

## MEJORA GEOTECNICA DEL SUELO\*

Alvaro López Ruiz

Doctor en Química Industrial

Senior Soil Engineer

Director Técnico de Soil Testing Española

271-1

### SUMARIO

*Se resumen y comparan someramente los principales métodos de mejora geotécnica de los suelos de cimentación. Se trata con más detalle la técnica de las inyecciones químicas y la de compactación dinámica profunda de suelos flojos. Se describen algunas de las obras realizadas con estas técnicas en las que ha colaborado el autor, algunas de ellas en Gran Canaria, y los resultados obtenidos.*

### GENERALIDADES

El suelo consiste en un depósito de partículas sólidas, más agua y gases, procedentes de la desintegración de las rocas, y en su estado natural constituye el apoyo de muchas estructuras construidas por el hombre. Asimismo, el suelo se utiliza en numerosas ocasiones, incluso como material de construcción, como lo atestigua la existencia de estructuras de tierra, tales como presas, diques y rellenos para carreteras, aeropuertos, y para nivelar áreas de topografía irregular en las que se va a construir. El suelo, por otra parte, presenta en bastantes ocasiones, como material de construcción, las características favorables de abundancia, durabilidad y coste comparativamente bajo; por otra parte, cuando el suelo no reúne las características geotécnicas adecuadas, para el fin previsto, frecuentemente puede mejorarse.

Los suelos intrínsecamente resisten, en general, bastante bien a compresión, en su estado natural, confinado, pero mal a la tracción, ya que la mayor

parte de su resistencia depende de su rozamiento interno. Este no se moviliza a tracción, pero sí a compresión, si las tensiones las soporta el esqueleto sólido y no el agua intersticial, cuya resistencia al corte es prácticamente nula.

En la mayoría de los casos de mejora geotécnica del suelo el objetivo del tratamiento es obtener uno o más de los siguientes cambios, en las propiedades o condiciones del suelo:

1. Aumentar la resistencia mecánica.
2. Reducir la compresibilidad en orden a minimizar los asentos bajo cargas estáticas.
3. Reducir el potencial de licuefacción bajo cargas dinámicas y movimientos sísmicos.
4. Disminuir la permeabilidad.
5. Disminuir la erosionabilidad.
6. Disminuir el potencial de colapso estructural.
7. Disminuir el potencial físico-químico de expansión.

Las ideas básicas sobre la mejora de los suelos de cimentación se iniciaron hace siglos, e incluyen el drenaje, la compactación, la desecación y posteriormente la cementación y el refuerzo. Las inyecciones granulares (suspensiones de arcilla, cales, cemento, etc.), se iniciaron el siglo pasado y las inyecciones químicas (soluciones líquidas capaces de endurecer) a mediados del presente siglo, especialmente en la década de los años 60 (inyecciones estructurales), siendo aún más reciente la utilización de las «inyecciones de compactación» en recalces y en túneles para el Metro, perforados en suelos sedimentarios, así como las «inyecciones por chorro» que se están desarrollando principalmente en el Japón. Una técnica también reciente es la compactación dinámica profunda, que lógicamente no se ha podido desarrollar con amplitud, hasta que se ha podido disponer de grúas con capacidad suficiente para el levantamiento y manejo de mazas de gran peso.

### COMPARACION DE METODOS PARA LA MEJORA GEOTECNICA DEL SUELO

Los principales métodos de mejora del suelo figurarán en la tabla N.º 1, que puede ser utilizada

\* Con referencia al Congreso de Nueva Orleans, 1982, organizado por la ASCE.

Conferencia pronunciada en el Colegio de Arquitectos, de Las Palmas, el 9 de febrero de 1983.

TABLA N.º 1

		MÉTODOS PARA MEJORA DEL SUELO (J.K. Mitchell)							
	Método	Principio	Condiciones más adecuadas del suelo	Materiales especiales requeridos	Máxima profundidad efectiva del método	Equipo especial requerido	Propiedades del suelo tratado	Ventajas especiales y limitaciones	Coste relativo
COMPACTACIÓN PROFUNDA IN SITU DE SUELOS INCOHERENTES	Explosiones	Ondas de choque y vibraciones provocando licuefacción y desplazamientos, originando asentamientos y aumentando densidad.	Arenas limpias saturadas; arenas parcialmente saturadas y limos (loess colapsable) inundados	Explosivos, entubación de taladros	> 30 m	Sonda de perforación o chorro perforador	Se puede conseguir densidades relativas del 70-80% pero variables. Aumento de resistencia dependiente del tiempo.	Rápido, económico y de gran amplitud. Propiedades variables; no mejora cerca de la superficie. Peligroso.	Bajo
	Vibro-Probe	Densificación por vibración; licuefacción y asentamientos inducidos.	Arena limpia saturada o seca	Ninguno	20 m (Sin efecto en los primeros 3 a 4 m)	Equipo vibratorio de hincado de pilotes. Tubo de acero de 75 cm de Ø	Puede obtenerse densidades relativas de hasta 80%. Sin efecto en algunas arenas	Rápido, sencillo. Adecuado bajo agua. No adecuado en suelos parcialmente saturados. Difícil de penetrar en las capas rígidas superiores.	Moderado
	Vibro-compactación.	Densificación por vibración y compactación del material de relleno	Suelos incoherentes con menos de 20% de finos.	Relleno granular; agua abundante.	30 m	Equipo vibratorio especial, grúa, bombas	Se puede conseguir altas densidades relativas; buena uniformidad	De utilidad en suelos saturados y parcialmente saturados; uniformidad.	Moderado
	Pilotes de compactación	Densificación por desplazamiento del volumen del pilote y por la vibración durante la hincada	Suelos arenosos flojos. Suelos arcillosos parcialmente saturados; loess	Material del pilote (frecuentemente arena o suelo mas cemento).	> 20 m	Máquina de hincar pilotes. Equipo especial para pilotes de arena.	Se puede conseguir altas densidades y buena uniformidad.	Util en suelos con finos; compactación uniforme, fácil de comprobar resultados; lento; mejora limitada de la capa superior de 1-2m	Moderado a alto
	Compactación dinámica profunda	Aplicación repetida de impactos de gran intensidad en superficie	Suelos incoherentes, suelos parcialmente saturados, rellenos vertidos, basureros	Ninguno	30 m ?	Mazas de gran tonelaje. Grúas de gran capacidad	Buena mejora y uniformidad razonable	Sencillo, rápido, adecuado para algunos suelos con finos. Utilizable sobre y bajo agua. Precisa de control y debe estar alejado de estructuras existentes	Bajo
P.R.E.C.O.M.P.R.E.S.I.O.N	Precarga	La carga se aplica con tiempo suficiente antes de la construcción, para que el asiento del suelo blando tenga lugar antes de la construcción	Arcilla blandas normalmente con solididades, limos, suelos orgánicos, rellenos sanitarios	Relleno de tierra u otro material de carga; Arena o grava para manto de drenaje	—	Equipo de movimiento de tierras, grandes tanques de agua o sistemas de drenaje por vacío, referencias de asentamientos; piezómetros	Disminución de la humedad y de la porosidad. Aumento de la resistencia.	Sencillo, teoría bien desarrollada, uniformidad, lento (Se pueden utilizar drenes verticales para disminuir el tiempo de consolidación)	Bajo (Moderado si se emplean drenes verticales)
	Relleno como sobrecarga	Se coloca un espesor de relleno en exceso al requerido permanentemente, para conseguir un asiento determinado en un tiempo mas corto. A continuación se retira el relleno en exceso	Arcillas blandas normalmente con solididades, limos, depósitos orgánicos, vertederos sanitarios completados	Relleno de tierra u otro material para cargar el área; arena o grava para el manto de drenaje	—	Equipo de movimiento de tierras. Referencias de asentamientos; piezómetros	Disminución de la humedad, porosidad y compresibilidad; aumento de la resistencia	Mas rápido que la precarga sin sobrecarga. Teoría bien desarrollada. Se precisa utilizar material en exceso. Se pueden emplear drenes verticales para reducir el tiempo de consolidación	Moderado
	Electro-osmosis	La corriente continua provoca un flujo de agua desde el ánodo hacia el cátodo, de donde es retirada	Limos y arcillas limosas normalmente consolidadas	Anodos y Cátodos (Well points)		Corriente eléctrica continua; cables conductores; sistemas de medida	Disminución de la humedad y compresibilidad; aumento de la resistencia; endurecimiento electroquímico	No se precisa relleno de carga; puede emplearse en zonas confinadas; es relativamente rápido; propiedades no uniformes entre electrodos. No adecuado en suelos muy conductores	
I.N.Y.E.C.C.I.O.N	Inyección de suspensiones	La inyección rellena los poros del suelo con suelo, cemento y/o arcilla, cenizas volantes	Arena media a gruesa y grava	Productos de inyección, agua	Ilimitado	Mezcladoras, tanques, bombas, mangueras	Impermeabilidad alta resistencia con inyección de cemento; elimina el peligro de licuefacción	Inyección económica, alta resistencia; limitación a succion granulares gruesas, difícil de evaluar	El más económico de los sistemas de inyección.
	Inyección química	Soluciones de dos o más reactivos químicos en los poros del suelo, para formar un gel o un precipitado sólido	Arenas y limos medios y gruesos	Productos de inyección, agua	Ilimitado	Mezcladoras, tanques, bombas, mangueras	Impermeabilidad, baja a alta resistencia; elimina el peligro de licuefacción	Baja viscosidad, tiempo de gelificación controlable, buen sellado del agua, alto costo, difícil de evaluar	Alto a muy alto
	Cal inyectada a presión	Lechada de cal inyectada a poca profundidad, con alta presión	Arcillas expansivas	Cal, agua, surfactantes	Ilimitada, pero usualmente de 2 a 3 m	Tanques, agitadores, bombas, mangueras	Zonas encapsuladas con cal, formadas por los canales producidos por las grietas de la fractura hidráulica	Solo efectivo en un campo reducido de condiciones del suelo	Competitivo con otras soluciones en problemas de arcilla expansivas
	Inyección de compactación o desplazamiento	La inyección de alta viscosidad actúa como un gel hidrúlico radial al bombarla a alta presión	Suelos blandos o flojos de grano fino; suelos de cimentación con grandes huecos o cavidades	Suelo, cemento, cenizas volantes, agua	Ilimitado, pero usualmente unos cuantos metros	Equipo de mezclado, bombas de alta presión, mangueras	Bulbos de inyección dentro de la matriz comprimida del suelo	Eficaz para corregir asentamientos diferenciales, relleno de huecos y cavidades. Se requiere un control cuidadoso	Materiales económicos. Inyección cara

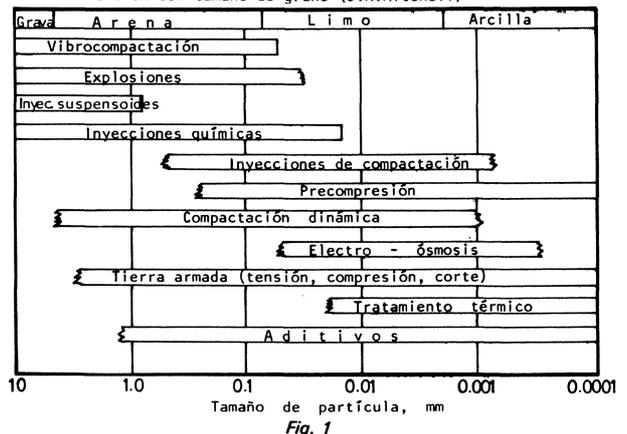
Método	Principio	Condiciones más adecuadas del suelo	Materiales especiales requeridos	Máxima profundidad efectiva del método	Equipo especial requerido	Propiedades del suelo tratado	Ventajas especiales y limitaciones	Coste relativo	
Inyección electrocinética	Los agentes químicos estabilizadores se desplazan dentro del suelo por electro-ósmosis o los coloides en los poros por electroforesis	Arenas, limos, arcillas	Agentes químicos estabilizantes, agua	Desconocida	Corriente eléctrica continua, ánodos, cátodos	Aumento de la resistencia, disminución de la compresibilidad y del potencial de licuefacción	Suelos y estructuras existentes no sometidas a altas presiones en el proceso; no adecuado en suelos de alta conductividad	Caro	
Inyección por chorro	Chorros de alta velocidad; mezcla del agente estabilizador con el suelo, para formar columnas o paneles	Arenas, limos, arcillas	Agentes químicos, estabilizadores, agua	—	Toberas especiales para producir el chorro, bombas, tubos y mangueras	Paneles y columnas solidificadas	Eficaz en suelos que no puedan ser tratados con inyección de permeación; precisión en la situación de las zonas tratadas		
ADICIONES	Excavación y Reposición	Excavación del suelo de cimentación y mejora del mismo, mediante desecación o con aditivos y recompactación en el sitio	Suelos inorgánicos	Aditivos estabilizadores	10 m ?	Equipo de excavación, mezclado y compactación	Aumento de la resistencia y rigidez, disminución de la compresibilidad	Uniforme; suelo de cimentación controlado al reponerle; puede requerir grandes áreas para el secado	Alto
	Rellenos estructurales	El relleno estructural distribuye las cargas a los suelos inferiores blandos	Sobre arcillas blandas o suelos orgánicos, depósitos de marismas	Arena, grava, cenizas volantes, escorias, depósitos conchíferos, residuos de incineración	—	Equipo de mezcla y compactación	Suelo natural blando, protegido por relleno estructural portante	Alta resistencia, buena distribución de cargas a los suelos blandos inferiores	Baja a Alto
	Pilotes y paneles mezclados in situ con el suelo	Cal, cemento o asfalto, introducido mediante barrenas helicoidales rotativas, o mezcladores especiales	Todos los suelos inorgánicos, blandos o flojos	Cemento, cal, asfalto, o estabilizadores químicos	> 20 m	Sonda de perforación, cabeza rotativa mezcladora, equipo de dosificación de los aditivos	Pilotes o paneles de suelo solidificado de relativa alta resistencia	Se utiliza el suelo natural existente; difícil de controlar	Moderado a Alto
TRATAMIENTO TÉRMICO	Calefacción	Secado a baja temperatura; alteración de las arcillas a temperaturas intermedias (400-600 °C), fusión a altas temperaturas (>1000 °C)	Suelos de grano fino, especialmente arcillas parcialmente saturadas y limos, loess	Gasoil	15 m	Tanques de gasoil, quemadores, sopladores	Disminución de la humedad, plasticidad y sensibilidad al agua. Aumento de la resistencia	Se pueden conseguir mejoras irreversibles de las propiedades	Alto
	Congelación	Congelación del suelo blando y húmedo para aumentar su resistencia y rigidez	Todo tipo de suelos	Refrigerantes	Varios metros	Sistema de refrigeración	Aumento de la resistencia y rigidez, disminución de la permeabilidad	Temporal; no adecuado en corrientes de agua	Alto
REFUERZO	Columnas de arena y piedra por vibro-sustitución	Taladro perforado con chorro en suelos blandos de grano fino; rellenos con grava o arena compactada	Arcillas blandas y suelos aluviales	Grava o roca machacada como relleno	20 m	Equipo de vibro-flotación, agua	Aumento de la capacidad portante, disminución de asentamientos	Más rápido que la precompresión; se evita la eliminación de agua; capacidad portante limitada	Moderado a Alto
	Micropilotes	Elementos para absorber tensiones, compresiones, esfuerzos cortantes	Todo tipo de suelos	Barras de refuerzo, inyección de cemento	?	Equipo de perforación e inyección	La zona reforzada se comporta como una masa coherente	Refuerzo in situ de suelos que no pueden ser inyectados o mezclados in situ con aditivos estabilizadores	Moderado a Alto
	Tiras, rejillas y membranas (Tierra armada)	Tira horizontal de tensión o membrana enterrada en el suelo bajo rellenos, cimientos y subbases granulares	Suelos incoherentes y algunos suelos con cohesión y ángulo de rozamiento	Tiras metálicas o de plástico; geotextiles	Se pueden construir estructuras de tierra con alturas de varias decenas de metros	Equipo de excavación y movimiento de tierras y de compactación.	Estructuras auto-resistentes, aumento de la capacidad portante, deformaciones reducidas	Estructuras de tierra coherentes; pueden tolerar deformaciones, aumento de la capacidad portante admisible	Baja a Moderado

como base de comparación de las características específicas de cada sistema. Para cada método se indica lo siguiente:

- Principio o mecanismo primario.
- Tipos o condiciones del suelo más adecuadas.
- Máxima profundidad efectiva de tratamiento.
- Materiales especiales y equipo requerido.
- Propiedades del material tratado.
- Ventajas especiales y limitaciones.
- Coste relativo.

Una comparación adicional más esquematizada se da en la Fig. 1, que presenta los distintos métodos de tratamiento en función del tamaño de grano del suelo.

Aplicabilidad de métodos de tratamiento del suelo en función del tamaño de grano (J.K.Mitchell)



Los principales métodos de mejora del suelo se han agrupado de la forma siguiente:

- Compactación profunda in situ.
- Precarga.
- Inyecciones.
- Adiciones.
- Tratamiento térmico.
- Refuerzo de tierras.

### SELECCION DEL METODO DE TRATAMIENTO DEL SUELO

De manera análoga a las personas, los suelos pueden presentar debilidades estructurales e incluso enfermedades. Al igual que hace el médico, que selecciona medicaciones para el tratamiento del enfermo, el ingeniero geotécnico al tratar un suelo debe prescribir un tratamiento apropiado para la debilidad o enfermedad en cuestión. Solamente después de una evaluación de los diversos factores puede realizarse con buena probabilidad de éxito la selección del mejor método. Algunos factores importantes, que deben conocerse, son los siguientes:

1. Propósito del tratamiento. Esto determinará el nivel de mejora geotécnica requerido en términos de resistencia, rigidez, compresibilidad, permeabilidad y estabilidad. Tipo de estructura, tipo de carga, asientos permisibles.
2. El área, profundidad y volumen total de suelo a tratar.
3. Tipo de suelo y sus propiedades geotécnicas iniciales, lo que incluye el conocimiento de la fase líquida y en ocasiones de la hidrogeología y de la geología de la zona.
4. Estabilidad global de la zona.
5. Disponibilidad de materiales.
6. Disponibilidad de especialistas y de equipos.
7. Factores ambientales; eliminación de residuos, erosión, contaminación del agua, efectos sobre estructuras y servicios adyacentes.
8. Experiencia local.
9. Tiempo disponible.
10. Coste.

Una vez que estos factores han sido evaluados, se puede reducir la lista de métodos potencialmente aplicables a quizás dos o tres, o en algunos ca-

sos a uno sólo. Esto puede darse, por ejemplo, en el caso de inyecciones en relación con problemas tales como: a) Sellado de filtraciones a través de cimentaciones sótanos, y estribos de estructuras, cuando las pantallas de impermeabilización son impracticables; b) Impermeabilización rápida del suelo en excavaciones, durante el período de construcción, etc.

### CONSIDERACIONES GENERALES FINALES

En relación con el tratamiento geotécnico de los suelos, transcribimos a continuación algunas consideraciones sobre dicho tema del Prof. Mitchell, de la Universidad de California, Berkeley, leídas en la Conferencia de la American Society of Civil Engineers «Las inyecciones en la Ingeniería Geotécnica» celebrada en Nueva Orleans, en febrero de 1982.

En cuanto a las prescripciones para el tratamiento del suelo, podemos considerar una analogía médico-enfermo. Así, por ejemplo, se ha publicado que a los estudiantes de medicina se les suele enseñar la regla «25-25-50» siguiente, que dice:

1. El 25 % de los pacientes mejoran como resultado de los esfuerzos del médico.
2. El 25 % de los pacientes empeoran, a pesar de los esfuerzos del médico.
3. El 50 % de los pacientes se curarán por sí mismos, supuesto que el médico no cometa ninguna equivocación.

Como ingenieros geotécnicos deberíamos ser capaces de hacerlo mejor, pero puede haber cierta analogía. Así, puede estimarse algo como lo que sigue, aunque los porcentajes sugeridos son crudas aproximaciones:

1. El 25 por ciento de los suelos geotécnicamente insatisfactorios pueden ser notablemente mejorados mediante la aplicación adecuada de alguno de los diversos métodos de tratamiento del suelo.
2. El 25 por ciento de las condiciones geotécnicas del suelo son tan insatisfactorias que no podemos tratarles razonablemente. En tales casos deberíamos, o abandonar el sitio o buscar otras soluciones para resolver el problema, por ejemplo cimentaciones profundas, o proyectar de nuevo la estructura.
3. El 50 por ciento de los suelos pueden emplearse como están naturalmente, para base de apoyo de cimentaciones, supuesto que seleccionamos y aplicamos correctamente la técnica de cimentación adecuada y se controlan los trabajos y los resultados.

El Prof. Mitchell añade a continuación: Desgraciadamente la analogía es imperfecta, a excepción de

algunas circunstancias especiales, debido a que los suelos no tienen el poder de recuperación de las personas si se las abandona a sus propias fuerzas. Asimismo, es importante el que debemos tener claro lo que se puede y lo que no se puede hacer con las técnicas que tenemos actualmente a nuestra disposición.

Sin embargo, y como comentario a lo anterior, pienso que en bastantes circunstancias, por ejemplo en estado confinado, los suelos presentan mayor poder de recuperación de lo que puede parecer a simple vista, lo que posiblemente ha sido sumamente afortunado en el comportamiento de las cimentaciones a lo largo de la historia (\*). Esto acaso explique porqué no se han producido más catástrofes por hundimiento de estructuras de lo que cabría esperar, dada la relativamente escasa atención que se ha prestado en el pasado al estudio de los suelos de cimentación, si bien, en general, las construcciones corrientes solían ser menos rígidas, más articuladas y menos pesadas, que las actuales. El poder de recuperación de los suelos, no excesivamente cargados, se aprecia claramente, por ejemplo, en el proceso de consolidación de los mismos. Según este proceso, al aumentar la carga a la que estos suelos están sometidos, el agua intersticial (que no tiene resistencia al corte) y/o el aire, son desalojados a medida que se deforma el esqueleto sólido del suelo, con lo cual aumenta el empaquetamiento e imbricación de los granos y partículas, y por lo tanto el rozamiento interno, lo que supone un aumento de su resistencia, rigidez y densidad, es decir que, como en tantos otros procesos de la naturaleza, el incremento de las tensiones, hasta cierto punto, estimula el auto-fortalecimiento del sistema. Dicho proceso de consolidación es usualmente muy lento en los suelos arcillosos, muy impermeables, y bastante rápido en los suelos granulares (arena y grava) muy permeables. Por ello, los suelos granulares suelen presentar, en general, una alta resistencia a la rotura por hundimiento (supuesto que no están sometidos a arrastres o socavaciones por corrientes de agua o por el viento), si bien, si son flojos, pueden experimentar asentamientos totales y diferenciales excesivos. Estos pueden provocar agrietamientos de las estructuras, si son demasiado rígidas y no pueden absorber los movimientos de adaptación del suelo a las nuevas condiciones de carga.

Para terminar, comentamos someramente a continuación un problema de mejora del suelo, de especial relevancia por su contexto bíblico, citado de pasada en el Congreso de Nueva Orleans. En el evangelio según San Mateo, se dice:

**«Aquel que escucha mis palabras y las pone por obra será como el varón prudente, que edifica su casa sobre roca. Cayó la lluvia, vinieron los to-**

(\*) Por el contrario la estabilidad de los taludes de las excavaciones disminuye con el tiempo.

**rrentes, soplaron los vientos y dieron sobre la casa, pero no cayó, porque estaba fundada sobre roca. Pero el que me escucha estas palabras y nos las pone por obra, será semejante al necio, que edificó su casa sobre arena. Cayó la lluvia, vinieron los torrentes, soplaron los vientos y dieron sobre la casa y cayó con gran fracaso.»**

Jesús. Sermón de la Montaña.  
Según San Mateo 7:24-27.

En relación con esto, el Dr. Caron comentó en la citada conferencia:

*«Pero el hombre sabio puede actualmente construir su casa también sobre cualquier suelo, si pide los servicios de un inyectorista y consigue economía.»*

Evidentemente, Jesús se refería a la conducta moral del hombre y creemos quería significar que para caminar y crecer espiritualmente, con seguridad en el tiempo, hay que apoyarse sobre bases firmes y estables. Sin embargo, en cuanto al tema constructivo de cimentación, que nos atañe, podemos añadir que en los tiempos y lugares evangélicos, en los que no se conocían, en la construcción corriente, las zapatas enterradas, para distribuir las cargas y disminuir las presiones sobre el suelo a valores admisibles y para proteger la arena inferior de la acción erosiva de los agentes atmosféricos, la recomendación bíblica anterior era sin duda válida.

Sin embargo, si hoy tuviéramos que adoptar una solución de mejora del suelo arenoso para edificar «en el siglo», por ejemplo, una urbanización, o silos de grano, o tanques de petróleo, o carreteras de tráfico pesado, sobre un potente depósito de arena en estado flojo, no adoptaríamos ningún tratamiento de inyección para estos casos, por existir actualmente otros métodos más adecuados y económicos, salvo casos especiales, además de las cimentaciones profundas, como por ejemplo la compactación dinámica profunda. Esta técnica, correctamente ejecutada, mejora las propiedades geotécnicas intrínsecas del propio suelo y permite evitar la erosión del agua y del viento, si se coloca la base de apoyo de la cimentación de las estructuras suficientemente enterrada y se protege de los arrastres la superficie del suelo exterior adyacente.

Históricamente pueden citarse, entre otras figuras estelares relacionadas con la Geotecnia, a las siguientes, además de a Vitruvio (Siglo I a. de J.C.), que en sus libros II y VIII, de su tratado de Arquitectura, se refiere a los suelos, a las cimentaciones y a los muros de contención:

Leonardo da Vinci (1452-1519) y Amontons (1699):  
Leyes del rozamiento.

Stevin (1548-1620):

Principios del equilibrio mecánico; muros y represas. Presión hidrostática.

- Galileo (1638):**  
Inicios de la Física moderna y la Resistencia de Materiales.
- Newton (1642-1727):**  
Ley de la acción y reacción. Gravitación. Fuerza. Cálculo infinitesimal a la vez que leibniz.
- Hooke (1676):**  
Concepto de tensión y deformación unitaria. Ecuación deformación elástica.
- D. Bernoulli (1738):**  
Hidrodinámica.
- Coulomb (1773):**  
Ecuación de resistencia del suelo. Cohesión, rozamiento.
- Darcy (1856):**  
Permeabilidad del suelo. Gradiente hidráulico.
- Rankine (1857):**  
Empuje de tierras.
- Terzaghi (1925):**  
Tensión efectiva, teoría de la Consolidación, presiones intersticiales, fuerzas de filtración.

### **LAS INYECCIONES EN GEOTECNIA**

La técnica de las inyecciones en la Ingeniería Civil data del año 1802, en que Charles Bérigny reparó la base de apoyo de un puente, socavada por el agua, en Dieppe (Francia), mediante la inyección de una lechada de arcilla y cal hidráulica. Sin embargo, las lechadas de cemento no se emplearon en inyecciones hasta 1876, en que se utilizaron para el sellado de grietas en roca. A continuación, este método de «cementación» se extendió, sobre todo en el siglo actual, para la construcción de presas y túneles, así como en minería (bajada de pozos de acceso, sellado de grietas, etc.), principalmente con fines de impermeabilización de formaciones rocosas.

Se ha considerado a las minas, desde un punto de vista hidráulico, como extensos sistemas de drenaje, que a veces requieren un bombeo permanente al exterior, de ahí el interés del sellado, al menos parcial, de las filtraciones de agua, que por otra parte pueden producir arrastres, e incluso socavaciones. Asimismo, en la construcción de cimentaciones profundas o construcciones subterráneas, puede ser perjudicial el achique prolongado de las excavaciones para las estructuras existentes próximas (lo que a veces está prohibido por las ordenanzas locales), dado que el abatimiento del nivel freático en algunos suelos puede originar asentamientos y agrietamientos en los edificios.

Sin embargo, las lechadas de cemento o de arcilla-cemento, no eran adecuadas, en general, debido al tamaño de grano de la suspensión, para inyectar, con fines de impermeabilización o con-

glomeración, depósitos aluviales granulares, tales como arenas o mezclas de grava y arena. Para este fin, el método primeramente utilizado en obra (por ejemplo para la construcción del Metro a través de suelos granulares saturados) fue el de Hugo Joosten, que en 1925 inyectó en suelos granulares gruesos, en dos fases, soluciones acuosas separadas de compuestos químicos susceptibles de reacción entre sí y de endurecer in situ, por lo que a dicho sistema se le denominó de «inyecciones químicas». Primeramente se inyectaba una solución concentrada de silicato sódico y después otra de cloruro cálcico. Sin embargo, este método, que se utilizó durante algo más de 30 años, presentaba los inconvenientes de tener un radio de acción corto (unos 30 cm) y de ser lento. Sin embargo, se obtenía un gel duro, de bastante resistencia.

En la década de 1930 y posteriormente se emplearon en obra, para impermeabilizar depósitos granulares, inyecciones químicas fluidas, inyectadas en una sola fase (Lemaire, François, Rodio, etc.). Con este sistema todos los componentes químicos se disuelven y mezclan previamente, diluidos suficientemente, para disminuir la velocidad de gelificación, de forma que ésta no se produzca hasta que la solución prevista penetre en los poros del terreno. Los reactivos utilizados eran todos inorgánicos y estaban constituidos, en general, por silicato sódico diluido y reactivos tales como ácidos, bicarbonato sódico, aluminato sódico, etc. Estas inyecciones, que eran soluciones coloidales, se emplearon con fines exclusivamente de impermeabilización, dado que los geles obtenidos eran blandos.

La primera inyección química de impermeabilización utilizada, a base de reactivos orgánicos, a muy baja viscosidad, fue el producto AM-9, que se empleó por primera vez en 1953. El producto base es la acrilamida, que es muy soluble en agua, más un agente reticular, siendo el catalizador el persulfato amónico. Este gel es algo elástico y prácticamente impermeable y permanente en ambiente húmedo; asimismo, el producto permite trabajar con tiempos de gelificación, incluso menores de 1 minuto, en condiciones bastante controlables.

Los primeros geles duros o estructurales, obtenidos mediante inyecciones químicas en una sola fase, fueron desarrollados principalmente por el Dr. Caron en Francia, que en el año 1957 empleó total o parcialmente reactivos orgánicos. Así, utilizando el acetato de etilo como reactivo frente al silicato sódico, consiguió aumentar la concentración de este producto, dado que el tiempo de gelificación depende de una reacción previa de saponificación, que permite controlar la velocidad de reacción. De esta forma se consiguió obtener geles duros y relativamente impermeables. Sin embargo, debido a la poca solubilidad del acetato de etilo, este producto se separa fácilmente de la solución, por lo que la reacción no es fácil de con-

trolar, lo que se ha tratado de evitar con la adición de agentes tensioactivos. Asimismo, el Doctor Caron ha desarrollado inyecciones químicas, de baja viscosidad, a base de fenoplastos (resorcina-formaldehído, con catalizador ácido), capaces de dar geles muy duros, aunque son notablemente más caros que los geles estructurales de base silicato.

Otro gel duro de base silicato fue el obtenido por Peeler en Norte América, en 1961, utilizando como reactivo la formamida, que se hidroliza lentamente en una solución de silicato sódico, produciendo finalmente un gel de ácido silícico y desprendiendo amoníaco. Ahora bien, dado que esta reacción es muy lenta, para acelerar el tiempo de gelificación se añadía una solución de cloruro cálcico. Sin embargo, esta sal inorgánica, que reacciona muy rápidamente con el silicato sódico, origina frecuentemente flóculos que dificultan el control y la propia inyección.

En 1967, el autor de este trabajo, puso a punto en Milán, en unas pruebas a escala real a nivel internacional, previas a la construcción de la línea II del Metro de dicha ciudad, un tercer sistema (denominado G-3), para la obtención de geles duros de base silicato. Este sistema integra las características mejores del sistema de Caron y del de Peeler. La idea fue utilizar como reactivo una mezcla de formamida y de acetato de etilo. Dado que la formamida es totalmente soluble en agua y que el acetato de etilo es muy soluble en formamida, se pueden conseguir proporciones del reactivo formamida-acetato de etilo estables en la solución de silicato sódico. Por otra parte, como la reacción de hidrólisis de la formamida es lenta y la saponificación del acetato de etilo es bastante rápida en presencia de silicato sódico, se pueden adoptar las proporciones más convenientes para obtener un sistema estable en fase líquida, con un tiempo de gelificación controlable. Asimismo, permite añadir suficiente reactivo para que reaccione todo el silicato sódico y se obtenga un gel estable. El G-3 ha sido ampliamente ensayado en los últimos años en la universidad de Northwestern (Chicago), determinándose sus propiedades y limitaciones y ha sido utilizado en varias obras del Metro en Europa y Estados Unidos (\*).

Asimismo, en el año 1970, puso a punto y utilizó por vez primera en obra un gel expansivo, económico, semiduro, ligero, de base silicato, cuyos reactivos son totalmente solubles en agua. El reactivo está constituido por una mezcla de formol y de agua oxigenada, siendo la reacción de oxidación de formol a ácido fórmico la que con-

trola el proceso de gelificación del gel de ácido silícico. A su vez, como la reacción es exotérmica, se autoacelera el desprendimiento de oxígeno gaseoso, que es atrapado por el gel en formación, el cual hincha hasta un volumen del orden del 100 %.

Por otra parte, hasta donde alcanza su información, colaboró en la puesta a punto, por primera vez, para este tipo de geles duros, del método continuo de auto-dosificación e inyección, en grandes volúmenes, para el Metro de Barcelona (estación Plaza Universidad). En dicha obra se utilizó una bomba de pistón de doble efecto, capaz de aspirar las soluciones de dos depósitos, de forma que a la vez que bombeaba a los taladros, dosificaba los volúmenes de las dos soluciones, según una relación determinada. Las dos soluciones se mezclan en la conducción, poco antes de llegar al taladro, lo que permite utilizar tiempos de gelificación más cortos que con el método discontinuo, lo que facilita el control del producto en el terreno, al dificultar que se pueda extender demasiado lejos.

En este sentido, es de mencionar el elevado nivel que han alcanzado actualmente los japoneses en la tecnología de las inyecciones geotécnicas. Así, en el citado congreso de Nueva Orleans (1982), los japoneses presentaron 49 comunicaciones, siendo con mucho la mayor representación, después de los anfitriones. Son de mencionar sus avances en relación con las inyecciones mediante «chorro» y también por inyección de las dos soluciones reaccionantes «inorgánicas» directamente en el terreno por tubos concéntricos, con tiempos de gelificación de 2 a 3 segundos, así como en el empleo de soluciones coloidales de sílice, no alcalinas (\*), o en la inyección de resinas de poliuretano, que reaccionan in situ con el agua del terreno.

Según el Dr. Caron las inyecciones penetran en el subsuelo de las tres formas siguientes:

Por impregnación o percolación, por fracturación y por fracturación-impregnación.

A estas tres formas se pueden añadir las dos siguientes:

- ★ Por compactación o desplazamiento interno del suelo.
- ★ Por chorro perforante e inyección.

El método de inyección por impregnación o percolación, es el típico de las inyecciones químicas, constituidas por soluciones líquidas, cuya penetrabilidad está determinada fundamentalmente por su viscosidad, la cual debe adaptarse al tamaño de los poros, es decir, a la permeabilidad del suelo.

(\*) Con este método no queda nada de silicato sódico sin reaccionar; el pH es prácticamente neutro, y la viscosidad baja, obteniéndose un gel duro.

(\*) Nuevas inyecciones químicas estructurales de base silicato en la Ingeniería Geotécnica; por Alvaro López Ruiz. Informes de la Construcción, n.º 341, junio 1982, IETcc.

Las inyecciones químicas en la Ingeniería Geotécnica, según el Congreso ASCE de Nueva Orleans (1982); por Alvaro López Ruiz. Química e Industria, febrero 1983.

A menor permeabilidad se requiere menor viscosidad de la inyección.

En las inyecciones por fracturación del suelo se utilizan generalmente lechadas de cemento, o de arcilla-cemento y se usan sólo en casos excepcionales, por ejemplo para levantar y nivelar un edificio o para crear un fondo impermeable en el suelo, etc. Estas lechadas, o suspensiones no son utilizadas, en general, para la inyección de suelos granulares con permeabilidades menores de  $10^{-1}$  cm/sg, dado que, en estos casos el cemento es filtrado y no penetra.

Sin embargo, se pueden inyectar a presión bastantes suelos arcillosos fisurados, con lechadas, dado que la abertura de las fisuras permite la penetración de la lechada. Si la permeabilidad es menor de  $5 \times 10^{-5}$  cm/sg se deben emplear inyecciones químicas en vez de lechadas.

La inyección de soluciones de base silicato por fracturación-impregnación supone la formación de fracturas discoidales por efecto de la presión, por las que luego penetra la inyección por impregnación. Este método de inyección puede ser útil para la impermeabilización del suelo, pero no para aumentar su resistencia estructural, ya que las fracturas rellenas de gel constituyen planos débiles para el deslizamiento.

Como se ha indicado, a los métodos anteriores se pueden añadir las inyecciones de compactación o desplazamiento, de utilización en recalces, y que se han empleado recientemente para evitar asentamientos y subsidencias en la excavación de túneles para el metro en suelos granulares bajo agua (Baltimore, Boston) (\*). Asimismo, se pueden añadir las «inyecciones por chorro», que permiten emplear lechadas y en las que se utiliza el mismo equipo para la perforación (con chorro vertical) que para la inyección, mediante chorro horizontal, el cual gira despacio radialmente, dentro del suelo. Para la perforación se emplea un chorro fino de agua a una presión de 400 atmósferas y otro chorro de aire a 7 atmósferas que le envuelve. El suelo excavado se va rellenando con lechada de cemento.

### Principales aplicaciones de las inyecciones

Las principales aplicaciones de las inyecciones geotécnicas incluyen las siguientes:

- 1.—Estabilización de suelos incoherentes en la excavación de túneles y galerías, incluso bajo nivel freático.
- 2.—Ejecución y sellado de pozos de acceso a túneles y galerías.

(\*) *Las inyecciones de compactación según el Congreso ASCE de Nueva Orleans (1982). Alvaro López Ruiz. Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones. Enero-febrero (1983).*

- 3.—Rellenado y sellado tras los hastiales y bóvedas de túneles.
- 4.—Control de los movimientos del suelo en la construcción de túneles.
- 5.—Minería.
- 6.—Levantamiento y nivelación de estructuras pesadas.
- 7.—Recalces.
- 8.—Sellado de pilotes de gran diámetro, antes de su hormigonado en seco.
- 9.—Relleno de oquedades y cuevas Kársticas.
- 10.—En cimentaciones y sellado de sótanos y pantallas de impermeabilización y estructurales.

En Gran Canaria podemos citar dos aplicaciones de las inyecciones químicas, llevadas a cabo recientemente, con buen resultado y que son las siguientes:

- a) Sellado de la solera de hormigón de un gran sótano, bajo nivel freático, en el «Edificio de Servicios Múltiples» de Las Palmas, a través de la cual pasaba agua en exceso, por lo que se había inundado el sótano. La impermeabilización se realizó con resinas de base acrilamida, con viscosidad próxima a la del agua y doble circuito de bombeo y empleando tiempos de gelificación de 1 minuto o inferiores. El gel obtenido es prácticamente impermeable y permanente en condiciones húmedas.
- b) Sellado mediante inyección de las citadas resinas de base acrilamida, del flujo ascensional del agua del mar, por succión capilar, en los muros del Castillo de la Luz en el puerto de Las Palmas. Este proceso de succión capilar había provocado abundantes humedades y desconchamientos en los paramentos interiores del Castillo.

### COMPACTACION DINAMICA PROFUNDA

La densificación del suelo en profundidad, mediante impactos de gran intensidad en superficie, constituye una tecnología de demostrada utilidad, con los medios mecánicos de que se dispone actualmente para la mejora económica, en numerosas ocasiones, de las características geotécnicas de numerosos tipos de suelos flojos, principalmente granulares, y también de suelos de grano fino (limosos y arcillosos) no saturados, de baja y media plasticidad (\*).

(\*) *Simposio: Ground treatment by deep compaction. The Institution of Civil Engineers. London 1976.*

Si bien este procedimiento de mejora del terreno se ha utilizado desde hace más de 20 años, por ejemplo en Alemania y Dinamarca, y en la URSS para compactación de loess, y en Africa del Sur (1955) para compactar en profundidad rellenos hidráulicos flojos, el método experimentó un gran avance, a partir del año 1970, con Louis Menard, en Francia. Actualmente el método se está utilizando en más de 20 naciones.

El procedimiento supone el impacto sistemático del terreno, mediante la caída de grandes pesos, de 5 a más de 20 t, según una retícula prefijada. En terrenos granulares flojos, de gran espesor, la densificación por impacto ha demostrado ser una alternativa económica a la precarga, al pilotaje, a la compactación profunda mediante vibración y al desmonte y posterior reposición y compactación en capas del terreno.

El efecto de impacto de la maza sobre la superficie del suelo es propagar tensiones dinámicas mediante ondas de compresión y de corte en las capas del subsuelo. Estas cargas rápidas cíclicas provocan, en los suelos saturados, un aumento de las presiones intersticiales y su licuefacción, así como la formación de fisuras internas, que constituyen una red de drenaje y aumentan temporalmente su permeabilidad. Dichas presiones se disipan rápidamente mediante drenaje, en los suelos arenosos, y más lentamente en los suelos arcillosos, lo que origina su consolidación. En los suelos arcillosos, poco mermeables, se puede acelerar el proceso de consolidación mediante drenes verticales (\*). Como resultado de la compactación dinámica, el suelo adquiere un menor índice de huecos y disminuye su humedad, adquiriendo un carácter sobreconsolidado. Esto produce un aumento de la resistencia del terreno y de su rigidez, lo que supone disminuir los asentos.

Las propiedades geotécnicas fundamentales de los suelos arenosos y, en general, de todos los suelos granulares incoherentes, cuales son su resistencia al corte, su deformabilidad bajo carga y su permeabilidad, dependen principalmente de su compacidad o grado de empaquetamiento, influyendo también la granulometría y la forma de los granos, que determinan su ángulo de rozamiento interno. Por otra parte, los suelos arenosos incoherentes, en general, son bastante o muy permeables.

Como se ha indicado, la resistencia intrínseca al corte de los suelos granulares viene determinada fundamentalmente por su ángulo de rozamiento interno, que es función principalmente de su densidad relativa. Asimismo, el módulo de deformación y el módulo de balastro de estos suelos dependen también de su densidad relativa, así como

(\*) Es sabido que, en general, la permeabilidad horizontal de las arcillas es bastante superior a la permeabilidad vertical.

su susceptibilidad frente a los movimientos sísmicos o a las vibraciones, especialmente en el caso de suelos saturados (densidad crítica, licuefacción) (\*). La licuefacción temporal del subsuelo, provocada por las vibraciones, le permite adquirir un estado más denso.

Es de destacar que tanto la resistencia a la rotura por corte, como la rigidez de los suelos granulares, aumenta rápidamente al acrecentar su compacidad, a la vez que disminuye su compresibilidad lo que en arenas se puede determinar, por ejemplo, mediante ensayos de resistencia a la penetración SPT.

En la tabla n.º 2 figuran algunas características medias de suelos arenosos típicos, en función de su compacidad, medida por su densidad relativa y por la resistencia a la penetración SPT. Este ensayo tiene gran interés en arenas, pero no en suelos con abundantes gravas y bolos, que perturban el ensayo.

**TABLA N.º 2**  
**Densidad relativa de suelos granulares**  
**(Foundation Design. Wayne C. Teng, 1962)**

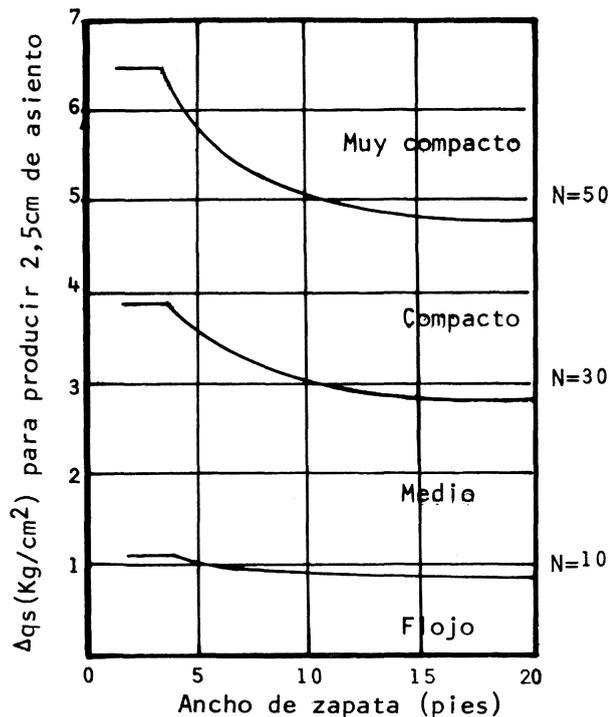
	Muy floja	Floja	Media	Compac.	Muy Compac.
Densidad relativa					
Dr. ....	0	15%	35%	65%	85% 100%
Ensayo normal de penetración «N» (1) .....	0	4	10	30	50
Angulo de rozamiento interno, $\phi$ (grados) .....		28°	30°	36°	41°
Peso unitario húmedo .....	1,60	1,52-2,00	1,70-2,10	1,75-2,25	>2,10

(1) Golpes por 30 cm de hincia en el ensayo de penetración SPT.

Asimismo, en las curvas de la Fig. N.º 2 debidas a Terzaghi y a Peck, se puede observar cómo aumentan rápidamente las cargas unitarias medias permisibles de las zapatas apoyadas sobre suelos arenosos, para obtener un asiento de 2,5 cm, al aumentar la densidad relativa de la arena. Esto equivale a decir que para la misma carga unitaria y las mismas dimensiones de zapata, los asentos disminuyen aceleradamente al aumentar la densidad relativa del suelo granular.

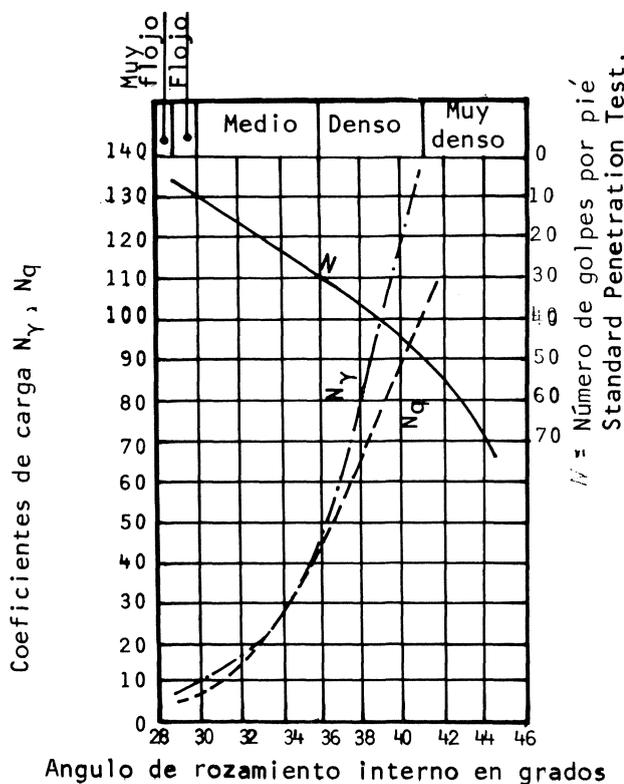
En la figura N.º 3 aparecen las curvas de Peck, Hansen y Thornburn (1953), de las que se deduce el ángulo de rozamiento interno y los factores de carga  $N_y$  y  $N_q$ , para el cálculo de la resistencia del suelo, en arenas, en función de la densidad relativa (de floja a muy compacta) y del valor N

(\*) Dynamic loadings, by E. D'Appolonia. Placement and improvement of soil to support structures. ASCE. Cambridge, Mass. 1968.



Carga unitaria en función del valor N (SPT), para producir un asiento de 2,5 cm en arenas, para distintos anchos de zapatas (Terzaghi y Peck, 1948)

Fig. 2



Factores de capacidad de carga y ángulo de rozamiento interno en función de la resistencia a la penetración SPT, en arenas.

(Peck, Hansen y Thornburh, 1953).

Fig. 3

obtenido en el ensayo de penetración SPT. En estas curvas puede observarse también el importante aumento de los factores de carga, es decir, de la resistencia del suelo granular, al aumentar la densidad relativa del suelo.

La compactación dinámica se ha aplicado principalmente para consolidar suelos arenosos y rellenos granulares, aunque se han conseguido también buenos resultados con arcillas limosas blandas y depósitos limosos, especialmente si no están saturados. Esta técnica no requiere equipo muy especial, pudiéndose utilizar grúas normales de capacidad suficiente y operadores locales, bajo la dirección de ingenieros experimentados. Lo esencial es determinar las características geotécnicas del suelo para proyectar los parámetros de la compactación dinámica y para el control del procedimiento. Asimismo, los puntos de impacto deben estar suficientemente alejados de las edificaciones próximas, o de tuberías, en general, a más de unos 15 m a 20 m, si bien esto depende de la energía del impacto y del tipo de las edificaciones y cimentaciones (\*). En todo caso el efecto de las vibraciones se puede disminuir excavando una zanja de separación, de profundidad suficiente.

Basados en dichos estudios y en un programa de control de ensayos de campo, se determina la retícula de impacto, con un espaciado óptimo, altura de caída, peso de la maza, y número de pases. El espaciado puede variar entre 2 y 12 m. En cada punto de la retícula se deja caer una maza de 5 a más de 20 t, cierto número de veces, en general de 5 a 10 golpes, desde una altura, en general, de 10 a 20 m, constituyendo la energía de impacto un parámetro fundamental. Esta, en general, suele variar entre 100 y 500 t.m. Debido al impacto se forma un cráter en la superficie, cuyas dimensiones se miden periódicamente para tener una idea de la mejora del suelo. Asimismo, se observa el comportamiento del suelo periférico a los cráteres, especialmente su posible levantamiento. Se comprueba la efectividad del método, según la importancia y características de la obra, mediante ensayos de penetración dinámica SPT, ensayos de penetración estática, ensayos presiométricos o incluso ensayos sísmicos. En ocasiones, un ensayo interesante puede consistir en ejecutar pruebas de carga estáticas y dinámicas, con la propia maza.

Frecuentemente es conveniente colocar una capa de zahorra o de arena, de unos 40 cm o más de espesor, que sirve de plataforma de trabajo y en ocasiones para reemplazar la bajada del terreno. En todo caso, la cobertura de terreno sobre el nivel freático debe ser como mínimo de 2 m.

La subsidencia general de los rellenos arenosos sometidos a compactación dinámica profunda es

(\*) Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE) Jan. 1980. Dynamic compaction of Granular soils. By Gerald A. Leonardo et al.

frecuentemente superior a 50 cm, pudiendo incluso ser mayor de 75 cm, dependiendo de sus características, de la compacidad inicial del material a compactar, así como de su espesor. Así, son frecuentes bajadas generales del terreno, del orden del 7 % al 10 % del espesor del relleno.

Según las características del terreno y la mejora que se desee, se suelen dar varias pasadas de compactación dinámica. Finalmente se rellenan los cráteres y se compacta la superficie con métodos convencionales. En el caso de zapatas, la compactación y planchado final se pueden realizar con la propia maza.

Con el método que nos ocupa, la capacidad portante del terreno suele incrementarse de 2 a 3 veces, e incluso más en suelos granulares muy flojos.

En el caso de edificaciones corrientes, naves industriales, etc., el método permite, no sólo mejorar la capacidad portante del suelo, por ejemplo, para el apoyo de zapatas, sino también mejorar las características del suelo de apoyo de las soleas. Asimismo, al someter a impacto sistemático a toda el área sobre la que se va a construir, se tiene un excelente método para detectar blandones puntuales, oquedades, etc., que pudieran no haberse detectado en el reconocimiento previo del subsuelo.

La influencia de la compactación dinámica alcanza, según las características del suelo, a profundidades del orden de:

$$H = 0,5 \text{ a } 0,7 \sqrt{P \cdot H}$$

donde:

H = Profundidad influenciada por la compactación dinámica, en m.

P = Peso de la maza en t.

H = Altura de caída de la maza, m.

El coeficiente mayor 0,7 suele darse en suelos granulares, como gravas y arenas, mientras que el coeficiente menor 0,5 suele darse en suelos de grano muy fino, arcillosos, y en los de grano muy grueso, como bloques o escollera, en los que buena parte de la energía se pierde en la rotura de los bloques. En loess dicho valor fue de 0,6.

El efecto de la compactación dinámica disminuye con la profundidad, hasta llegar a ser nulo a partir de la profundidad indicada en la ecuación anterior. Sin embargo, algo semejante sucede con las tensiones inducidas por las cimentaciones y las sobrecargas. Así, por ejemplo, en una zapata aislada las tensiones inducidas por una carga vertical suelen ser muy reducidas, a partir de una profundidad del orden del doble del ancho de la zapata.

### Primeras obras de compactación dinámica en España

La primera obra de compactación dinámica en profundidad, realizada en España, se llevó a cabo en el año 1980, en Matagorda (Cádiz), para la empresa General Motors, y fue recomendada por SOILTESA, en el estudio geotécnico previo del subsuelo. Se trataba de estabilizar un potente depósito de suelo arenoso flojo, de unos 7 a 9 m de potencia, situado en su mayor parte, bajo nivel freático. El firme para pilotes se iniciaba de los 18 a 20 m. El resultado obtenido ha sido considerado muy satisfactorio y la empresa que ha ejecutado los trabajos va a presentar los resultados en el próximo congreso «improvement of Ground»; Helsinki, 1983, que se celebrará en mayo; Eight European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

En las Canarias, en las que SOILTESA lleva trabajando más de 10 años y en las que ha realizado más de 100 estudios geotécnicos, la primera obra de este tipo se realizó en el verano de 1981, en San Fernando —San Bartolomé de Tirajana (Gran Canaria)—, para la construcción de un Centro de Educación General Básica, del Ministerio de Educación y Ciencia, siendo el arquitecto director don José Luis Jiménez Saavedra. El solar era una vaguada profunda, que había sido rellenada en el pasado mediante vertido de materiales constituidos, en general, por suelos granulares gruesos (bolos-grava-arena), procedentes de la excavación de zonas próximas. El espesor del relleno vertido varió en el solar entre aproximadamente 5 y 10 m. El suelo natural de apoyo del relleno estaba constituido por un aglomerado compacto, de grava arenosa arcillosa. No se detectó la presencia de agua freática o colgada ni en el relleno ni en el suelo natural.

Debido a la topografía inclinada del solar se le dividió en tres terrazas, para la compactación dinámica.

La curva granulométrica media del relleno dio: que más del 60 % estaba constituido por grava y bolos y el resto era fundamentalmente arenoso con algo de limo y muy poca arcilla (véase la banda granulométrica adjunta en la Fig. n.º 4).

Para la ejecución de la compactación dinámica, que se realizó en dos fases, se empleó una maza de 10 t de peso y una altura de caída de 12 a 13 m, obteniéndose cráteres de unos 2 m de diámetro y profundidades del cráter del orden de 90 a 130 cm. La energía media de compactación aplicada en la primera fase fue de 175 t.m/m<sup>2</sup> referida a la superficie del solar de 4.500 m<sup>2</sup>, y del orden de 250 t.m/m<sup>2</sup> en la segunda fase, en el área de zapatas. La bajada general del terreno fue de 50 a 65 cm, si bien en la zona de zapatas fue mayor debido a la recompactación, hasta conseguir el

**AGLOMERADO ALUVIONAL Y VOLCANICO**  
Banda granulométrica típica  
**GRAN CANARIA**

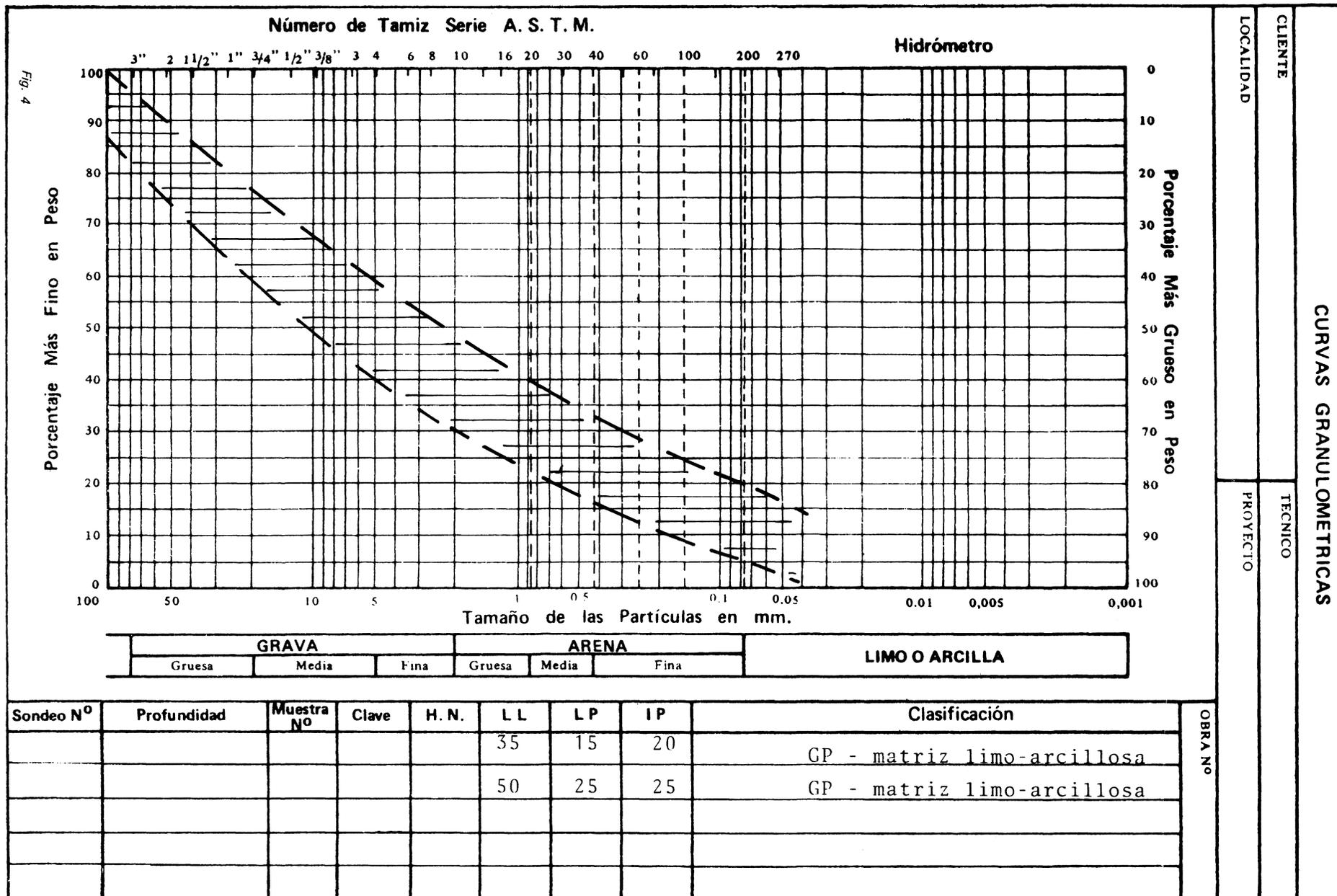


Fig. 4

<b>CLIENTE</b>		<b>CURVAS GRANULOMETRICAS</b>
<b>LOCALIDAD</b>	<b>PROYECTO</b>	
<b>TECNICO</b>		<b>OBRA N°</b>
<b>PROYECTO</b>		

rechazo especificado, que fue de menos de 5 cm de penetración de la maza en el último golpe.

Los trabajos se inspeccionaron continuamente, midiéndose las penetraciones de la maza en cada punto, así como la subsidencia general del terreno. Finalmente se realizaron ensayos de placa de carga en el fondo de excavaciones al efecto, hasta una carga unitaria media máxima del doble de la recomendada para el proyecto de las zapatas, que fue de 1,75 kg/cm<sup>2</sup>.

Las estructuras de las escuelas se han terminado hace más de 1 año, no habiéndose observado grietas ni fisuras en paramentos, enfoscados o forjados.

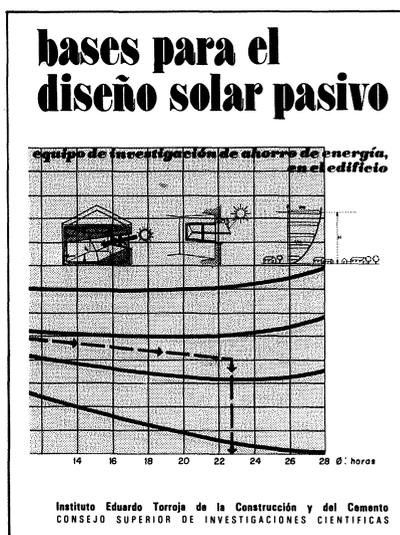
Posteriormente se han ejecutado otras dos obras de estabilización de rellenos vertidos, mediante compactación dinámica, en el Sur de Gran Canaria, también con buen resultado. Es de señalar que en una de las obras, para la construcción de un mercado, en una pequeña zona, la maza se hundió hasta algo más de 2 m, cuando normalmente no pasaba de 1 m. Esto permitió detectar la presencia de un blandón encubierto, debido a un pozo negro, cuya existencia se desconocía.

En este sentido, es decir, para la detección de zonas flojas del subsuelo, el análisis de la forma y profundidad de los cráteres de impacto puede ser de gran utilidad. Así, se ha observado esto claramente en unos ensayos a escala real, de compactación dinámica, realizados por nosotros, en la Actuación Urbanística de Tres Cantos (Madrid), con maza de 10 t y 14 m de caída, y donde se había ejecutado una gran obra de excavación y relleno, parcialmente compactado, incluso de más de 14 m de espesor. En el punto de impacto correspondiente a una zona rellenada, la maza penetró en el relleno arenoso unos 90 cm, al cabo de 10 golpes. Sin embargo, en un punto correspondiente al mismo tipo de suelo, pero en su estado natural y que visualmente no se diferenciaba del anterior, la maza penetró menos de 15 cm en las mismas condiciones de golpeo. En los alrededores de Las Palmas hemos podido ver algunos barrancos rellenos parcialmente, con materiales muy idóneos para este tratamiento.

Para terminar me complace comunicarles que pienso asistir al Congreso europeo sobre Mejora del Suelo «Improvement of Ground», que se celebrará en mayo de este año en HELSINKI, y del que, si procede, con mucho gusto, me gustaría informarles, con el objeto de tenerles al día sobre las nuevas tecnologías de mejora del suelo.

\* \* \*

## publicación del I.E.T.C.C.



Equipo de Ahorro de Energía en el edificio

Dirección y coordinación:  
Arturo García Arroyo

M.<sup>a</sup> José Escorihuela  
José Luis Esteban  
José Miguel Frutos  
Manuel Olaya  
Bernardo Torroja

selectividad en la aplicación de los sistemas y procedimientos pasivos dando origen a un ecumenismo arquitectónico solar, al margen de las condiciones climáticas y funcionales específicas de cada caso y lugar.

En este libro, utilizando criterios y metodología pedagógicos, se dan los fundamentos e instrumentos teórico-prácticos necesarios para el planteamiento de todo proyecto arquitectónico solar pasivo, de acuerdo con los principios éticos y económicos de conservación y ahorro de energía. Es decir: respeto de los presupuestos bioclimáticos, búsqueda de la máxima captación y acumulación de la radiación solar, y esmero en el aislamiento térmico de los cerramientos.

Un volumen encuadernado en cartulina ibiza plastificada, a cinco colores, de 16 x 23 cm, compuesto de 216 páginas, 217 figuras, 87 gráficos, 19 tablas y 10 cuadros.

Madrid, 1983. Precios: España 2.100 ptas.; 30 \$ USA.

Las dificultades de suministro y el alto coste de los productos energéticos convencionales han despertado la atención de los usuarios, técnicos e industriales de la edificación hacia los procedimientos y sistemas en que se basa el aprovechamiento de otras fuentes alternativas de energía, principalmente la solar. Esto ha generado un rápido desarrollo industrial y comercial que, en opinión de los autores de este libro, arrastran los siguientes defectos: un mimético tecnologismo respecto de los sistemas convencionales que violenta las peculiaridades de la energía solar (baja densidad y variabilidad en el tiempo), y una escasa