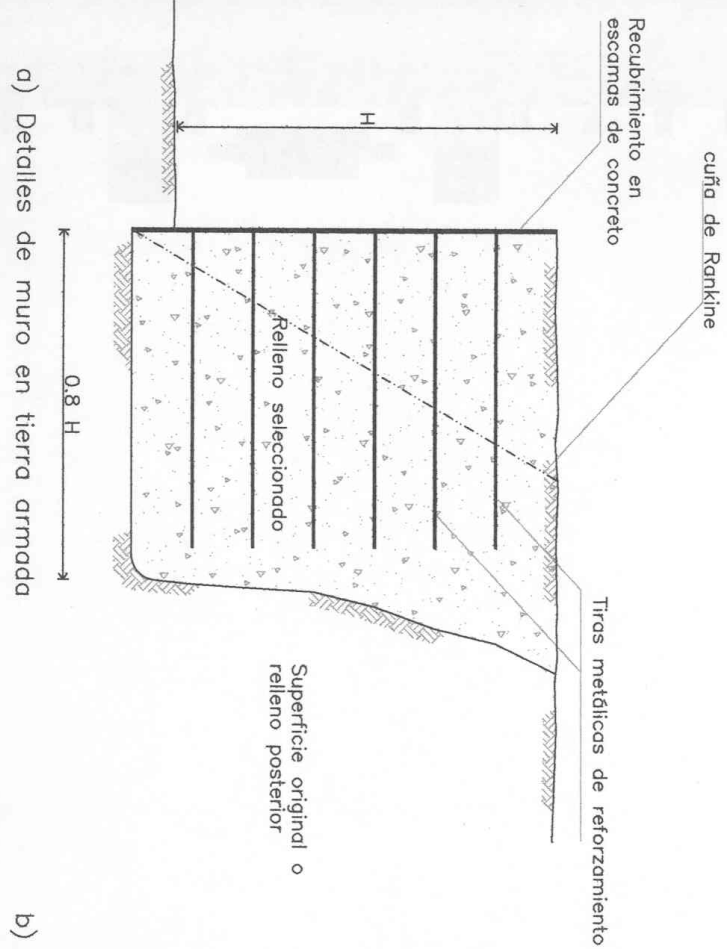
Hoy día se diseñan y se construyen este tipo de sistemas, con y sin patente, para sostener taludes en roca y en suelos. La técnica está más o menos dominada, lo cual no obsta para que ocurran accidentes graves de ocurrencia ocasional.

Pernos de roca y tendones de cable se utilizan tanto en la geotecnia urbana como en los grandes proyectos civiles, con carácter generalmente preventivo, lo que habla bien del desarrollo de la disciplina.

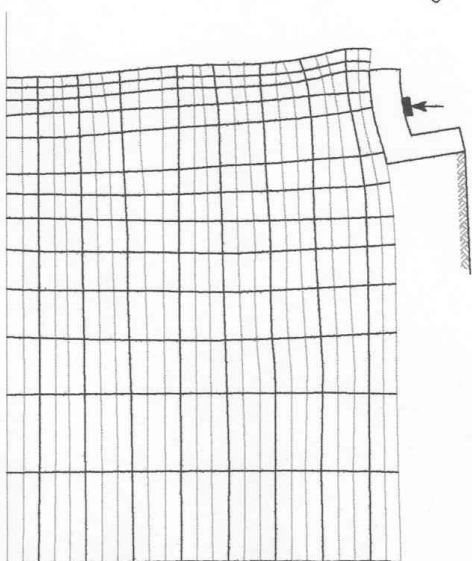
3.5.3 Tierra Armada

La primera patente francesa de propiedad de Henri Vidal data de comienzos de 1963. Habrían de pasar casi 10 años para que los fundamentos técnicos de la **Tierra Armada** fueran cabalmente explicados (**Schlosser y Long**, 1972 [15]).

Fue una idea genial de reforzar con inclusiones metálicas un terraplén, en la medida en que se iba construyendo, de manera tal que las tiras metálicas que reforzaban el suelo del relleno, a su vez sostuvieran la cara prefabricada en escamas metálicas o de concreto.



a) Detalles de muro en tierra armada



b) Deformación de la estructura bajo carga

Figura 1 — ESQUEMA DEL DISEÑO Y EL COMPORTAMIENTO DE LA TIERRA ARMADA

La clave de la explicación consistió en entender que el refuerzo creaba en el suelo compactado una cohesión virtual como se explica en la **Fig. 1**.

3.5.4 Suelo Empernado (*Soil Nailing*)

Este método de reforzar taludes, con carácter transitorio en la mayoría de los casos, lleva unos 25 años de aplicación.

Consiste en instalar en el corte una serie de pernos o **uñas** con muy bajo espaciamiento, recubiertas por una delgada capa de concreto lanzado (*Shotcrete*) sobre una malla de refuerzo.

El método consiste en una extensión del Nuevo Método Austriaco de hacer Túneles (NATM) y se basa en sus mismos principios.

3.6 La Modificación por Confinamiento

Consiste en prestarle a una masa de suelo inestable, un confinamiento permanente que permite su desempeño satisfactorio bajo carga.

La técnica ha probado ser muy efectiva en control de taludes de altura reducida y en hidráulica de ríos y de costas.

Las tecnologías más utilizadas en esta modificación son:

- Gaviones
- Bolsacretos
- Geotubos

4. DESCRIPCION DE ALGUNAS INNOVACIONES

4.1 Propósito

De las técnicas y artificios que aquí se han mencionado, se tratan a continuación sólo aquellos que no han pasado a ser del dominio público y que rara vez se aplican, con el fin de divulgar su existencia y explicar sus fundamentos, sin esperar que con ésto se agote el tema, sino más bien que se siembre la inquietud.

4.2 Compactación Profunda o Consolidación Dinámica

Método para compactar suelos granulares hasta 30 m de profundidad. Consiste en dejar caer repetidamente un peso de magnitud considerable desde cierta altura de manera que la energía del impacto sea invertida en densificar los suelos. En general los valores usuales de la aplicación de la técnica, son:

- Peso de Impacto $W = 6 \rightarrow 170 \text{ ton}$
- Altura de Caída Libre $H = 10 \rightarrow 40 \text{ m}$
- Espaciamiento $S = 3 \rightarrow 10 \text{ m}$

La profundidad a la que es efectiva la compactación puede calcularse así:

$$D = 0.5\sqrt{WH}$$

donde W, H y D están en metros. En general, el valor de la profundidad varía entre

$$D = 0.3\sqrt{WH} \quad y \quad 0.8\sqrt{WH}$$

El impacto en cada sitio debe repetirse hasta 5 veces: a partir de este punto la efectividad del método decrece.

La profundidad de los cráteres obtenidos al compactar puede llegar a 1 m o 2 m; estos cráteres son rellenados en material granular del sitio, y la superficie final debe recompactarse. El patrón de compactación es rectangular o triangular, según la forma predominante del área por compactar. Esta técnica también ha sido denominada compactación dinámica. Equivocadamente se le designa a veces como consolidación dinámica. El contenido de arcilla no debe ser mayor que 10% para no inhibir la capacidad de compactación. El sistema descrito fue utilizado con éxito en la recompactación de las aproximaciones al puente sobre el río Guatiquía en Villavicencio, construidas en material granular grueso.

4.3 Columnas de Piedra y Grava

Método para compactar suelos granulares sueltos hasta 20 m o 25 m de profundidad. En general, se tienen tres variantes para su aplicación, y son: i. Columnas de grava tipo franki; ii. Columnas por vibro-flotación y iii. Pilotes de compactación de arena. Los valores usuales de aplicación, son:

- diámetro $d = 0.5 \text{ m} \rightarrow 0.7 \text{ m}$
- profundidad $z = 20.0 \text{ m} \rightarrow 25.0 \text{ m} < 35.0 \text{ m}$
- espaciamiento $s = 1.5 \rightarrow 3.5 \text{ m}$

Consiste en hincar una camisa resistente dentro del suelo granular por compactar, teniendo una obstrucción en la punta ya sea un tapón de grava o una válvula de charnela, y luego colocar dentro grava o piedra compactada a golpes con un martillo o mediante vibración hidráulica, según el método utilizado. El tiempo de construcción de una columna puede variar entre 10 min y 30 min.

Ha sido utilizado con éxito en la cimentación de tanques de almacenamiento, silos para almacenamiento de granos, edificios industriales y vivienda de interés social. Se ha empleado también como refuerzo contra el potencial de licuación

4.4 Drenos Verticales (*wick drains*)

Los *wick drains*, derivan su nombre de **wick**, mecha para conducir el aceite de un reverbero, y tienen su aplicación a un geotextil compuesto que envuelve un plástico corrugado, con gran capacidad de flujo. Su presentación es en tiras, hojas o en aletas (*fin*).

Para expresar la permeabilidad de los geotextiles, la ecuación de Darcy debe ser retrabajada y algunas definiciones deben ser agregadas a la teoría de flujo a través de medios porosos.

i. Coeficiente de Permeabilidad

$$Q = k i A$$

donde

Q = flujo a través de área A por unidad de tiempo

k = coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica)

i = dh/dx gradiente hidráulico

A = área de la sección transversal del conducto de flujo

ii. Permitividad, Ψ (Para flujo a través de un geotextil dx)

$$Q = \frac{k}{dx} dh A = \Psi dh A$$

donde:

$$\psi = k/dx = \text{permitividad (seg}^{-1}\text{)}$$

iii. Transmisividad, θ (Para flujo a lo largo del geotextil)

$$Q = (k b) i a = \theta i a$$

donde

$$A = ab$$

a = ancho de la tira

b = grueso de la tira

$$\theta = kb = \text{transmisividad (m}^2\text{/s)}$$

Estos términos se pueden expresar como

Coficiente de Permeabilidad	$k = \frac{Q dx}{A dh}$	m/s
Permitividad	$\psi = \frac{Q}{A dh}$	s ⁻¹
Transmisividad	$\theta = \frac{Q}{i a}$	m ² /s

Los valores prácticos de los geotextiles son:

	k_n (m/s)	ψ (s ⁻¹)	θ (m ² /s)
No-tejidos	$4 \times 10^{-3} \rightarrow 10^{-4}$	$4 \rightarrow 4 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-4} \rightarrow 10^{-6}$
Tejidos	$10^{-4} \rightarrow 10^{-5}$	$2 \times 10^{-1} \rightarrow 3 \times 10^{-2}$	$10^{-3} \rightarrow 100$
Geocompuestos			$10^{-3} \rightarrow 100$

4.5 Tierra Armada

Ya se dijo en qué condiciones fue inventada esta técnica por Henri Vidal. A partir de su concepción, como los otros sistemas aquí reseñados, tuvo un amplio desarrollo, especialmente después de 1975.

La tierra armada se compone de los siguientes elementos:

- **Relleno:** En material granular con propiedades friccionales para desarrollar un alto ángulo de fricción interna ϕ en la masa de suelo reforzado
- **Tiras de Refuerzo:** Flexibles pero con protuberancias de anclaje de manera que se ajusten íntimamente al relleno.
- **Escamas de Recubrimiento:** Hechas en concreto con el diseño a gusto del fabricante.

Inicialmente se ensayaron diversos modelos de tiras de refuerzo; después de descartar el aluminio, el acero inoxidable y el recubrimiento en poliéster, se adoptó finalmente el refuerzo en tiras corrugadas de acero galvanizado.

Las escamas de recubrimiento fueron inicialmente metálicas y muy pronto se pasó a paneles pre-fabricados en concreto con diseño **cruciforme** que se ha vuelto característico.

El procedimiento constructivo implica la erección del muro en la medida en que se va compactando el relleno friccional detrás de las escamas de recubrimiento, las cuales van sostenidas desde el interior por tiras de refuerzo, a razón de cuatro por cada escama. El tamaño de la cruz ha llegado a ser 1.50 m x 1.50 m y 1.35 x 1.35 m entre los brazos de la cruz; las escamas tienen una

trabazón machihembrada entre ellas, y además tienen unos pasadores de ajuste vertical.

La causa primera de la estabilidad de estos muros radica en el desarrollo de una cohesión virtual en el material de relleno, originada en el refuerzo. Esta cohesión está dada por (véase **Fig. 1 A**):

$$C = \sqrt{K_p} \frac{RT}{\Delta H}$$

donde

C = cohesión originada por el refuerzo

$$K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

RT = resistencia tensional unitaria del refuerzo

ΔH = espaciamiento vertical de las tiras de refuerzo

Por lo demás, el muro debe cumplir con algunas condiciones de diseño, siendo las más importantes:

1. $B/H > 0.5$ como mínimo
2. $B/H = 0.8$ por regla general
3. Estabilidad Externa
 - deslizamiento en la base
 - volcamiento
 - capacidad portante
4. Estabilidad Interna
 - rotura del refuerzo
 - adherencia insuficiente

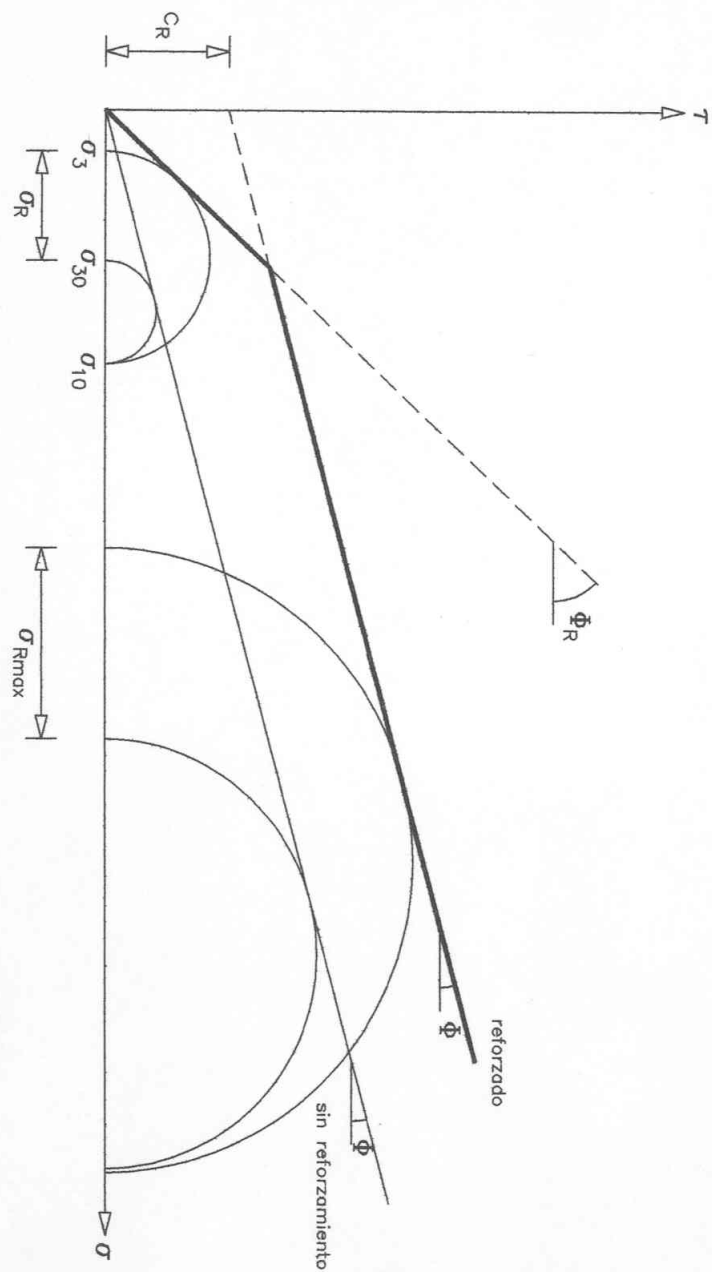


Figura 1 A – TIERRA ARMADA. Generación de la cohesión virtual

Debe llamarse la atención sobre el hecho de que ésta no es una técnica de refuerzo in-situ de un talud, sino que hay que excavar y rellenar para luego colocar un contrafuerte en **tierra seleccionada y armada**, para producir la deseada estabilización.

4.6 Inyección Presurizada (*Jet Grouting*)

Es una técnica de reemplazo y mejoramiento de suelos mediante la acción de una herramienta rotatoria que inyecta agua a presión (*Jet*). En la medida en que, una vez ablandado el suelo natural, se extrae la herramienta, se realiza la inyección de la mezcla que intenta mejorar a la resistencia o la permeabilidad del suelo natural. La técnica fue introducida en Japón en los comienzos de la década de los 70s, y en sus comienzos se aplicó a suelos de tipo aluvial. Hoy día, con base en el mejoramiento de las técnicas de bombeo e inyección, se aplica también a suelos arcillosos.

Las características geométricas típicas son:

- diámetro de la columna $d = 0.50 \text{ m} \rightarrow 0.80 \text{ m}, 1.00 \text{ m} \rightarrow 3.00 \text{ m}$
- profundidad $z = 15.0 \text{ m} \rightarrow 30 \text{ m} < 70 \text{ m}$
- espaciamiento columnas secantes (20% traslapo)
- resistencia $f_c > 500 \text{ psi (3450 Kpa)}$

Ha sido utilizada con éxito en la submuración de edificios con cimentación defectuosa, en el refuerzo de portales de microtúneles y en la creación de barreras impermeables para control ambiental.

◦ **Métodos de aplicación.** Tres métodos básicos de aplicación se reconocen en el presente, aunque la técnica sigue en proceso de refinamiento. estos tres métodos son:

F 1 - Sistema de un fluido: El fluido es la inyección misma y el chorro producido por el mecanismo de inyección, simultáneamente erosiona e inyecta. El reemplazo de suelo que así se produce es sólo parcial.

F 2 - Sistema de dos fluidos: Este sistema utiliza un chorro de cemento dentro de un cono de aire a presión. Esta facilidad conduce a un mayor diámetro de la columna y a un mayor reemplazo del suelo original.

F 3 - Sistema de tres fluidos: En esta variante se produce una inyección superior de agua dentro de un cono de aire a presión, para excavar. El fluido de la inyección, propiamente dicho, viene en una posición inferior para efectuar la mezcla y el reemplazo de suelo, que en esta modalidad es superior a lo esperado en las otras dos.

◦ **Utilización.** La utilización del método en el presente cubre desde las gravas más gruesas hasta las arcillas más finas, en aplicaciones precisas que incluyen las siguientes:

Barreras de Flujo: En aplicaciones urbanas donde no es posible desviar instalaciones pre-existentes, hay dos posibilidades: la primera soportar el tubo mediante inyección; la segunda, incorporar el tubo en la solución, haciéndolo parte de la barrera que se construye.

Construcción de Túneles: Como ayuda para la construcción de túneles en materiales blandos y saturados la inyección presurizada puede utilizarse para soportar lateralmente el túnel y su techo. En casos donde el suelo es muy blando puede inyectarse la totalidad del espacio para luego excavar a través del suelo mejorado. Una tercera aplicación en la técnica de micro-túneles consiste en utilizar la inyección presurizada para los portales de iniciación y para producir los bloques de reacción en cada punto de iniciación.

Refuerzo Estructural: Todo tipo de refuerzo estructural de edificaciones existentes ha sido llevado a cabo, especialmente en relación con el refuerzo de cimentaciones en edificaciones históricas y de preservación, y en casos donde mediante submuración deben corregirse defectos de cimentaciones existentes que tienen problemas de asentamientos diferenciales.

Aplicaciones Misceláneas: Aplicaciones misceláneas se conocen, donde se ha mezclado la utilización de inyección presurizada y mezcla profunda, de manera que cada técnica realiza la porción de obra que le es más afín. Esto ha sido particularmente útil en excavaciones complejas al lado de edificios existentes, a cuya preservación hay que atender.

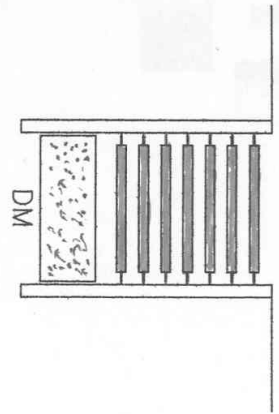
4.7 Mezcla Profunda (*Deep Mixing*)

Es un método de mejoramiento de los suelos naturales originado en una idea de los Estados Unidos (1954), simultáneamente en Japón y Escandinavia en 1967. Consiste en estabilizar los suelos mezclándolos in-situ con una mezcla estabilizante hecha de cemento, cal, bentonita y otros agentes químicos, según los propósitos y las necesidades del proyecto específico. La inyección se hace en lodo o en polvo seco (ver **Fig. 2**).

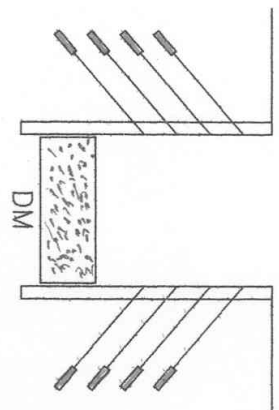
Maquinarias especialmente diseñadas, se aplican a introducir sartas de uno dos y tres ejes de tornillos sin fin, que se encargan de remoldear el suelo natural y producir la inyección. Los diferentes ejes tienen rotaciones recíprocas.

Las características geométricas típicas son:

- diámetro de la columna $d = 0.50 \rightarrow 1.30 \text{ m}$
- profundidad $z \leq 40 \text{ m}$

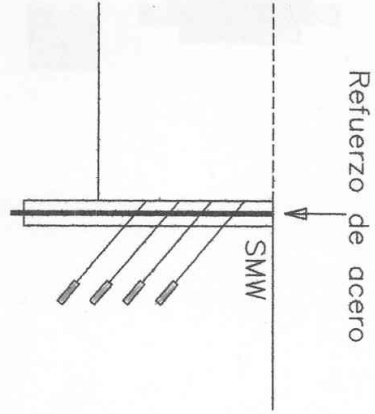


Excavación apuntalada

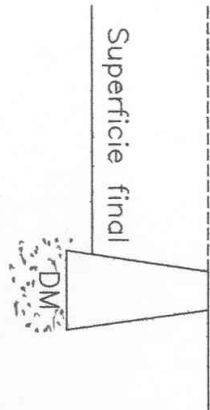


Excavación pernada

a) Estabilización de la base para reducir la presión de fondo durante la excavación



DM muro reforzado con pernos



DM contención muro de gravedad

b) Sistemas de conservación para restringir la presión activa de tierras durante la excavación

Figura 2 – APLICACIONES DE LA MEZCLA PROFUNDA (DM) EN LA SOLUCIÓN DE EXCAVACIONES

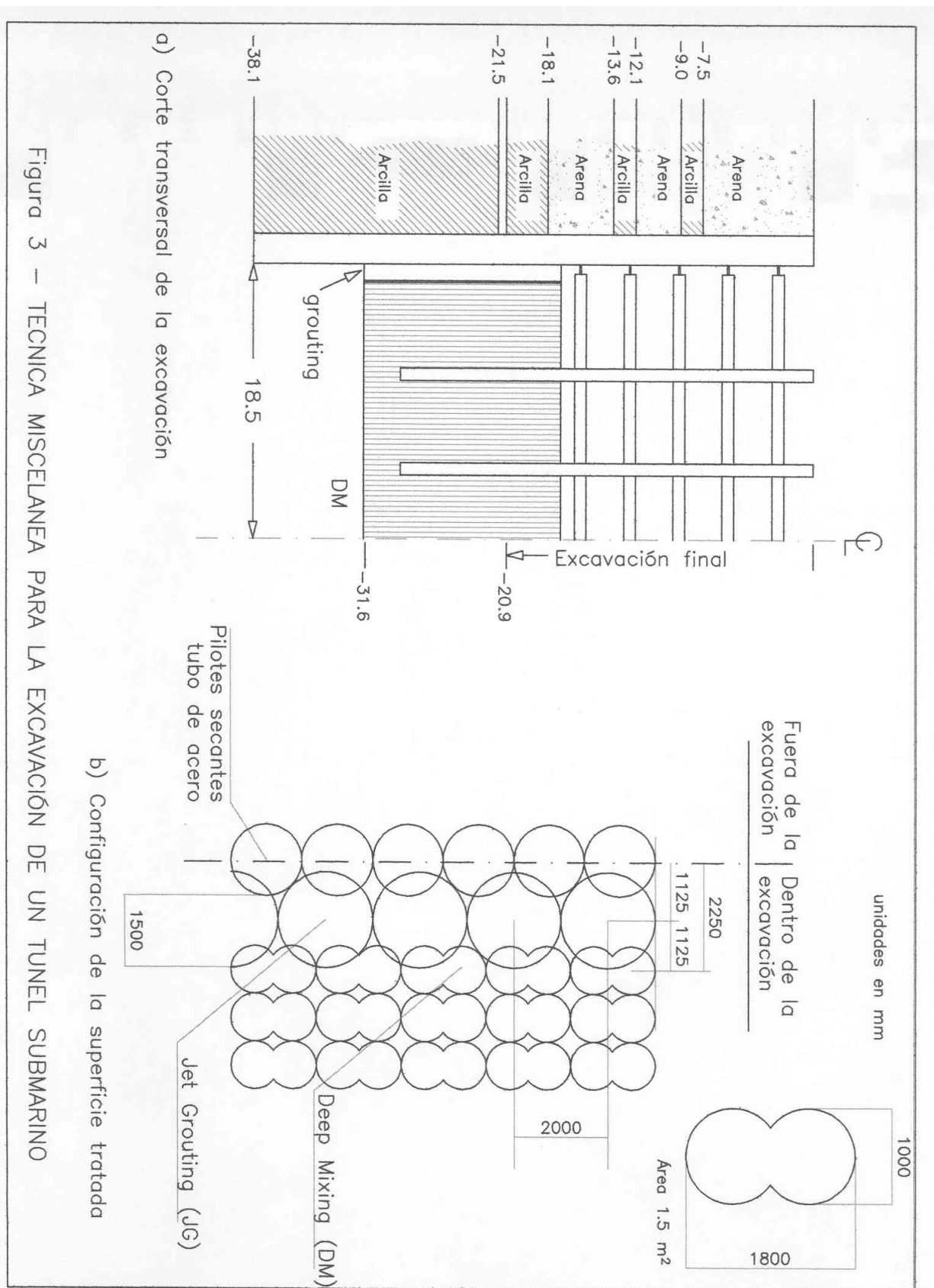


Figura 3 – TECNICA MISCELANEA PARA LA EXCAVACIÓN DE UN TUNEL SUBMARINO

- espaciamiento columnas secantes 20% traslapo
- resistencia (2000 kpa → 4000 kpa)

◦ **Métodos de Aplicación.** El método de aplicación ha sido cuidadosamente clasificado y seleccionado por grupos de expertos para permitir la adecuada diseminación del método. En este sentido, puede establecerse lo siguiente:

Características del Aglomerante. Puede hablarse de aplicación del agregado en seco, o en forma de lodo. La mayoría de aplicaciones en el mercado utilizan la técnica húmeda. La técnica seca se aplica especialmente a las denominadas columnas de cal (*lime columns*) en Escandinavia.

Principio de Agregación y Mezcla. Dos sistemas aparecen citados dentro de los mas de 24 métodos de aplicación, cabalmente referenciados y patentados; estos son: a través de sarta rotatoria o mediante inyección (*Jet*) (ver *Fig. 3*).

Punto de acción. El punto de ocurrencia de la mezcla tiene importancia en la diferenciación de los métodos. Unos lo hacen a través de la sarta y otros en la punta de la herramienta.

◦ **Aplicaciones Recomendadas.** A continuación se enumeran los tipos generales de aplicación en los cuales la mezcla profunda ha comprobado las bondades de su utilización:

Barreras contra flujo: Se ha intentado con éxito para cortar flujos nocivos de agua subterráneas, inclusive con el propósito de producir el llamado efecto bañera (*bathtub effect*).

Muros para soporte de excavaciones: En combinación con pantallas de concreto y con inyecciones presurizadas es factible dominar técnicas de excavación profunda que antes la mala calidad de los suelos no permitía.

Tratamiento del terreno: No se trata sólo de manejar terrenos difíciles sino de mejorarlos.

Mitigación del potencial de licuación: En suelos arenosos finos, susceptibles de licuación, es posible controlar esta amenaza con un programa masivo de mejoramiento, circunscrito al estrato o estratos licuables bajo la acción de eventuales terremotos.

Refuerzo in-situ: De pilotes o muros de gravedad pre-existentes, donde nuevas circunstancias, excavaciones o cargas, aumentan su potencial de falla.

Tratamiento del medio ambiente: Para confinamiento de depósitos peligrosos y para evitar la contaminación de acuíferos.

5. COLOFON

El desarrollo de nuevas técnicas y la aplicación, individual o combinada, de ellas en la solución de los problemas que enfrenta el ingeniero geotecnista, han llevado poco a poco al desplazamiento del centro de gravedad de su actividad. No se trata ya únicamente de conocer profundamente los depósitos de suelos y sus propiedades geomecánicas, especialmente sus debilidades, sino cómo corregirlas de manera anticipada, antes de que se desarrolle su amenaza.

Poco a poco el Geotecnista se ha acercado al Estructural en el sentido de que cada vez tiene más ingerencia en la calidad de los materiales con los que trabaja.

APENDICE - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 AUGELLO, A.J. et al **Evaluation of Solid Waste Land fill Performance during The Northridge Earthquake**. Earthquake Design and performance of Solid Waste Landfills. Proc. Ses. of the ASCE. Ed. Mishac Yegian and Liam Finn. Oct. 1995
- 2 BROMS, B.B. **Deep Compaction of Granular Soils** Ch, 23 Foundation Engineering, edited by Hsai-Yong Fang. Van Nostrand Reinhold 1991.
- 3 BROMS, B.B. **Stabilization of Soils with Lime Columns**. Ch, 24 Foundation Engineering, edited by Hsai-Yong Fang. Van Nostrand Reinhold 1991.
- 4 BRUCE, D.A., & BRUCE, M.E.C. **An Update on Deep Mixing Technology Worldwide**. The Third National Conference of The Geo-Institute of ASCE. Urbana Champaign USA, June 1999
- 5 DAVISSON, M.T. **High Capacity Piles**. Proceedings Lecture Series, Innovations in Foundation Construction, SM & FD, ASCE, Illinois Section Chicago, 1972.
- 6 ESPINOSA, Augusto **Pilotes en la Cimentación sobre Suelos Blandos** Segundo Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería, 1993.
- 7 ESPINOSA, Augusto **Indicadores Geotécnicos para una Problemática Renovada**. VII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, Octubre de 1998
- 8 ESPINOSA, Augusto ... **And Back to Theory** The Third National Conference of The Geo-Institute of ASCE. Urbana **Champaign** USA, June 1999
- 9 GRUNER, L. B. **Jet Grouting in Cohesive Soils**. The Third National Conference of The Geo-Institute of ASCE. Urbana Champaign USA, June 1999
- 10 HAUSMANN, M.R. **Engineering Principles of Ground Modification**. Mc Graw-Hill, 1990.
- 11 JURAN, Y & ELIAS, V. **Ground Anchors and Soil Nails in Retaining Structures**. Ch, 26 Foundation Engineering, edited by Hsai-Yong Fang. Van Nostrand Reinhold 1991.
- 12 KOERNER, R. M. & WELSH, J.P. **Construction and Geotechnical Engineering using Synthetic Fabrics** John Wilcy & Sons, New York, 1980.
- 13 KOERNER, R.M. **Geosynthetics in Geotechnical Engineering**. Ch. 22 Foundation Engineering, edited by Hsai-Yong Fang. Van Nostrand Reinhold 1991.

- 14 PORBAHA, A, et al **Deep Mixing Technology for Deep Excavation**. The Third National Conference of The Geo-Institute of ASCE. Urbana Champaign USA, June 1999
- 15 SCHLOSSER, & LONG **La Terre Armée-Recherches et Realisations**. Bulletin Ligison Labo Ponts de Ghaussées. Vol. 62, 1972.
- 16 SCHLOSSER, F. & BASTICK, M. **Reinforced Earth**. Ch. 21 Foundation Engineering, edited by Hsai-Yong Fang. Van Nostrand Reinhold 1991.
- 17 TUCHMAN, BARBARA W **The March of Folly**. Alfred A. Knopf, 1984
- 18 VIDAL, Henri The **Principles of Reinforced Earth Highw**. Res. Dic. Vol. 282, 1969.
- 19 WINTERKORN, H.F. & PAMUKCU, S. **Soil Stabilization and Grouting** Ch. 9 Foundation Engineering, edited by Hsai-Yong Fang. Van Nostrand Reinhold 1991.
- 20 XANTHAKOS, P,P,. ABRAMSON, L.W, & BRUCE,, D,A. **Ground Control and Improvement**. Wiley, Interscience 1994.
- 21 XANTHAKOS, P.P. **Slurry Walls as Structural Systems**. 2nd. Edition, McGraw Hill. 1994