JORNADA 40º ANIVERSARIO ASOCIACIÓN AETESS
MADRID JUNIO 2017

"ALGUNAS CONSIDERACIONES HISTÓRICAS EN TORNO A LA ACTUAL GEOTECNIA ESPAÑOLA"

DICIEMBRE, 2016

CARLOS OTEO MAZO
Prof. Dr. Ing. de C. C. y P.
Catedrático de Ing. del Terreno

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. EL DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES GEOTÉCNICAS: PILOTAJES

3. LAS PANTALLAS CONTINUAS Y DISCONTINUAS

4. LOS TRATAMIENTOS DEL TERRENO

4.1. Inyecciones

4.2. Vibroflotación y columnas de grava

4.3. Otras técnicas de mejora

5. ACONTECIMIENTOS GEOTÉCNICOS SINGULARES

6. DOCENTES E INVESTIGADORES

7. RECAPITULACIÓN

8. AGRADECIMIENTOS

9. REFERENCIAS

1. INTRODUCCIÓN

En 1977 se crea la Asociación de empresas dedicadas a labores geotécnicas AETESS, como continuación de la asociación de profesionales que constituyeron ADITES.

Es decir, han pasado cuarenta años desde que una serie de empresas (Pilson, Franki, Icos, Geocisa, Cimyson, Eurinsa, Pilotes Posada, Terratest, Rodio, Kronsa, Hiceosa, Sypsa, Egesa-Bauer, Prepakt Ibérica y Site) constituyeron una asociación patronal de empresas dedicadas a las actividades relacionadas técnicamente con el suelo y el subsuelo.

En estos años, el protagonismo geotécnico – en el sentido de realización de obras en el campo – lo han tenido estas empresas (alguna, desgraciadamente, desaparecida en las batallas de las crisis económicas), más alguna empresa que no ha pertenecido a este grupo.

Pero ese protagonismo ha venido originado y unido a todo un proceso de desarrollo de las actividades geotécnicas en España, en que la Mecánica del Suelo, la Mecánica de Rocas, la Ingeniería Geotécnica y la Ingeniería Geológica han ido tomando forma, cuerpo y doctrina, aprovechando el impulso internacional y el desarrollo concreto español de este periodo de los últimos 40 años.

En la Fig. 1 (OTEO, 2007) se muestra, de forma simplificada, la evolución temporal de la actividad geotécnica en las carreteras españolas, figura elaborada para el libro que conmemoró el centenario de la Asociación Mundial de la Carretera, en su capítulo español.

En esa figura aparece, como primer hito claramente geotécnico, la publicación del libro "Erdbaumechanik" ("Mecánica de tierras") de Karl Terzaghi, hacia 1926, que sentó las bases de las teorías físico-matemáticas de la actual Mecánica del Suelo y su hija, la Ingeniería Geotécnica o Ingeniería del Terreno (en su versión más aplicada a obras reales). En la década siguiente, la Clasificación de Suelos de Casagrande abre ya un importante panorama de aplicación de estas técnicas a la construcción de terraplenes. En

principio esta clasificación iba dirigida a la construcción rápida de aeropuertos militares (en pista de tierra), por si se producía un incidente bélico en zonas como las del Pacífico (que, después, se produjo).

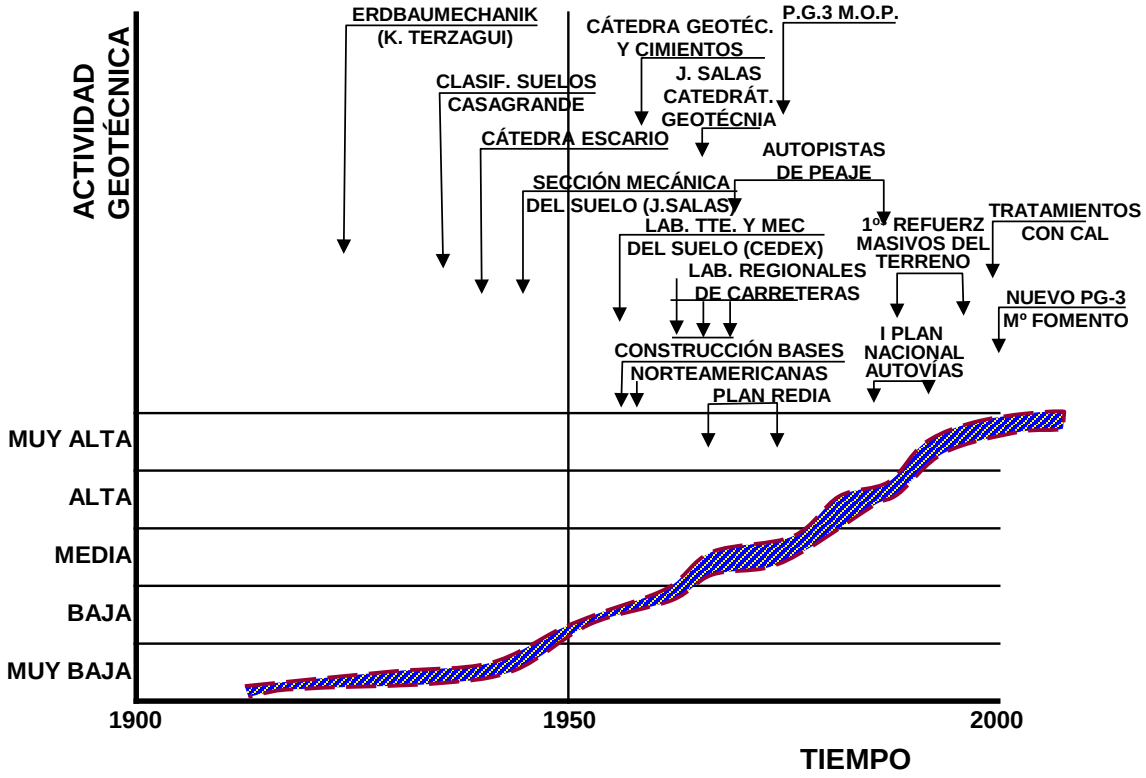

Fig. 1. Evolución temporal de la Actividad Geotécnica en las carreteras españolas (OTEO, 2007)

Pasado 1950 D. José Luis Escario ocupa la Cátedra de Caminos de la Escuela de Caminos de Madrid y funda el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, con Jiménez Salas al frente de la Sección de Mecánica del Suelo, que va desarrollando (con los medios materiales que brindó la ayuda norteamericana) todo tipo de ensayos geotécnicos de laboratorio y campo.

Al mismo tiempo, D. José Entrecanales ya venía impartiendo clases de "Geotecnia, Cimientos y Puentes de fábrica", con aquellos gruesos apuntes donde se reproducían toda clase de ingeniosas construcciones gráficas para calcular los esfuerzos sobre muros, taludes, etc.

Pero es, a juicio del autor de estas páginas, la aparición del Profesor Jiménez Salas en la Escuela de Caminos, para impartir la asignatura de Geotecnia y Cimientos en el Plan de Estudios de 1957, cuando se sientan bien las bases (los "cimientos") de la enseñanza y de la aplicación teórico-geotecnia a los problemas reales. Poco tiempo después, Jiménez Salas pasa a ser el Director del "Laboratorio del Transporte" y alcanza la Cátedra (primer catedrático por oposición en la mencionada escuela), con lo que su influencia pasa a ser notoria y clara, por lo que no es extraño que llegue a ser Presidente de la Sociedad de Mecánica del Suelo y de la recién creada de Mecánica de Rocas.

Se inicia, así, la "Escuela Jiménez Salas", con un grupo de nombres muy conocidos como Santiago Uriel†, Ventura Escario, José Luis de Justo, Alcibiades Serrano, Ángel Uriel†, César Sagaseta, José Mª Rodríguez Ortiz, Antonio Soriano, el que suscribe y tantos otros nombres. Pero al mismo tiempo, la industria privada siente la necesidad de que existan empresas especializadas (las que constituyen AETESS, y de empresas de ingeniería y consultores (Miguel Ángel Rodríguez Miranda, Pedro Ramírez de Oyanguren, Pascual Fariña†, Manuel Romana, Fernando Román, Luis Casero, Samuel Estefanía, Pedro Sola y otros muchos), que hicieron posible un amplio desarrollo de la Geotecnia española, trabajando y enseñando a los actuales geotécnicos. Precisamente en la construcción de las autopistas de peaje en 1965 (como la A-7 y la Bilbao-Behobia) cuando varios de estos consultores aplican la Geotecnia a los temas de terraplenes y estabilidad de taludes, impulsando enormemente los estudios y diseños geotécnicos.

Entre las empresas especializadas, destacan en esa época y en los 20 años posteriores nombres como Francisco Zapata†, Mario Coll†, José María Sanz Saracho†, Mario López†, Luis Fernández Renau†, Arturo Canalda†, Enrique Romero†, Tomasso Virdia, Julián Núñez, José Luis Royo, José Mª García Zaldueguí†, Carlos Delgado, José Mª Herrador, Fernando Muzás, Isidro Maza, Guissppe Lucca y otros muchos.

2. EL DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES GEOTÉCNICAS: PILOTAJES

Evidentemente, toda actividad geotécnica real se basa en adecuadas labores de reconocimiento o investigación del estado del terreno, fase durante la que se trata de establecer:

- Los condicionantes geológicos de la zona a estudiar.
- La estratigrafía de detalle.
- Las condiciones hidrogeológicas, Nivel freático únicos o colgados, etc.
- Los parámetros geotécnicos representativos del comportamiento de cada estrato: De estado de resistencia, de deformación, evolutivos, etc.
- Los problemas especiales que pueden presentarse: Expansividad, colapsabilidad, erosión, etc.

Para ello se han utilizado los sondeos mecánicos, los ensayos de penetración continua, ensayos de campo (placas de carga, presiómetros, etc.), complementados por los reconocimientos geofísicos, que tanto avance han experimentado durante los últimos quince años.

Las empresas de AETESS, en sus primeras etapas se ocuparon de esta labor y hasta, en algunos casos, llegaron a tener laboratorios de ensayo. Hoy día estas actividades han sido abandonadas por dichas empresas (salvo alguna excepción) y han pasado a manos de empresas más pequeñas, dedicadas a la consultoría, a la Asistencia Técnica y al control de calidad. Por ese motivo no prestaremos atención especial en las líneas que siguen. No por no tener importancia, sino por la limitación de espacio y tiempo disponibles.

Por eso, nos vamos a referir a las actividades más típicas de las empresas de AETESS. Y entre ellas destaca la ejecución de inyecciones y cimentaciones profundas, con grandes máquinas, lo que parece que es propio de una empresa de este tipo, aunque no siempre es así.

Podemos distinguir dos tipos de cimentaciones profundas:

- Los pilotes hormigonados "in situ".
- Los pilotes prefabricados e hincados.

La realización de los pilotes "in situ" comienza con la ayuda de cabrías, es decir con un sistema de cuchara suspendida de un cable, guiado por una polea que pende de una grúa sencilla o de un trípode, formado por tres elementos de madera. Este procedimiento, (y utilizado para hacer "sondeos", siglos antes) utilizado desde principios de siglo, como mínimo (realmente es mucho más antiguo, Fig. 2), permitía perforar terrenos no muy duros, con ayuda del peso de la cuchara excavadora.

En la Fig. 3 hemos presentado un resumen cronológico de la utilización de diferentes tipos de maquinaria en España. Lo mismo que otros gráficos temporales, la visión de esta u otras figuras es la de su autor, por lo que puede estar sujeta a dos tipos de errores:

a) Cronológico (errores de fecha exacta).
b) Conceptuales, al olvidar algún caso más singular o una maquinaria más especial.

Con estas reservas, el verdadero avance lo constituye la ejecución de pilotes con lodos, que ya permite mantener las paredes de la excavación sin tener que introducir tuberías metálicas de entibación, que limitaban la operación al tener que usar grúas pesadas para mantener estas tuberías de envergadura.

Algo más tarde aparecen en España los pilotes Benotto (que, como indica Sanz Saracho, 2010, se introducen en la cimentación del Puente de Amposta sobre el Ebro), con la "morsa" que permite – al ir girando poco a poco – introducir una tubería pesada de entibación, venciendo la resistencia de terrenos débiles y rígidos.

Fig. 2. Foto "vieja máquina" de pilotes hechos con cabria

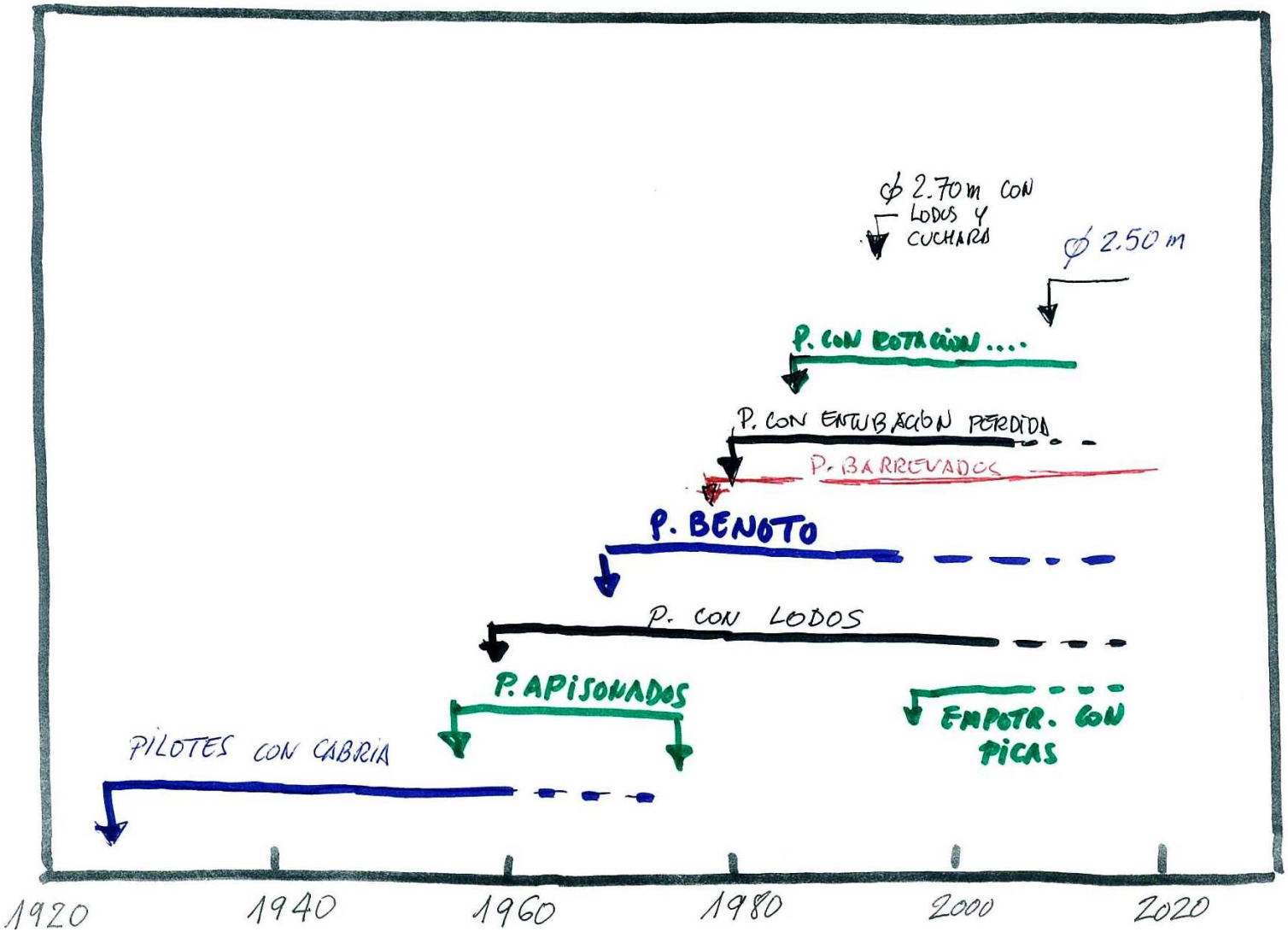

Fig. 3. Pilotes hormigonados "in situ"

Pero antes, uno de los reyes de las cimentaciones profundas fue el pilote apisonado, tipo Franki. Sin embargo, una mala gestión – a nuestro juicio – ante un problema en un edificio de viviendas de Córdoba (que se movió diez años después de construirse, por tener sus pilotes mal apoyados en las margas subyacentes, después de atravesar rellenos), llevó a que dejaran – prácticamente – de hacerse en España, hacia finales de los años 70 del siglo XX.

En la Fig. 3 hemos distinguido otros tipos de pilotes "in situ" más modernos:

- Los pilotes realizados con maquinaria que incorporan cabezal de rotación en el mástil de dirección, con lo que puede "hincarse a presión" la entubación (tubería de un espesor de centímetros), venciendo la resistencia lateral del terreno o la de punta en el extremo de esa tubería, lo que debe dotarse de elementos cortadores (widia, p.e.). A veces se instala un verdadero "carrotier" que permite desgastar, por rotación, el terreno duro en la zona del empotramiento, tal como hicimos en la cimentación del Auditorio de Tenerife con TERRATEST (Fig. 4).

- Los pilotes con tubería de entubación perdida, para casos sobre suelos muy blandos que pueden presentar problemas de posible "corte" durante el hormigonado. Con esta idea la tubería de entibación queda perdida, en vez de introducir una tubería perdida auxiliar adicional (unida a la armadura), como se hizo, entre otras obras, en la Variante de Medinaceli.

- Pilotes de gran diámetro (2,5-2,7 m), a realizar con maquinaria especial de cabeza rotatoria o con maquinaria de pantalla y lodos (como hicimos – con HICEOSA, hace más de treinta años – en los viaductos sobre el río Turia, cimentando pilas de puentes hiperestáticos sobre un solo pilote).

Respecto a los pilotes hincados; los primeros fueron los de madera, técnica que se remonta a la prehistoria y que se ha seguido utilizando en el siglo XX para cimentar terraplenes de poca altura sobre suelos blandos.

Ya más avanzado el siglo XX (antes de la Guerra Civil), ya se utilizaron pilotes de hormigón armado. En los años 50 estos pilotes se utilizaron en la ampliación del Puente de Segovia (Madrid). Después fueron industrializándose durante los años 60, con el empleo de los pilotes de sección hexagonal (tipo Hércules, de origen sueco) que hincó, durante muchos años, KRONSA (Fig. 5). Hoy día han pasado a ser de sección cuadrada, como las que venía ya usando, con anterioridad, TERRATEST. A veces estos pilotes los hemos utilizado con un preforo previo, para atravesar rellenos duros o con gruesos, para continuar – después – hinca convencional (Ampliación de la Petroquímica de Puertollano, etc.)

a) Corona tipo Bauer para cortar y penetrar en el basalto **b) Fragmento de basalto extraído en el Auditorio de Tenerife**

Fig. 4. Cimentación del Auditorio de Tenerife

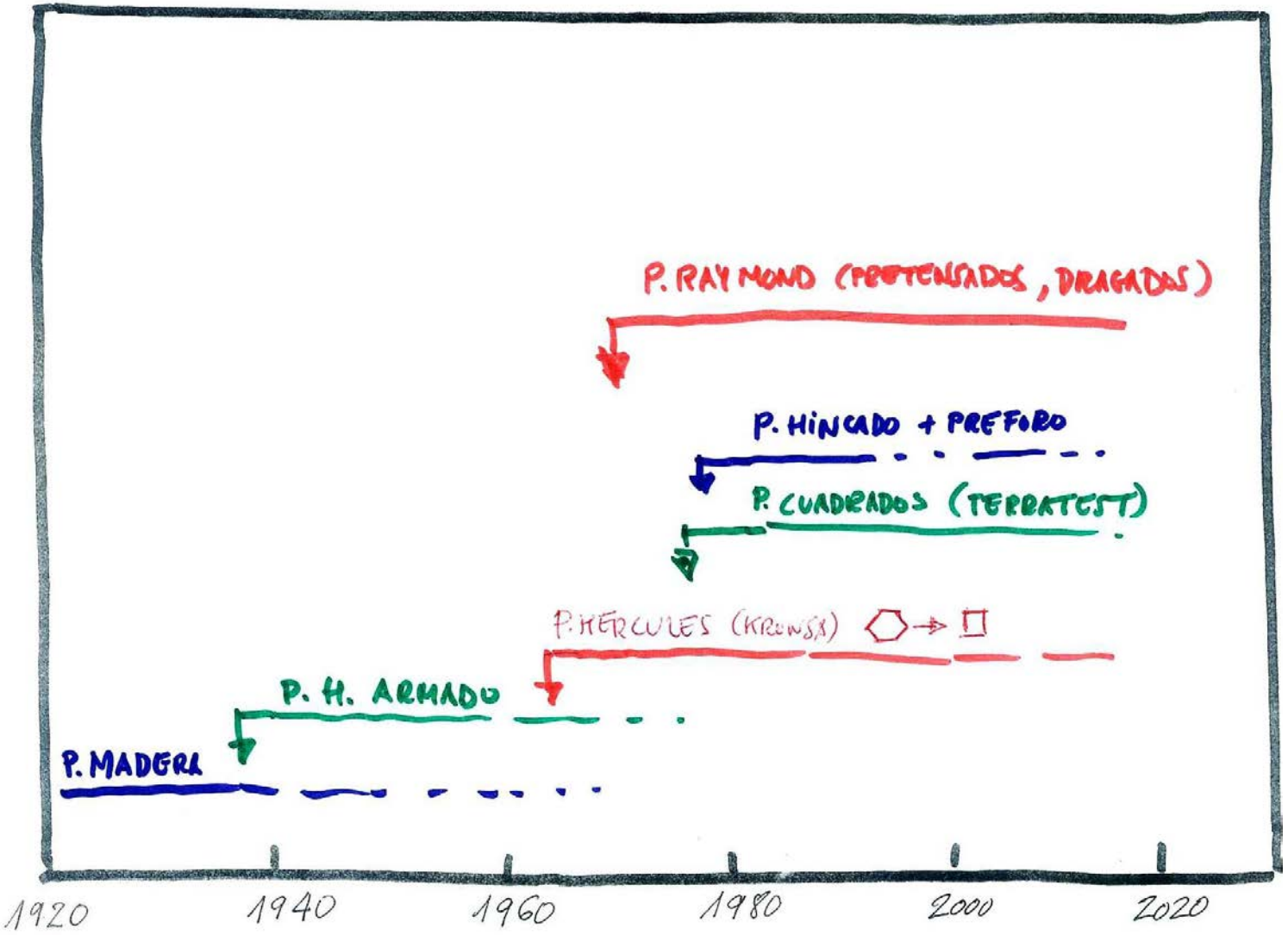

Fig. 5. Pilotes prefabricados e hincados

Entre estos pilotes hincados hay que destacar los de tipo Raymond, huecos y pretensados, fabricados en fragmentos de unos 6 m de longitud, que quedan unidos por un pretensado de adherencia, fabricados e hincados por DRAGADOS (Proyectos Especiales). El inconveniente es que tienen que prepararse en fábrica con toda la longitud prevista (y algo más, para poder ser presentados en la guiadera), lo que genera problemas de transporte. De todas formas se han hincado pilotes de este tipo de 40 a 54 m en tierra (Huelva, Cádiz…) y de unos 40-45 m en mar (Coruña). La calidad de este hormigón es elevada, con módulos de deformación del orden de 55.000 MPa. Estos pilotes fueron introducidos para puentes en Huelva (Río Tinto) y en Cádiz (primer puente sobre la Bahía), por iniciativa de Jacinto Pellón†, Francisco Esteban y su equipo de DRAGADOS, hincados desde cabria flotante. El autor de estas líneas, con varios colaboradores, corrió algún serio peligro ensayando estos pilotes en el mar (Coruña y Algeciras, 1970 y 1982, respectivamente), por rotura de algún anclaje del sistema de reacción de la prueba de carga.

3. LAS PANTALLAS CONTINUAS Y DISCONTINUAS

El enorme desarrollo de la tecnología de construcción de pantallas para la excavación de sótanos, aparcamientos, falsos túneles, estaciones de Metro, etc., se ha debido a:

- Por un lado, la pronta introducción en España de las técnicas suizas e italianas que superaron, en seguida, las primitivas tecnologías similares a las de los pilotes primitivos: cabrias y cucharas ligeras colgadas de cables (Fig. 6). Rodio, Hiceosa, Icos, etc. protagonizaron este desarrollo en que se introdujeron grandes grúas, con Kellys guiados y Kellys telescópicos (Fig. 7) y cucharas pesadas.

Fig. 6. Equipo ligero para pantallas

Fig. 7. Equipos de pantallas con cucharas (SOLA, 2006)

- Por otro, el desarrollo urbano español, con la necesidad de llevar a cabo excavaciones para varios sótanos, lo que lleva a la necesidad de tener maquinaria potente (Fig. 6): Cucharas pesadas y grúas que proporcione empuje apreciable (Fig. 8). Recordamos que, siendo alumno de 5º Curso de Carrera, el Profesor Jiménez Salas nos llevó a ver construir una pantalla de este tipo en un solar muy grande de la Calle Serrano, a principios de 1969, que estaba ejecutando RODIO.

Esta última condición llegó a su culminación con las obras de la ampliación del Metro de Madrid, en que más de 200 estaciones se construyeron al abrigo de pantallas continuas, ejecutadas con lodos trixotrópicos y, en alguna ocasión, ya con polímeros. Esto unido a los túneles de Metro hechos al abrigo de pantallas y a las obras de soterramiento de la M-30 (hoy Calle 30, con más de 50 Km realizados con esta técnica), hicieron que, solo en Madrid, se ejecutaran entre 1996 y 2007 varios millones de metros cuadrados de pantallas continuas (a veces, sustituidas por pantallas discontinuas de pilotes próximos, como en pozos de ataque de tuneladoras o por pantallas de pilotes secantes).

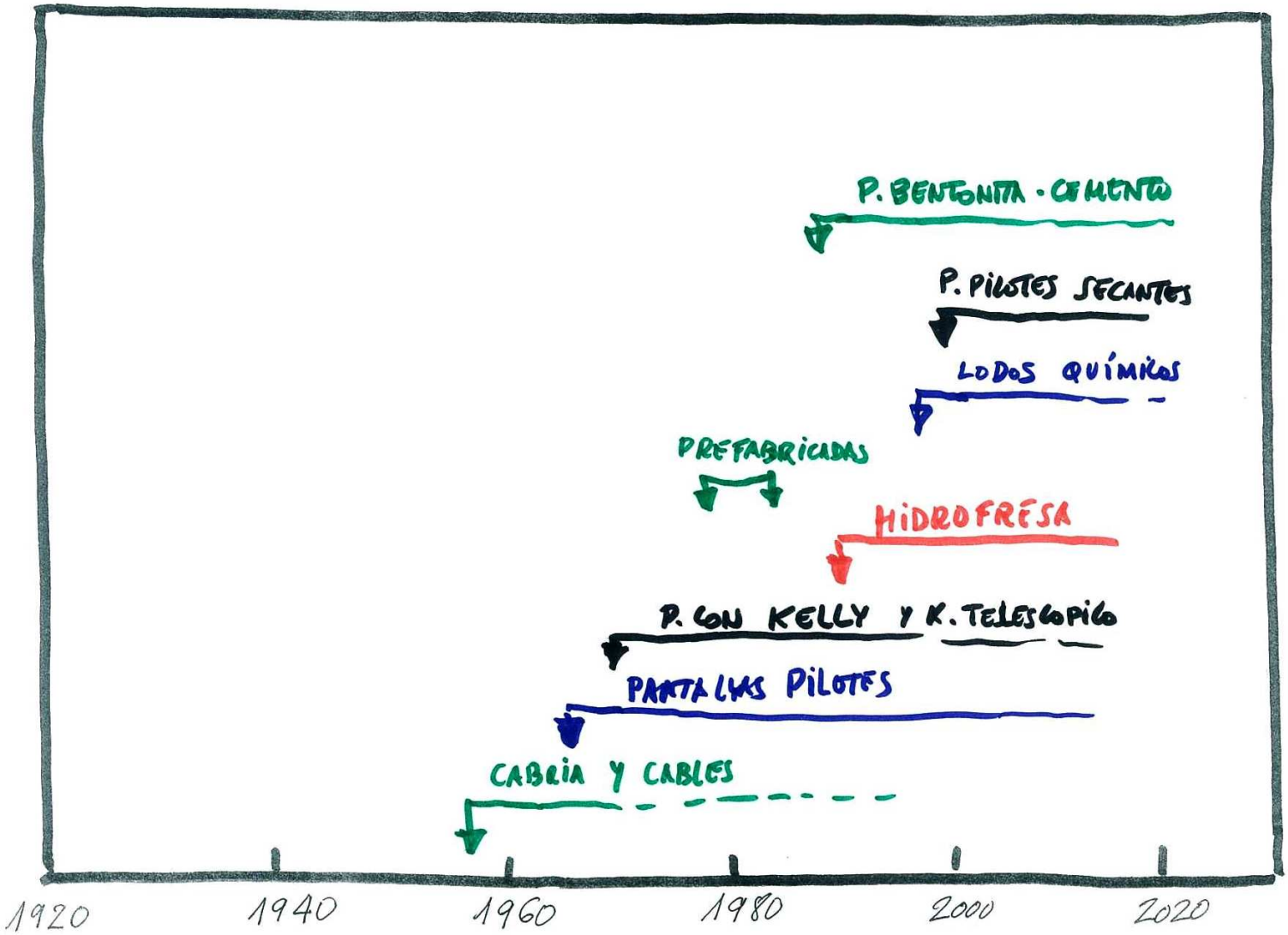

Fig. 8. Pantallas continuas y discontinuas

Las pantallas continuas llegaron a la tecnología de la hidrofresa muy pronto (Fig. 9). En el Dique de Matagorda (Cádiz) ya se utilizó un modelo japonés (algo primitivo e importado por ENTRECANALES) que solía conocerse como "La Tone", que tuvo muchos problemas para trabajar (algunos derivados de la presencia de la "ostionera" gaditana y otros por la influencia salina del medio marino en que tenía que actuar), aunque – al final – dio resultado aceptable. Posteriormente, esta máquina se usó en el Metro de Barcelona.

Fig. 9. Ejemplo de Hidrofresa (Gentileza de RODIO KRONSA)

Pero pasaron varios años (Fig. 8) para que volvieran a utilizarse hidrofresas en España, como en el Premetro de Bilbao, en pantallas impermeables ejecutadas en presas de tierra en servicio, pantallas del Metro en la zona de Vallecas, parte de la Calle 30, etc., gracias al empuje inicial de TERRATEST y GEOCISA, que crearon una empresa a este fin. Esta técnica ha derivado en la ejecución de pantallas de bentonita-cemento, utilizadas con éxito en diversos casos (dique seco de Crinavis, presa del Hatillo de República Dominicana en los años 70 del siglo pasado, hace poco en el recinto de la nueva esclusa en Sevilla, etc.).

Con hidrofresa se han excavado las pantallas más profundas, habiéndose alcanzado los 120 m de profundidad, aunque en España sólo se han bajado hasta 70 m en obras ferroviarias de Barcelona.

En la Fig. 8 se ha venido a resumir la cronología de utilización de estas técnicas (con todos los posibles errores y omisiones que ya hemos comentado).

Algo que hay que comentar respecto a la utilización de las pantallas es:

- La necesidad de resolver el problema de su apuntalamiento, ya que es difícil que puedan trabajar en voladizo (bien por los movimientos que ello supone en el entorno, lo que en caso urbano puede ser decisivo, bien por los momentos flectores que pueden originarse). Ello ha llevado al desarrollo de la técnica de anclajes (ya aplicados en otros casos, como en la estabilidad de taludes) que, en casos especiales, han alcanzado cargas nominales de trabajo de 180 Tm en suelos, como en la Estación de Colonia Jardín y en Metronorte del Metro de Madrid, en que la necesidad de utilizar la estación como pozo de ataque, obligaba a disponer de espacios libres importantes dentro de cada Estación.

- La posibilidad de utilizar el método ascendente-descendente (aunque, a veces, solo sea descendente) ejecutando pilas-pilote (bien elementos de hormigón o pilares metálicos embebidos en la perforación del pilote y empotrados en la parte inferior hormigonada) y la pantalla antes de excavar, a fin de que sirvan los pilares de

puntos de conexión con elementos horizontales (metálicos o de hormigón) que hagan de apuntalamiento de las pantallas.

El uso de pantallas continuas, a veces, ha sido sustituido por:

- Pantallas discontinuas de pilotes, con los llamados pilotes "tangentes" (que no lo son, sino que tienen las generatrices exteriores próximas, a 20-50 cm). Suele ser conveniente instalar una malla metálica entre ellos y gunitar el conjunto, a fin de que no se desprendan bloques térreos de entre los pilotes. En terrenos de cierta calidad, como en Madrid, se ha utilizado mucho esta técnica para la excavación de sótanos o túneles artificiales (Fig. 10 y Fig. 11)

Fig. 10. Equipos modernos de pilotes (SOLA, 2006)

Fig. 11. Pantalla anclada de pilotes "quasi-tangentes", cerca de Ferrol (Foto del autor)

- Pantallas de pilotes realmente secantes, con pilote de hormigón en masa entre los que se excavan – después y cortando ese hormigón – pilotes debidamente armados. Hay que estudiar bien la separación entre pilotes y cuidar la verticalidad de su ejecución, para que no queden "ventanas" entre pilotes en su parte inferior. A partir de unos 20 m este problema de verticalidad es muy importante y también debe tenerse en cuenta que los pilotes no armados difícilmente pueden soportar presiones de agua importantes, por lo que pueden "reventar", como nos ocurrió en la Estación de Puente de Jerez, en el Metro de Sevilla.

- Pantallas de micropilotes, con o sin filas de anclajes intermedios. En excavaciones no muy profundas o en terrenos duros pueden tener su aplicación, como se ha hecho en un Hospital de Granada (Fig. 12).

- "Muro Stump" o muro ejecutado por bataches que se hacen por filas, anclando cada uno de ellos (Fig. 13). Actualmente es raro ver el uso de esta técnica en España, pero en los años 70 se empleó en muchas ocasiones. Sin embargo, en Lima se están utilizando por empresas españolas.

Fig. 12. Pantalla de micropilotes con todos los niveles de anclajes ejecutados, recubierta por forro de hormigón realizado por SITE (BOTELLO, 2015)

Fig. 13. Muro tipo Stump, de bataches anclados

4. LOS TRATAMIENTOS DEL TERRENO

4.1. Inyecciones

Si en algo se ha distinguido la actividad geotécnica española es en el uso – a veces, masivo – de las técnicas de tratamiento, mejora y refuerzo del terreno, desde los lejanos tiempo en que se aplicaron técnicas como la congelación con salmuera e inyecciones de lechada de cemento en el recalce del Pilar de Zaragoza, en los años 20 del siglo pasado.

Pero dentro de estas técnicas la que destaca es la de "inyecciones", principalmente de lechada de cemento, que ha ido evolucionando a las inyecciones químicas (utilizadas en el Metro de Madrid, en arenas saturadas, hace más de treinta años), pasando por las de mortero y de microcemento.

En la Fig. 14 se ha presentado "nuestra" evolución cronológica del empleo de la técnica de la inyección, incluida la variante de inyección por tobera (o jet-grouting) y las de compensación (para control de movimientos).

El gran desafío que supuso, en su día (años 50-70), la construcción de grandes presas fue acompañado por el empleo masivo de inyecciones, principalmente de lechada. El propósito era "construir" la pantalla impermeable aguas arriba de la presa o inyectar zonas muy permeables, aunque la presencia de zonas carstificadas, hizo fracasar, a veces, estas campañas de inyecciones (como en la Presa de El Collado de Contreras, en que la subpresión actúa todavía con sus máximos valores bajo el cimiento de la presa de fábrica). Estas circunstancias hicieron que varias empresas como Rodio, Cimentaciones y Sondeos (Cimison) y Sypsa se desarrollaran extraordinariamente, aunque alguna sucumbió (posteriormente, ya al final de los 70 y principios de los 80), al no poder adaptarse a las crisis de los 70 y al cambio de las aplicaciones geotécnicas.

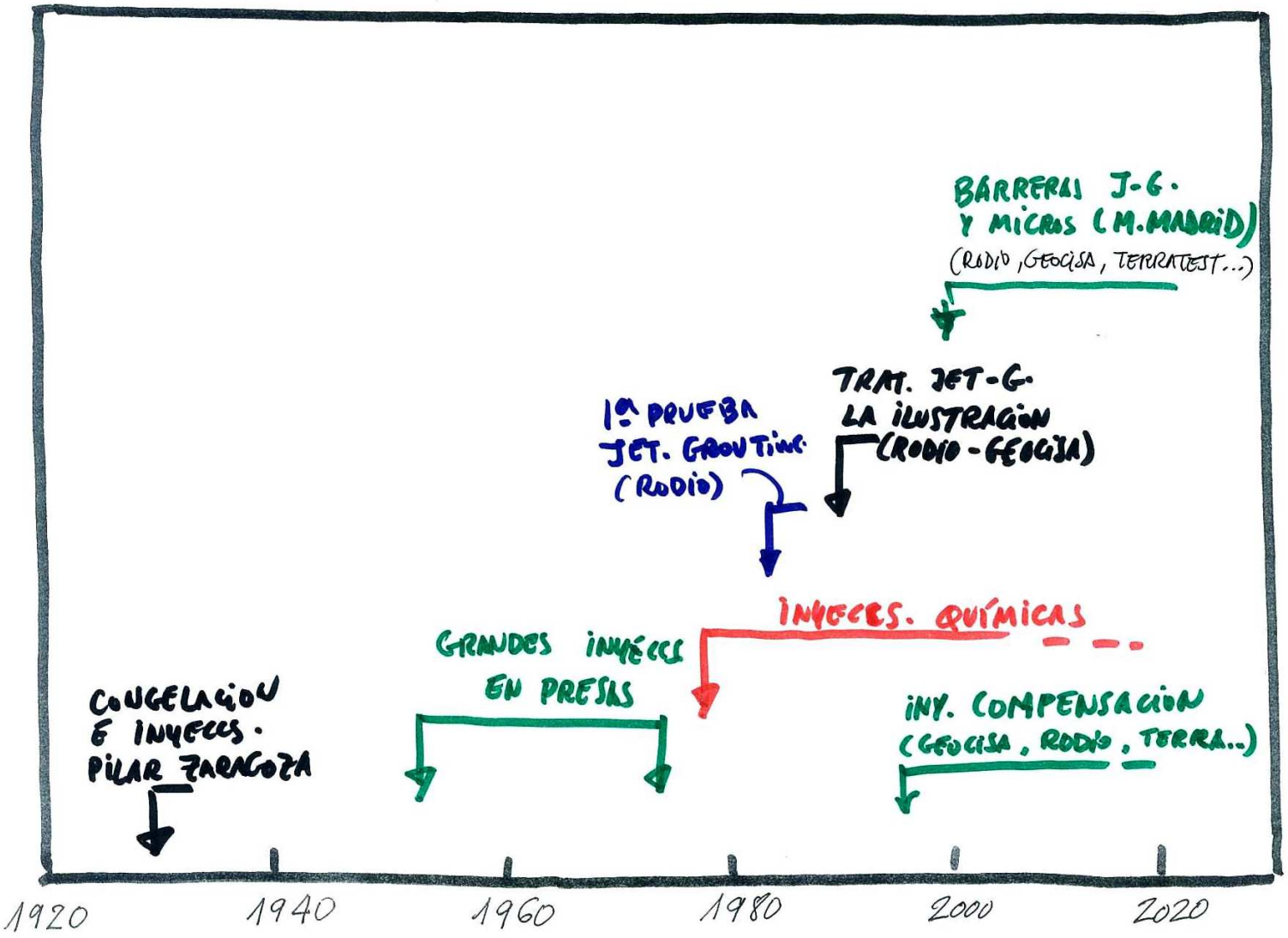

Fig. 14. Inyecciones

La introducción del jet-grouting fue una verdadera revolución. Si no estamos equivocados, la primera obra la realizó Rodio, a fin de consolidar un frente con agua de la Línea 6 del Metro de Madrid, con la idea de cerrar temporalmente la obra, que se continuó varios años después (años 80). Poco después, para resolver un problema de inestabilidad en la Avenida Carpetana (bajo la cual se perforaba el túnel de la, hoy día, C-5) se estableció un pequeño concurso entre tres empresas españolas, pero, al final, el contratista trajo una empresa suiza para realizar la obra (en teoría más barata, ya que no ponía ningún técnico, lo que nos obligó a hacer de asesor geotécnico, supervisor y capataz de la máquina que aportaron). Este ya fue un tratamiento "comme el faut", con diseño geométrico, con longitud variable de columnas, incluso con diferente volumen de inyección, según la profundidad, partes de ejecución, control de movimientos próximos, etc.

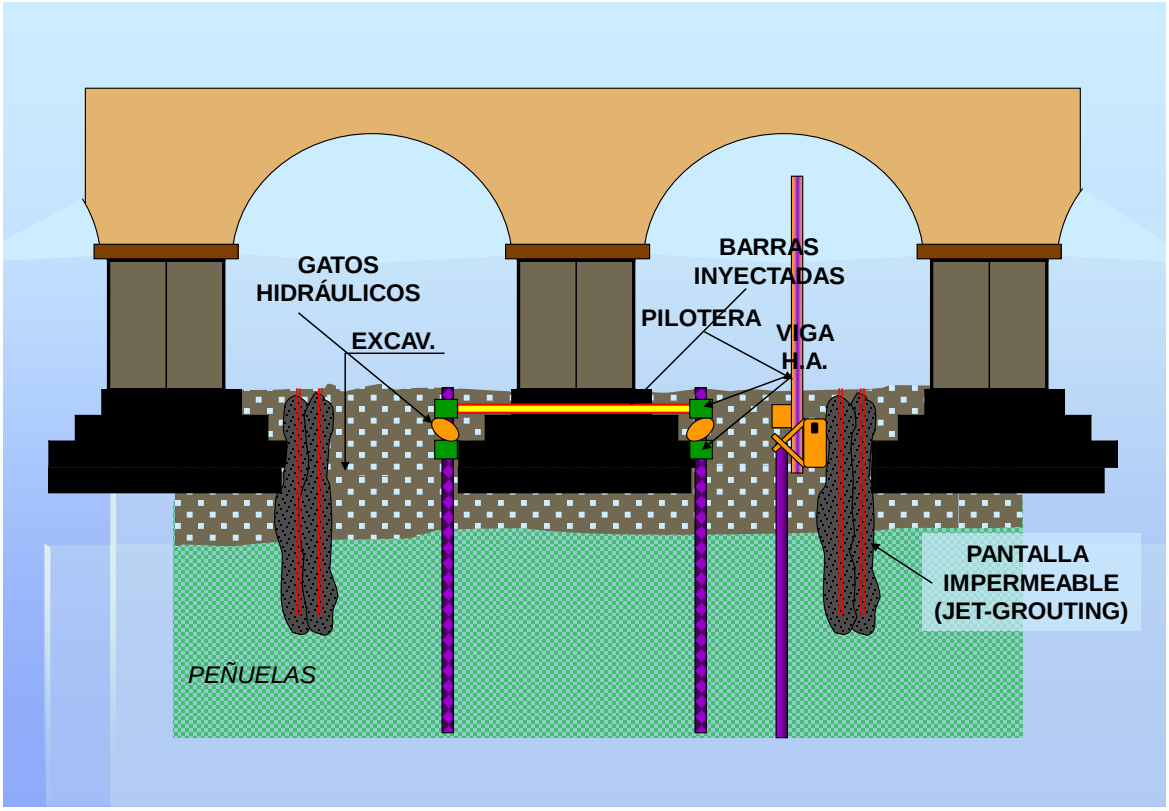

Fig. 15. Ejecución de una barrera impermeable con jet-grouting (Puente de Segovia)

Pero el gran espaldarazo al jet-grouting lo dieron obras como la consolidación de la Avenida de la Ilustración de Madrid (24 km de columnas) y los "portillos" en el ferrocarril de Santa Justa- La Salud de Sevilla, ya en los años 90. Posteriormente (finales de los 90 y en la primera década del siglo XXI) el jet-grouting se ha utilizado para conseguir fondos impermeables de Estaciones (Valencia, Barcelona, Sevilla …) y barreras de protección de edificios, respecto a la subsidencia proveniente de la excavación de túneles urbanos próximos (Metro y Calle 30 de Madrid, Metro de Sevilla, Metro de Bilbao, Metro de Barcelona, ...), problemas especiales (Fig. 15), etc.

Por último citaremos las inyecciones de compensación, con su primera versión de inyecciones de compactación (inyección de mortero seco), concebidas por el gran W. Baker (y con el que trabajamos usando esta técnica el Profesor Sagaseta y el autor de estas líneas, en el Metro de Caracas entre 1979 y 1981). Esta técnica fue introducida en España por GEOCISA en el "recalce" y levantamiento de un edificio en la c/ Cabezón de la Sal (Barrio de Santa Eugenia de Madrid). Después, ya con la técnica de "manguitos" y de inyección de lechada de cemento (con algún producto "secreto" para retardar el fraguado), GEOCISA aplicó esta técnica por primera vez en el cruce de la Línea 10 bajo el ferrocarril Atocha-Chamartín, con éxito que permitió la excavación del nuevo túnel de Metro bajo el antiguo (a una distancia inferior a 2 m), sin problemas especiales, a pesar de que la solera del antiguo túnel era, apenas, una "torta de hormigón". Posteriormente, RODIO-KRONSA y TERRATEST usaron esta técnica en Vallecas (Línea 1), Metrosur, Campo de las Naciones…

4.2. Vibroflotación y columnas de grava

La técnica de la vibroflotación ya se empleó en los años 30 del siglo XX, para consolidar terrenos flojos en la red de autopistas que se construyeron en Alemania, antes de la II Guerra Mundial.

En España hay que esperar a los años 70 para que esta técnica se utilice para aumentar la densidad de unos rellenos realizados para aumentar la densidad de unos rellenos realizados en el Puerto de la Luz (Las Palmas de Gran Canaria), en lo que se había vertido "picón" (lapilli volcánico, de aspecto granular, bastante abrasivo y de baja densidad). EGESA-BAUER, con equipos Bauer, hizo la mayor parte de la densificación del relleno (sobre el que se iba a construir un astillero tipo "syncro-lift"), con poca aportación de material (10%). También se utilizó la técnica del Terra-Probe (tubo metálico abierto, que se hincaba gracias al vibrador que llevaba en cabeza). La efectividad de este método se mostró claramente inferior a la de la vibroflotación. Posteriormente, la vibroflotación se utilizó para compactar otro relleno (procedente de dragado) en el Carenero de Galeras del Puerto de Cartagena y en la cimentación de la chimenea de la Central Térmica de Algeciras, con mayor aportación (15-20%).

Pero el gran espaldarazo a esta técnica, ya con aportación masiva de grava (lo que le hace convertirse en realización de "columnas de grava") se lo dio, por un lado la realización de 25 Km de columnas en la consolidación de la Avenida de la Ilustración de Madrid (finales de los 80) y la cimentación de terraplenes sobre suelos blandos en la Variante de Medinaceli, con columnas cortas (de 6 m) flotando en arcillas muy blandas. Estas obras fueron realizadas por TERRATEST y gestionados por el inolvidable Arturo Canalda† (Fig. 16).

Fig. 16. Torpedo para ejecutar columna de grava por el método del arrastre. Variante de El Puerto de Santa María

Con los años ya ha llegado la realización de columnas de grava en el mar, tanto con la técnica de "manta de grava" sobre el fondo marino, como con la técnica de impulsión de grava con aire desde pontonas, realizadas por Geocisa- KellerTerra.

En la Fig. 17 puede verse la cronología correspondiente a estas técnicas.

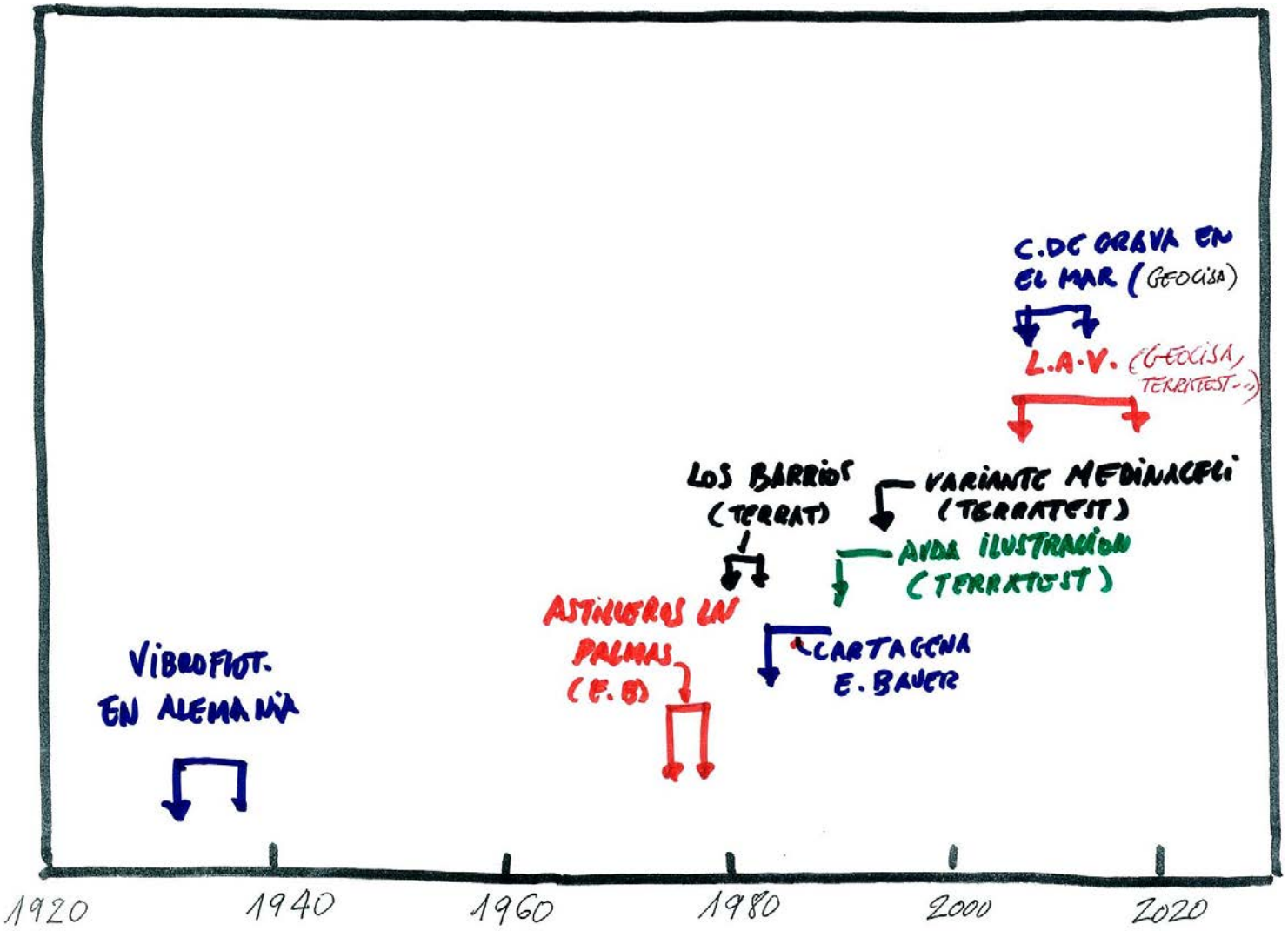

Fig. 17. Columnas de grava y vibroflotación

4.3. Otras técnicas de mejora

A las anteriores tecnologías hay que añadir, como más corrientes:

- Los drenes mecha.
- Las columnas de mortero, bien sin expansión, bien expandidas (CMC, o columnas de módulo controlado que realiza habitualmente la empresa Menard).
- La compactación dinámica de Menard, usadas para consolidar rellenos deformables y heterogéneos.
- La realización de micropilotes como "armadura del terreno".
- Las columnas de suelo-cal o suelo-cemento (muy poco usadas en España).
- Las columnas de "spring-soil", utilizadas por Rodrio-Kronsa (con diámetro variable entre su inicio y su final), para recalces (vía ferroviaria, instalaciones industriales con losa que queda perforada con poco diámetro, etc.).

En la Fig. 18 puede verse el cronograma de estas técnicas, de forma simplificada.

En el caso de los micropilotes puede indicarse las diferencias entre los micropilotes iniciales, ligeros, armados con varillas, introducidos por Fondedile (a partir del invento de Fernando Lizzi, denominado "pale radice", en que más que absorber una determinada carga, se "armaba" el terreno, como puede verse en la Fig. 19), y los micropilotes actuales – armados con tubos – que pueden soportar más de 300 T. Destaca el uso masivo llevado a cabo por Site en tratamientos de problemas de estabilidad de carreteras en Andalucía.

La técnica de los pilotes de mortero, con y sin expansión, ha sido utilizada, recientemente, de forma masiva en el enlace de la L.A.V. Madrid-Sevilla (en Torrejón de Velasco, Madrid) que permite conectar Sevilla con Valencia, sin pasar por Madrid (Fig. 20).

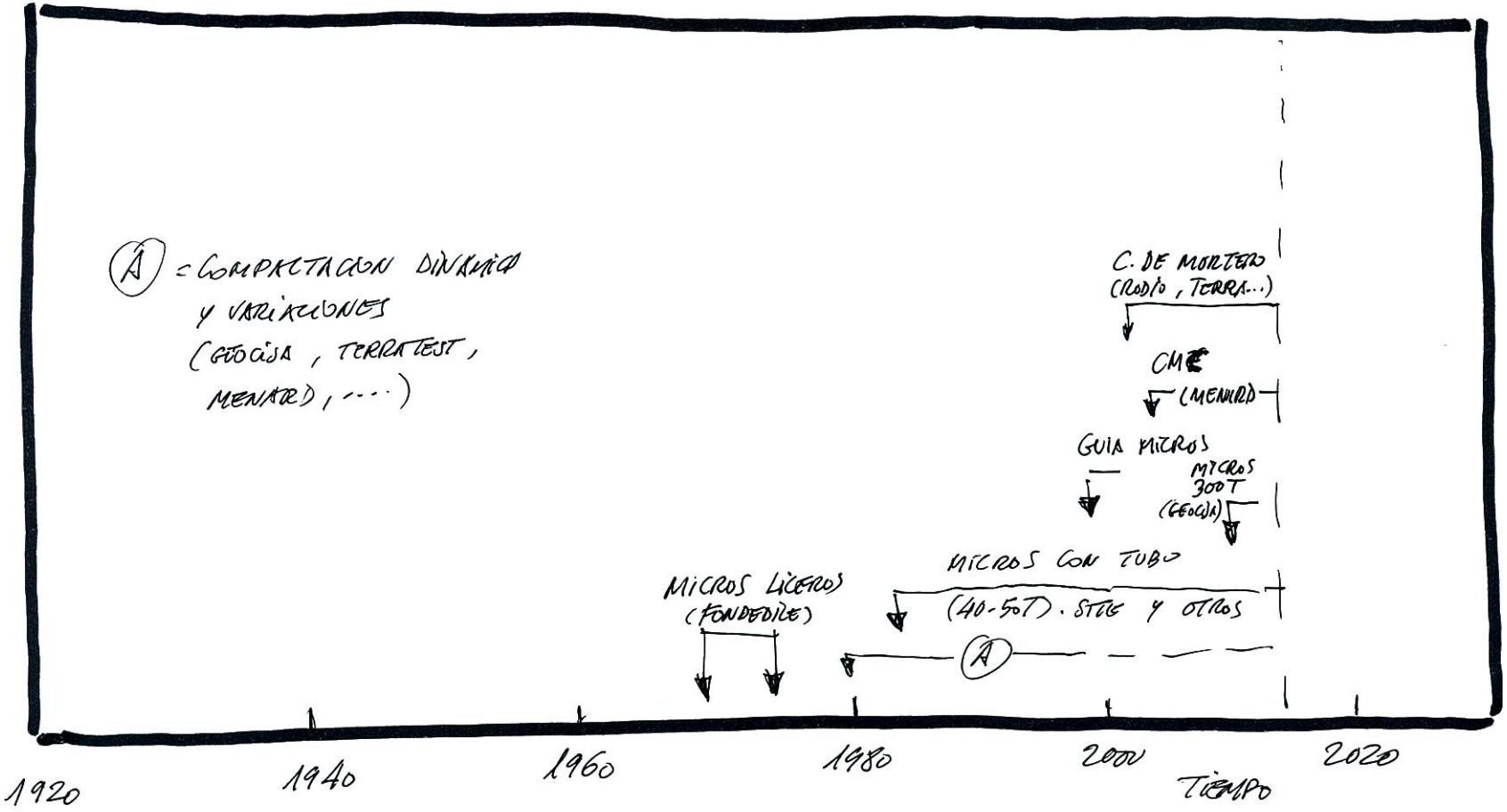

Fig. 18. Columnas de mortero, CMC, Micropilotes y compactación dinámica

La compactación dinámica viene usándose en España desde finales de los años 70 y encierra pocas variaciones. A veces se consigue hacer cráteres de hasta 3 m; el problema está en rellenarlos con material compactado debidamente. Las grúas sufren mucho, por lo que no es siempre fácil utilizar esta técnica.

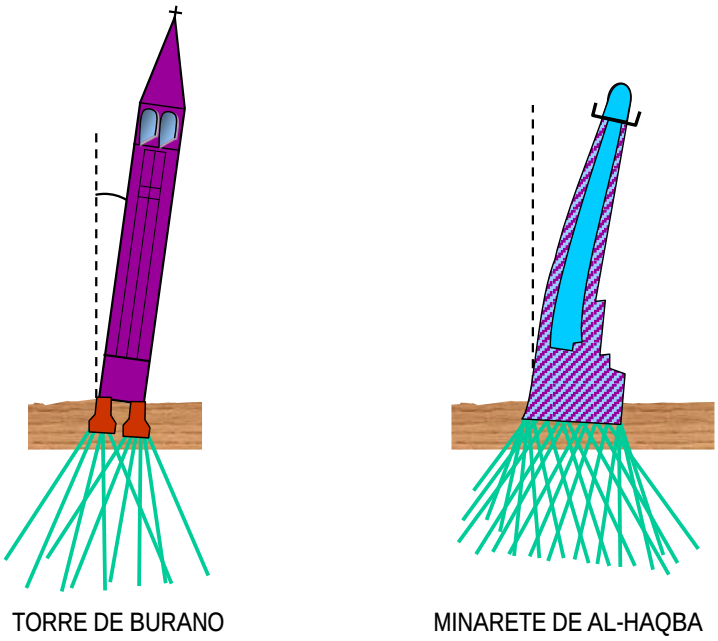

Fig. 19. Ejemplos clásicos de recalces con redes de micropilotes (Soluciones de Lizzi)

Fig. 20. Ejecución de columnas de mortero con y sin expansión junto a la vía del AVE (Torrejón de Velasco)

5. ACONTECIMIENTOS GEOTÉCNICOS SINGULARES

Como hemos señalado anteriormente, el desarrollo de la Geotecnia española no sólo se ha basado en la existencia de figuras humanas singulares, sino en la ocasión o sucesión de obras singulares, de gran transcendencia mediática o de gran inversión, que han permitido poner a punto adecuadamente técnicas que – de otra forma – habrían quedado para conocimiento de algunos expertos.

En la Fig. 21 hemos presentado un cronograma de "acontecimientos geotécnicos singulares", que incluyen desde obras concretas y obras genéricas (como las de las Líneas de Alta Velocidad, LAV) hasta sucesos específicos, como la fundación de AETESS o la edición de los libros de Geotecnia y Cimientos o de Ingeoter. A continuación enumeraremos los hitos más importantes, a nuestro juicio.

- Inyecciones en presas, que ya ha sido comentado anteriormente.
- El Puente de Rande, obra singular para la época (primeros años 70), por las dificultades de la cimentación y de la defensa a la navegación.
- El Puente de los Santos (Asturias), en que hubo que hacer islas artificiales e introducir tubos con vibrador para atravesar los fangos y continuar a rotación en el terreno firme.
- Dos puentes hiperestáticos sobre el Río Turia, con solución de pilote único bajo cada pila, de Ø 2,60 m, realizado con maquinaria de pantalla, pero con sección circular, con inyección de la punta en gravas.
- El Congreso Europeo de Mecánica del Suelo de 1972 (Junto con el Simposio de Mecánica de Rocas de 1968) que permitió el reconocimiento oficial de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo ante las sociedades europeas, con una exposición que daba idea del avance y desarrollo español.

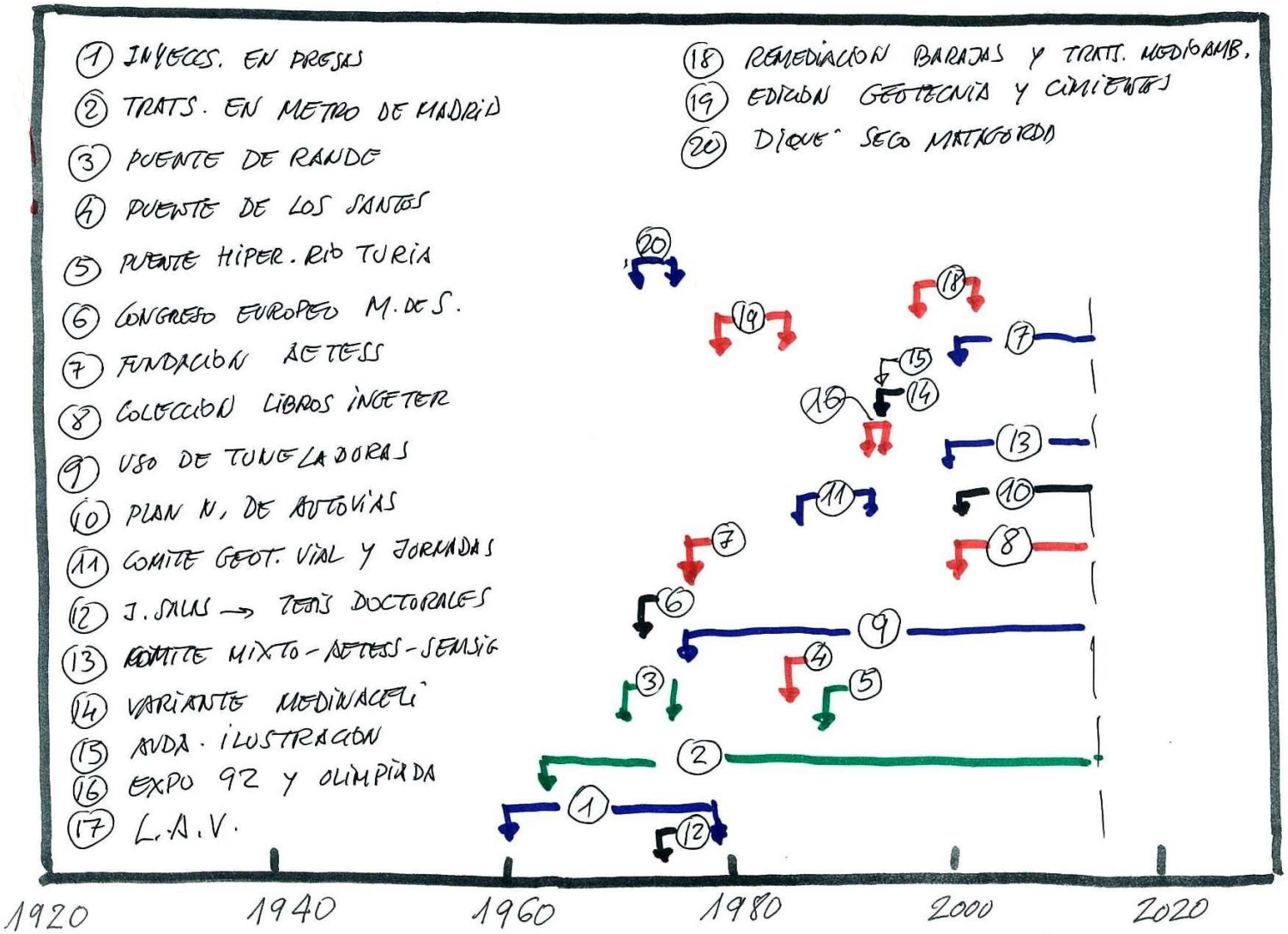

Fig. 21. Acontecimientos geotécnicos singulares (Obras e Hitos)

- El Dique Seco de Matagorda (1971-75), con uso de todo tipo de soluciones geotécnicas (inyecciones, drenaje, precarga, etc.)

- La Fundación de AETESS hace 40 años.

- La edición de los diversos tomos de Geotecnia y Cimientos (1971-1980), que permitieron mostrar la existencia de un amplio conjunto de especialistas españoles.

- La Expo92 de Sevilla, con el desarrollo de los pilotes hincados de forma masiva.

- La Variante de Medinaceli y la Avenida de la Ilustración, ya citadas anteriormente y con grandes volúmenes de tratamientos del terreno.

- El comienzo, por parte del Prof. Jiménez Salas, de la dirección de Tesis Doctorales (desde otoño de 1969), dedicadas al colapso de limos yesíferos, esfuerzos horizontales en pilotes… Se inicia, así, un amplio camino dedicado a la investigación básica y aplicada, que fructificará poco a poco y que llegará a del orden de más de 150 tesis doctorales sobre geotecnia, leídas desde 1969 hasta la actualidad, en las diversas universidades españolas.

- Las actividades del Comité Mixto SEMSIG-AETESS y del Comité de Geotecnia Vial, con sus jornadas anuales o bianuales, que han permitido la edición de libros que recopilan la técnica geotécnica puesta al día sobre recalces, pantallas, rehabilitación de estructuras y de obras viarias, uso de tratamientos con cal en arcillas, estabilidad de taludes, cimentaciones de puentes, etc.

- La construcción de Metros (Madrid, Barcelona, Bilbao, Valencia, Sevilla, Málaga, Granada, etc.) y el uso de tuneladoras, lo que ha empujado los tratamientos previos del terreno (barreras de jet-grouting y de micropilotes, inyecciones de compensación, etc.), como ya hemos indicado. Destaca – por su relieve mediático –

la barrera de pilotes de gran diámetro hecha en el Templo Expiatorio de la Sagrada Familia de Barcelona, para anular los posibles efectos de la ejecución de un túnel próximo con tuneladora.

- Grandes excavaciones como la de Azca de Madrid, la del edificio de Diagonal-Mar en Barcelona, la del edificio Giralda en Sevilla, la de la Plaza de Lugo en Coruña, los pozos de estaciones para la Línea 9 del Metro de Barcelona (Ø=30 m, h= 70 m) etc.

- Y, cómo no, las grandes obras para el Plan Nacional de Autopistas y para las Líneas de Alta Velocidad, desde finales de los años 80 hasta la actualidad, con cimentaciones de grandes puentes, columnas de grava y de mortero para cimentar importantes terraplenes sobre suelos blandos, tratamientos dentro de túneles, etc.

Sin todos estos hitos y obras, la Geotecnia española no habría llegado, indudablemente, a su nivel actual y, prácticamente, en todos ellos han estado las empresas de AETESS.

6. DOCENTES E INVESTIGADORES

Uno de los fundamentos en que suele apoyarse el desarrollo de cualquier rama ingenieril pasa por lo que hemos venido (desde hace más de 25 años) denominando IDAT:

- I: Investigación básica y aplicada, desarrollado por universidades e institutos de investigación, con base o apoyo en empresas privadas.

- D: Desarrollo de lo investigado, con necesidad de la intervención privada, haciendo que la investigación más pura se pase a contemplar el problema real.

- A: Aplicación de lo investigado y desarrollado a obras reales, lo que necesita apoyo de las Direcciones de Obra y empresas constructoras (generales y especializadas).

- T: Transferencia de conocimientos y experiencias de todo lo anteriormente investigado, desarrollado y aplicado, bien con conferencias, publicaciones, etc. Esta labor es muy importante ya que, recientemente, hemos comprobado que técnicas que dábamos por muy conocidos (y utilizadas hace 20 años) se nos presentan como novedosas, sin aplicar las experiencias que tanto esfuerzo nos costó conseguir.

Por eso es muy importante la aportación de docentes e investigadores en el desarrollo de la Ingeniería Geotécnica, siempre contemplando la realidad, ya que los que se pretende no es solo desarrollar la industria sino "enseñar al que no sabe", ya desde los cursos de pregrado y no solo para los postgraduados.

Dentro de esta labor docente destacan las Jornadas organizadas conjuntamente por la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (SEMSIG) y AETESS, que se imparten todos los años desde 2001.

En ese sentido, hemos elaborado la Fig. 22 en la que aparece un cronograma con lo que, a juicio del autor de estas líneas, ha sido la actuación de los principales docentes e investigadores de estos últimos 50 años. Evidentemente, el término "principales" es subjetivo y muy discutible. Y como no se pueden poner todos los nombres, hemos

agrupado en uno de los hitos un gran número de personas (Escuelas Politécnicas de Madrid, Barcelona y Valencia, Universidad de Sevilla, Granada, A Coruña, Cantabria, etc.) Pedimos disculpas a los que van incluidos en ese hito, situados allí no por falta de valía sino por necesidad de espacio y por haber incluido separadamente a "los más viejos del lugar". Solo se han incluido los claramente geotécnicos. Y a los que faltan, mis disculpas por la omisión.

Vemos, pues, que el panorama es muy amplio, lo que, afortunadamente, permite considerar que hay continuidad en el aspecto docente e investigador. Prueba de ello es el número de Tesis Doctorales en Geotecnia que se han leído durante los últimos 40 años y que, de forma aproximada, corresponden a:

- Universidad Politécnica de Madrid ≈ 45.
- Universidad Politécnica de Catalunya ≈ 54.
- Universidad de Cantabria ≈ 25
- Universidad de Granada ≈ 12
- Universidad de Sevilla ≈ 12
- Universidad Politécnica de Valencia ≈ 10
- Universidad de Burgos ≈ 5
- Universidad de A Coruña ≈ 4
- Universidad Europea ≈ 1

Es decir, más de 160 Tesis doctorales geotécnicas (sin contar las de Hidrogeología o Geología Aplicada). Parece un número muy importante, que da idea de la actividad investigadora española en este campo. Por supuesto el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX ha intervenido en este panorama, con muchas tesis doctorales leídas (a parte de la del autor de estas páginas), como son la de Faraco†, las de los Profs. Castillo Ron, Sagaseta, Olalla, Estaire, etc., o la de su actual director, Fernando Pardo de Santallana, etc.

También es necesario que la colaboración de empresas de AETESS de forma directa en estos temas docentes e investigadores, a veces, de forma directa. Por ejemplo así ha sido en el caso de RODIO-KRONSA con las participaciones directas de Fernando Muzas y Ángel Uriel (dando clases e investigando) o la Tesis de Carlos Delgado; de GEOCISA, con algunas Tesis Doctorales realizadas en su seno, como la de Gustavo Armijo, Carlos Iván Henríquez, Silmara de Assis, Pedro Arozamena, etc. Un precedente fue la de José Mª Sanz Saracho sobre la resistencia al corte de las pizarras silurianas, estudios realizados, en parte, cuando pertenecía al Laboratorio de Geotecnia y Reología del CEDEX y, en parte, ya en GEOCISA.

En la Fig. 22 no se ha podido citar a todos los que, hoy, soportan la Geotecnia Española, por falta de espacio, pero hay que añadir nombres como el de Nuria Pinyol, Javier González-Gallego, Leandro Alejano, Isabel Reig, Sonia Bautista, Ángel Rodríguez, Silvia García, Svetlana Melentijevic, Juan Valderas, José Luis Arcos, etc.

Como se ve, el número femenino de protagonistas ha aumentado claramente respecto al pasado, aunque dista mucho de ser paritario con el de masculinos. Esperamos que en el futuro esta diferencia se amortigue.

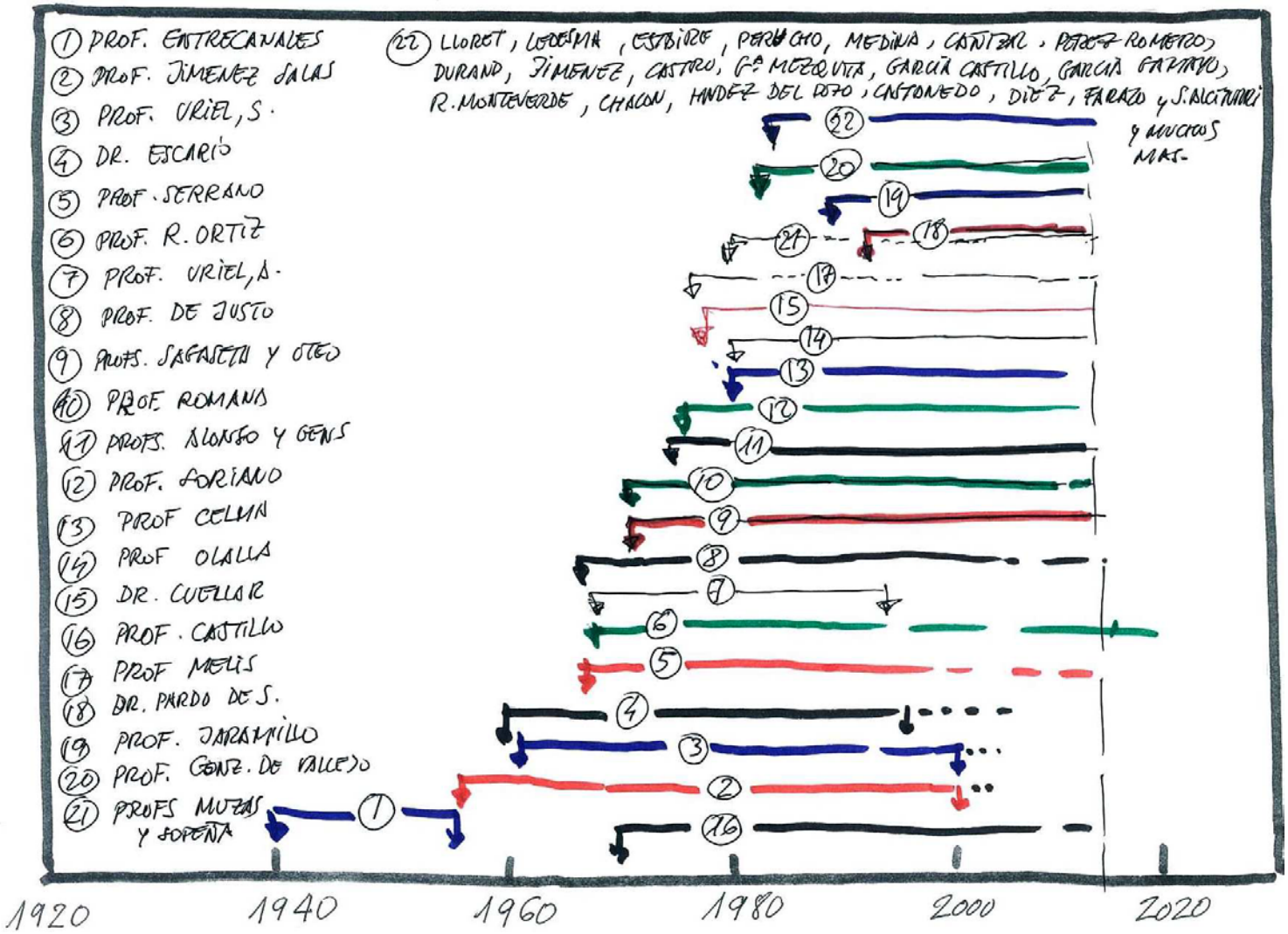

Fig. 22. Docentes e Investigadores

7. RECAPITULACIÓN

De todo lo anterior, cabe indicar que hemos descrito una breve Historia de la Geotecnia española y de AETESS, siempre presente en el desarrollo de esta actividad.

¿Qué podríamos hacer con nuestras plumas y papeles, a veces ayudados por poderosos ordenadores, sin la maquinaria y el buen hacer de las empresas geotécnicas especializadas?

Generalmente, nuestra experiencia indica que va por delante la maquinaria y el entusiasmo de sus operadores (en todas las escalas) y que la posible realización de obras geotécnicas nos brinda la posibilidad de estudiar su realización y su comportamiento. Así, podemos deducir nuevas teorías, nuevas formulaciones y criterios de diseño y control. No toda puede ser mera invención teórica, pues ello puede conducir a establecer un castillo de naipes poco estable.

Necesitamos por eso unir teoría y práctica, universidad y profesión y, por ello, la Geotecnia española ha alcanzado un nivel técnico muy considerable, sobre todo al haber intervenido en las grandes obras que la situación española nos ha permitido vivir: Expo-92 y el gran Plan de Carreteras, las anteriores presas de fábrica y materiales sueltos, la Ampliación del Metro de Madrid... Ese aprovechamiento ha permitido el desarrollo de AETESS y de los que no somos de AETESS. Esperamos que, en el futuro, podamos vivir nuevas situaciones algo similares, para que sean aprovechadas por los que nos siguen.

8. AGRADECIMIENTOS

El autor de estas líneas quiere expresar su agradecimiento a AETESS por la distinción que le ha hecho al encárgale esta conferencia para la celebración del 40 aniversario de la fundación de dicha Asociación, especialmente a D. Rafael Casado (el Presidente actual y D. José Mª Echave (el anterior presidente).

Pero también queremos expresar, en estas páginas, nuestro reconocimiento a todos aquellas empresas de AETESS que nos acompañaron en muchas de nuestras "aventuras geotécnicas" y sin los cuales gran parte de nuestras experiencias y – aunque sea dicho con falsa modestia – algunos de nuestros "éxitos" no hubieran sido posibles. Es una larga lista en la que, con seguridad, se nos quedará en el tintero más de un nombre.

Entre ellos, para el autor de estas líneas, destaca Arturo Canalda†, primero en EGESA-BAUER (que me concedió su primer premio hacia 1970) y después en RODIO y, sobre todo, en TERRATEST, gran gestor e inolvidable amigo. Pero destacan también otros amigos, como José Mª Sanz Saracho†, al que conocí ya en GEOCISA (después de sus aportaciones en el Laboratorio de Geotecnia y Reología del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX) y que nos apoyó, siempre, en temas de emprendimiento y novedosos, labor que continuaron en esa empresa, más tarde, Jacinto Pellón†, el gran José Polimón, infatigable impulsor de avances e investigaciones y "nuestro fenicio" Javier Asencio.

En RODIO-KRONSA actual quiero destacar a personas con responsabilidades en el pasado, como Luis Fernández Renau, Carlos Delgado, Julián Núñez, Pablo Villanueva, y, sobre todo, a José Luis Rojo y José Mª Herrador, con los que sigo el contacto personal, más allá del tiempo y el trabajo.

De TERRATEST tengo un recuerdo inolvidable de Enrique Romero† y agradezco el apoyo, siempre amable de Enrique Torres (al que conocí prácticamente en su primera obra) y de Fernando Martínez y la colaboración técnica de Tomasso Virdia y Juan José Muñoz Armagnac (infatigable comentarista en las conferencias públicas), a los que conocí en Hiceosa. De SITE, … ¿cómo olvidar a José Mª García Zalduegui†, vocalista en salas de fiestas y magnífico y amable gestor? Actualmente hemos de añadir a la lista de esa empresa a Pepe Santos, que siempre nos ha ayudado en investigaciones y casos prácticos.

Respecto a la actual KELLER distinguiremos a Julio García Mina y Goran Vucotic, con los que da gusto colaborar.

De Menard, empresa joven en España, destacaremos a Teresa Pérez por su entusiasmo contagioso – que, ahora, emprende nuevos caminos – y su apoyo para difundir las técnicas de mejora del terreno, así como a Juan Carlos Montejano.

Y aún me faltan amigos a los que reconocer su apoyo, como Juan Luis Ríos de Pilotes Posada, a José Luis Rollo y Fernando Portugal† cuando estaban en Sypsa, Juan Carlos Llorens (desde su época de FONDEDILE y ahora en la Dirección de Ingeniería de ACCIONA donde también ha estado Manolo Llorens), etc. Imposible citar a todos los demás, pero para ellos y sus colaboradores mi reconocimiento y un fuerte abrazo.

9. REFERENCIAS

- BOTELLO, A. (2015). "Sobre el comportamiento de micropilotes trabajando a flexión y/o cortante en estructuras de tierra". *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid*.

- CELMA, J. J. (2003). *"Geotecnia e Ingeniería Civil. Una aproximación histórica".* Inter Técnica Ediciones, U.P.V.

- GARCÍA GONZÁLO, E. (2006). "Pantallas ejecutadas con hidrofresa". *Jornada Técnica AETOS-AETESS (Pantallas en medio urbano para estructuras subterráneas)*, pp. 35-46. Madrid.

- OTEO, C. (2007). "Geotecnia Vial, Túneles y Cimentaciones de puentes". En A. T. Carreteras", *"Un siglo de Caminos de España"* (págs. pp. 243-63). Madrid.

- OTEO, C. (2008). "Algunas consideraciones sobre el diseño y construcción de Pilotajes de gran diámetro". *8ª Sesión. Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS (Pilotes de gran diámetro)*, pp. 15 a 33.

- SANZ SARACHO, J. M. (2010). ""AETESS. Orígenes: Adites (II)". *Revista AETESS INFO*(nº 4), pp. 28-30.

- SOLA, P. (2006). "Pantallas en medio urbano para estructuras subterráneas". *Jornada Técnica AETOS-AETESS (Pantallas en medio urbano para estructuras subterráneas)*, pp. 9-25. Madrid.