

Hitos en la Historia de la Geotecnia

Milestones in the History of Geotechnic

VICTOR F. B. DE MELLO

Presidente de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones; Catedrático de la Universidad de São Paulo; Ingeniero Consultor

1. INTRODUCCIÓN

Es muy adecuado que elijamos, tanto en forma individual como colectiva, ocasiones especiales para señalar nuestra marcha. "El hombre y sus símbolos": necesitamos símbolos, discontinuidades para llegar al conocimiento de lo continuo. Como mojones en un camino pero, preferentemente, como ocurre en esta ocasión especial, obviando la regularidad de los mojones, los cuales se automatizan en una nueva monotonía de un continuo.

La ocasión especial ahora elegida es el 25º aniversario de la fundación formal de la Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelos, una de las muy sólidas y activas de las sociedades en la comunidad geotécnica internacional. Si se considera el nacimiento oficial de esta sociedad, se debe admitir que se trata de un infante prodigio, ya que apenas contaba con nueve años de existencia cuando ya patrocinaba exitosamente la tercera Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos. Y, en verdad, ha sido prodigiosa la trayectoria de los esfuerzos venezolanos en lo que hace a la ingeniería de fundaciones, de presas y de carreteras. Pero debe reconocerse que siempre hay algo muy arbitrario en cualquier apreciación de la historia, porque nuestro sentido de la misma está dirigido, y comprendido por eventos formales a modo de discontinuidades; y, sobre todo, debe señalarse lo que es intrínseco a la esencia de lo remarcable, que es el hecho de ser notado, por lo tanto, en un proceso subjetivo.

Inevitablemente subjetiva debe ser cualquier apreciación del pasado, del presente y del supuesto futuro del campo profesional que hemos abrazado con amor y satisfacción. Más aún, debería ser tanto más perdonable por ser inexorable, que la requerida apreciación crítica de una trayectoria tal sea aún más subjetiva. No vivimos simplemente en un tiempo de incertidumbre, sino que la creamos mediante la formación simultánea de innumerables ideas, hechos y descubrimientos. En verdad, a través de las maravillas de la comunicación tecnológica, hemos sido llevados una vez más a la clase de perplejidad que debe haber acompañado a nuestros antepasados en la mayoría de sus históricos intentos por enfrentar las complejidades de la Naturaleza. Creo que, pro-

bablemente, el período de certezas (y determinismo y positivismo) debe haber sido muy breve en el transcurso de las sociedades humanas, ya que una certeza requiere una proporción muy peculiar entre una idea dominante y la capacidad de su difusión de una manera convincente. Tal proporción, peculiarmente selectiva, puede verse perturbada muy fácilmente por cambios en el número de ideas dominantes o por cambios en su capacidad de difundirse y arraigarse. (Mismo A de palabras-clave).

De este modo, es mi creencia y mi mensaje que más que buscar las comodidades ilusorias de la homogeneización, debemos aprender a gozar de las heterogeneidades y de las diferencias honestamente reconocidas. Ojalá siempre propiciemos la idea-fertilidad y la fertilización-cruzada, así como el tipo de selección natural conducente a la multiplicidad equivalentemente apropiada que es el ensayo y la prueba de la realidad de cualquier cosa conec-tada con la Naturaleza. Ojalá que cada uno de vosotros pueda ver en mi ejercicio personal presente nada más que el estímulo para que hagáis uso de un privilegio similar, diferentemente condicionado y dirigido, a causa de estar imbuido del mismo propósito.

Antes de emprender mi desafiante labor técnica, quisiera clarificar mi posición en lo referente a términos, y términos de referencia. El asunto radica en la distinción entre ingeniería, ciencia de la ingeniería, actividades y capacidad analítica, capacidad computacional dentro de una teoría determinada o hipótesis de trabajo, y la práctica de la ingeniería dentro de restricciones socio-económicas. Ha habido una creciente confusión con respecto a estas distinciones. La sociedad ha forjado demandas de un vasto número de "obrerros de la ingeniería" como ejecutantes organizados de tareas definidas, conducidas o finalizadas bajo rutinas que hayan sido aceptadas momentáneamente sin cuestionar. Pero los números que dominan las necesidades temporarias de la sociedad no deben sumergirnos en la confusión. Todas las diferentes facetas mencionadas tienen una importancia colateral equivalente, como los distintos órganos que sustentan un cuerpo vivo; y las proporciones de los diferentes órganos y sus actividades deben estar apropiadamente balanceadas. Posiblemente muchos esperen que dirija la atención ha-

cia la llamada Mecánica de Suelos convencional del análisis-síntesis. Sin embargo, debo respetar el orden que considero más significativo, a saber: a) ingeniería inventiva o ingeniosa; b) ingeniería por preceptos; c) teorización y ingeniería por análisis-síntesis.

2. INGENIERÍA INVENTIVA O INGENIOSA, FUNDACIONES Y TERRAPLENES

Nuestras deliberaciones sobre la historia de la mecánica de suelos y ingeniería de suelos comienzan, casi sin excepción, con Terzaghi, alrededor de 1923. Eso parecería enfatizar el rol del trabajo analítico, con cierto abandono del lugar verdaderamente importante de la creatividad ingenieril.

Por supuesto, debemos comenzar concediendo cierta validez al proverbio que nos recuerda que, cuando se está dentro de un bosque, no se ve éste sino los troncos de los árboles. Estamos en la era de Terzaghi: esa es nuestra primera realidad. (Memo B).

Pero hay algo más que se puede extraer de la observación. Existen importantes razones que justifican porque la ingeniería inventiva se desecha. Principalmente estamos interesados en el gran número de obreros de la ingeniería destinados a ejecutar sus tareas y dominados por las necesidades de comunicación, de teorías, procedimientos y normas para que otros apliquen sin cuestionar. De esta manera, estamos subconscientemente influenciados en nuestra estimación de la profesión por la prevalencia de tareas que pertenecen a círculos académicos. La ingeniería de suelos se convierte en algo que pueda ser enseñado y aprendido, en comparación con lo que pueda ser realizado. Y además debemos reconocer que, mientras que antes de 1940, los profesionales apenas diplomados eran enviados a valerse por sí mismos con una relativamente pequeña subyugación subsecuente hacia la producción académica, en los últimos años la tasa de producción de información adicional y la intensidad del desarrollo tecnológico, y la comunicación, han aumentado considerablemente, perennizando a través de la vida profesional el dominio subconsciente ejercido por la actividad académica. Somos eternos estudiantes; pero, en la actualidad, mucho menos de la vida que del diluvio de escritos de los profesores. Hemos permitido imperceptiblemente que los procesos de información ocuparan el mayor espacio de la educación y de las profesiones, en detrimento de la formación. Sin excesivo énfasis recordemos que en inglés cuando expresamos haber comprendido, "understand", declaramos haber quedado subyugados, "stand-under"; o un poco menos mordazmente, en nuestros idiomas latinos, cuando comprendemos, prendemos-con, esto es quedamos presos al expositor.

La creatividad no se crea con frecuencia y, generalmente, no se enseña. Es difícil institucionalizar una estructura académica por medio de la cual los estudiantes creativos sean instigados a cuestionar, desafiar, discutir y proponer otras soluciones, presumible-

mente, más elegantes. Aún así, no podemos negar la preeminencia de la creatividad de la ingeniería como una visualización física de una solución que tan elegante o superabundantemente deshecha o domina un conjunto de problemas, de forma tal que el cálculo y el análisis muy frecuentemente se hacen bastante prescindibles.

En el pasado, los esfuerzos de la ingeniería fueron acompañados por una afluencia relativa de la proporción de posibilidades-requerimientos, sin duda porque los "requerimientos" habían sido siempre bastante modestos. Por consiguiente, el progreso fue siempre forjado por un "adelanto", estadísticamente bien al frente de las rutinas, que fué probado y logró éxito y, por lo tanto, el hombre-animal eminentemente imitador guardó el logro cultural a través de la "copia del éxito". El éxito notable, a ser imitado, fué siempre conservativo en el sentido de que era mucho mejor que necesario para cumplir con los requerimientos inmediatos. El progreso inventivo es intrínsecamente por etapas; cada desarrollo abre una posibilidad que lleva un tiempo considerable para ser agotada por crecientes demandas. De esta manera, la buena ingeniería, en diseño o construcción, evita ser llevada de su posición de afluencia de ideas ingeniosas, a un trabajo de ingeniería más concienzudo o de mejor cálculo.

2.1. Perspectiva histórica

Más de una elegante invención heredada del pasado tiende a darse por sentada acompañada por una gran subestimación del grado de creatividad que implicó en su triunfo. Por ejemplo, nos regocijamos con los recientes avances relacionados con el uso de un refuerzo de tensión geotextil (simultáneo con drenaje) en la parte inferior de los terraplenes fundados en arcillas blandas, pero el uso de bambú y varillas en forma de haz es antiquísimo. En un sentido, el uso de pilotes hincados a modo de soporte forma una remarcable invención añosa de la ingeniería de fundaciones que damos por sentada, mientras que arquitectos e ingenieros estructurales reconocen la importancia de la invención del arco y la cúpula en mampostería para la compresión, y de los puentes colgantes para los materiales tensiles. Una reciente documentación evidencia que los romanos emplearon una excelente fundación para un faro ubicado mar adentro que aún se usa: llenaron un bote con los cementos hidráulicos de la época, lo llevaron hasta la posición y lo hundieron. En tiempos mucho más recientes, el concepto del uso de aire comprimido para trabajar "en seco" debe figurar como algo bastante destacable. Así también, en lo que hace a optimizar los beneficios de un pilote hincado de camisa recuperable, con aquellos de hormigón moldeado "in situ", el invento de Edgard Frankignoul (Bélgica) del piloto Franki debe ser reconocido como ingenioso.

¿Cuándo se usó por primera vez para edificios el concepto de fundación flotante? ¿Fué un ingeniero geotécnico, y él dependía de la enseñanza de la Mecánica de Suelos convencional? Sabemos muy bien, cuanto han contribuido

nuestros estudios de la mecánica de suelos al refinamiento de la aplicación: pero nadie mejor que nosotros mismos para reconocer el valor intrínseco de la idea inventiva para comenzar.

2.2. Productos y procedimientos modernos de la Ingeniería Inventiva

La pasada década ha sido fértil en la producción de una serie de soluciones algo más ingeniosas y eficaces que el producto del análisis-síntesis sistemático de la ingeniería de suelos convencional. Algunos han abierto nuevas e importantes brechas hacia la ingeniería de subsuelos y terraplenes. (Memo C).

Justificando mi evaluación de la relativa fuerza de las dos facetas de la ingeniería, puede resultar interesante mencionar el caso de un concurso internacional realizado hace cuatro años para un proyecto de diseño y construcción, para resolver el problema de la torre inclinada de Pisa. Obviamente, sólo participaron las compañías de ingeniería civil internacionales mejor respaldadas y más importantes asistidas por los servicios geotécnicos consultores más prestigiosos. Lamentablemente, el contrato no fue adjudicado y no se divulgaron las diferentes soluciones. Una conferencia sobre las soluciones comparativas, aún esquemática, hubiese constituido una fantástica lección sobre ingeniería civil.

Ante un problema serio, si bien más cuidadosamente documentado de lo que se puede imaginar, existieron básicamente tantas soluciones físicas como concursantes (unas 15 - 20). Enfrentados con un problema de alta proporción de responsabilidad/viabilidad, los ingenieros no buscan soluciones en un trabajo analítico mejor, sino en soluciones físicas diferentes, universos estadísticos diferentes destinados a deshechar en forma bastante definitiva el posible histograma de grados de comportamiento indeseable.

La electrólisis y la precarga al vacío de sitios compresibles saturados fueron dos adelantos sumamente ingeniosos los cuáles, sin embargo, no fueron bien lanzados por sus entusiastas. Las paredes diafragma de bentonita estabilizada y los pilotes perforados constituyeron otro avance ingenioso, que recientemente se extendió al empleo de bentonita para túneles. La inyección química selectiva de fundaciones aluvionales de presas se empleó confiadamente durante la construcción de la gran presa de Serre-Ponçon hace unos 25 años y en una publicación reciente se señaló que, después de 20 años de comportamiento cuidadosamente observado, el desempeño fue excelente y sin deterioros con el tiempo.

En rápida sucesión, hemos tenido creaciones adicionales tales como gabiones, tierra armada, geotextiles, drenes verticales de fibra, estabilización con columnas de piedra y columnas de cal, pilotes-raíz, pilotes CCP, compactación profunda, etc. No podemos más que encomiar estos avances ya que la ingeniería inventiva está en su esencia. Sin embargo, en un intento de analizar la tendencia y su sig-

nificación, ¿podríamos arriesgar algunas especulaciones? La necesidad puede ser la madre de la invención y, por lo tanto, pueden hacerse algunas inferencias del hecho de atribuir los orígenes de muchos de esos adelantos a Italia, Francia, Suecia, etc. Además de factores culturales, ¿podría ser que la mayor fertilidad para una producción tal, esté asociada con regiones que enfrentan la necesidad de correr parejo con la grandeza y de algún modo, menos favorecidas por la abundancia económica? Quisiera recordar la afirmación del Dr. Land cuando describió la invención de la cámara que lleva su nombre (1948), diciendo que los dos componentes de un invento son, el primero, "dar rienda suelta a sus anhelantes sueños", y, luego, "trabajar duro para hacerlos realidad".

No desmerece los esfuerzos de la mecánica de suelos darle una prioridad esencial a la ingeniería intuitiva inventiva en la mayoría de tales adelantos. Por el contrario, algunos ejemplos remarcables podrían servir sólo como excepciones que confirman la regla, o como ejemplos de descubrimientos creativos basados en una teorización existente. La temprana y brillante solución matemática de Nabor Carrillo al problema de los hundimientos producidos por el rebajamiento de la napa freática por bombeo, a través del análisis de los cambios de tensión-deformación en un medio pseudo-elástico ("Subsistencia en el Area de Long Beach-San Pedro, Cal: el efecto de un centro de tensión", 1949) aparece como un ejemplo sobresaliente; la continuación altamente rentable del empleo sensato del bombeo por inyección (pozos de recarga, etc.) para moderar la subsistencia (y, en el caso de pozos de petróleo, con el provecho adicional de mejorar la producción) puede de este modo, entrar en la categoría de interacción fértil entre las herramientas teóricas existentes y los descubrimientos intuitivos.

Mi primitivo intento de trabajo inventivo (1946-48) incluido en mi tesis doctoral (y una copatente de invención) fue concebido como resultado de razonamientos teóricos de que la "solidificación" de arcillas podía lograrse mejor mediante un intercambio de bases con un catión monomérico apropiado y la polimerización subsiguiente, obteniendo así el endurecimiento de los nexos entre las partículas de arcilla mediante el catión adsorbido y la cadena polimerizada. En un sentido, el mío fue el Monómero Acrílico Nº 1, AM-1, un acrilato de calcio, y los sucesivos adelantos condujeron a mucho trabajo en el M.I.T. y resultaron en el producto actual de solución-inyección AM-9, empleado en condiciones particularmente difíciles. Mirando hacia atrás, estoy muy satisfecho de haber resistido la seducción de la novedad, intuyendo los problemas de costos y modestas perspectivas de practicidad, y haberme retirado del proyecto. En un análisis más cuidadoso, se podría incluso observar que los beneficios del procedimiento de estabilización son predominantemente aquéllos de polimerización de la solución intersticial, con un complemento pequeño de los nexos de intercambio de bases teóricamente anticipados.

Otro intento orientado en forma teórica en el desarrollo inventivo que podría resultar altamente rentable, técnica y económicamente, es el desarrollo de las soluciones monoméricas que podrían ser catalizadas para una polimerización selectiva en función de las velocidades de filtración, posiblemente a través de una acción electroforética.

La cuestión básica es que en presas y otras estructuras hidráulicas el uso de inyección desde una disposición de sondeos implica un principio válido (donde el agua podría encontrar sus pasos preferenciales también podría, hacerlo otro líquido que pueda ser inducido a solidificar) pero acompañado por dos factores de ineficiencia y costo: primero, la serie de perforaciones para encontrar los futuros caminos preferenciales y en segundo lugar, la inyección de presión hacia afuera de los sondeos, bastante diferente de aquella del agua embalsada. La acción de sellado de la sedimentación por la presión misma de las tensiones de filtración es muy conocida por ser eficientemente selectiva y barata. La polimerización podría inducirse para generar un crecimiento selectivo de los tamaños de la "sedimentación" para lograr una correspondencia mejor con los tamaños de las grietas. Aparentemente, algunos adelantos se están promoviendo de acuerdo a tales lineamientos.

Tales ejemplos están citados meramente como casos del tipo de actividad inventiva orientada del Dr. Land, interaccionando la ingeniería ingeniosa y la "de máquinas".

2.3. Concepto de la Ingeniería Inventiva en la geotécnica y el supuesto futuro

Junto con la euforia de la ingeniería civil por la creatividad, ¿qué reflexiones se podrían extraer de ella con respecto a la mecánica de suelos convencional? Creo que debemos estar alertas a fin de evitar ser apartados del camino por dos factores de creciente intervención: uno es lo que yo di en llamar "el gravamen del equipamiento pesado y especial"; y el otro son las "demandas excesivamente agobiantes" de la sociedad moderna en los geotécnicos. (Memo D). La tendencia durante los últimos 35 años ha sido de tales aumentos en pesos y capacidades de los equipos de construcción que el hecho no podía dejar de ejercer una considerable influencia en varios aspectos de la ingeniería geotécnica. No deseo repetir lo obvio: que el geotécnico ha, literalmente, movido montañas y abierto cicatrices en el rostro de la tierra. Mi interés radica en examinar algo de la psicología oculta en tales empeños. Mientras que nuestros mentores, como Terzaghi, Taylor, Casagrande, Skempton y Peck, cultivaron un apasionado amor y respeto por la delicada fragilidad de los suelos, la tendencia moderna es desconsiderarlos brutalmente como algo de lo que se puede prescindir. Algunas soluciones de ingeniería en terraplenes y fundaciones son superabundantes hasta el punto de lograr el comportamiento deseado, igual o mejor que el mínimo necesario, independientemente de las peculiaridades del suelo. "When in doubt, grout; if still in doubt, grout throughout"

(Si dudas, inyecta; si aún dudas, inyecta en todas partes) ejemplifica una realidad frecuente. ¿No debemos preguntar, a qué costo? ¿Por qué el mundo se está convirtiendo en algo insoportablemente caro para todos y en todas partes? El desarrollo en la gran capacidad para emprender proyectos gigantescos fue inquestionable: el problema radica en el diseño y la construcción de proyectos medianos y pequeños como si se tratara de enormes tareas enanificadas. Es más, en algunas áreas han habido remarcables mejoras sistemáticas en capacidades de equipos, algunas de las cuales fueron canalizadas afortunadamente en forma directa hacia la construcción de la ingeniería civil. Cuando nos detenemos a pensar en los avances exponenciales de la electrónica, y en la mayoría de los adelantos industriales, prontamente nos ufamamos de lo que puede lograrse mediante esfuerzos colectivos concentrados. Pueden mencionarse muchos centros, pero el ejemplo por excelencia es Japón. Está bastante claro que las posibilidades de creación en los campos sintéticos industrializados, relacionados con materiales sujetos a manipulación de alta tasa beneficio/costo tenderán a proporciones exponencialmente crecientes en comparación con las modestas manipulaciones de las condiciones del subsuelo.

Es así que crecientes proporciones de problemas podrían enfocarse desde el punto de vista de las soluciones a pesar de las condiciones del subsuelo. El énfasis ha variado en forma algo desconcertante: uno deja de dirigir el interés principal por conocer el suelo, e incluso a saber qué hacer con él, y apunta su atención hacia qué hacerle a él, o inclusive, a pesar de él. Actualmente nos movemos en un círculo vicioso. La producción industrial altamente desarrollada y su control de calidad ofrecen fantásticas posibilidades pero aumentan las demandas en los geotécnicos. Se nos pide garantizar las fundaciones que no se asentarán más que una par de milímetros a pesar de combinaciones inusuales de cargas, temperaturas, vibraciones, etc. Se nos pide garantía ante el riesgo de agrietarse bajo riesgos hipotéticos de eventos sísmicos. Y así sucesivamente. Y sin confesar nuestra relativa insatisfacción con nuestras soluciones convencionales disponibles, insuficientemente precisas, garantizadas y económicas, hemos encontrado recursos en soluciones que esencialmente prescindían del interés minucioso por la personalidad y los caprichos del suelo. El mismo rendimiento industrial nos da los medios.

El hombre, al desarrollar la civilización, no puede dejar de estar en contra de la Naturaleza, de moldearla a su antojo. ¿A qué precio social y ecológico?

3. RECETAS E HIPÓTESIS DE TRABAJO

A mi criterio, en un análisis crítico del desarrollo de la ingeniería geotécnica, el segundo lugar en importancia debe conferirse a las RECETAS (PRECEPTOS), tanto para el diseño

como para la construcción, y para tales importantes y subsiguientes actividades como la investigación, los ensayos, las especificaciones y demás. No hay otro instrumento fundamental en nuestra cadena tecnológica que encuentre tanta incompresión y tergiversación. Muy frecuentemente, las RECETAS no son reconocidas como tales, siendo promovidas a los niveles ya sea de dogmas, principios y teorías, o puestos a la altura de las correlaciones, o inclusive ridiculizados como los "factores empíricos de ajuste" (fudge factors) del practicante. Sin embargo, es a través de las RECETAS, manuales, códigos, normas, etc. que se conduce la vasta mayoría de nuestros esfuerzos. Y, a través de una receta satisfactoria, simultáneamente damos un paso adelante en nuestra práctica, y retrasamos inmediatamente los estímulos para la dinámica de las revisiones. (Memo E).

Indudablemente, todo geotécnico reconoce que el uso del criterio CBR para el diseño del pavimento es una mera receta. Pero ¿cuántos concederían que casi todo diseño y práctica de la construcción no es más que una receta o hipótesis de trabajo?

Bien, partamos del concepto general de que la mayoría de nuestros trabajos están diseñados ya sea para un Factor de Seguridad FS a rotura, o para alguna deformación admisible limitante. ¿No es una receta, respaldar la adopción de $FS \geq 1,5$, o una deformación admisible a $\leq X$ mm o a una distorsión de $l: \delta$ y? Si estos criterios de decisión final por si o por no, no son más que recetas, todo lo que nos lleva a ellos no puede ser ni muy diferente, ni mejor.

Por lo tanto, como un segundo paso, podríamos listar items específicos de nuestras tareas principales, limitándonos a las de diseño mas significativo a fin de evitar extendernos para incluir todo item de diseño.

Por ejemplo:

- Presas:

Tratamiento de inyección y drenaje de fundaciones.
Disposición de los elementos filtros-drenaje dentro de la presa.
Pérdidas aceptables de filtraciones.
Criterios para filtros y materiales de transición.
Taludes externos, estabilidad y deformabilidad.
Criterios de compactación de campo vs. procedimientos de laboratorio.
Plasticidad aceptable del material del núcleo.
Deformaciones conducentes a agrietamientos, límites tolerables.
Criterios de licuefacción; comportamiento sísmico y riesgos.

- Fundaciones:

Elección del tipo de fundación en cuanto a factibilidad, preferencias, riesgos de defectos, daños, deterioros.
Presiones admisibles en las bases.

Cálculos de asentamientos empleando datos de edómetros.
Estimaciones de asentamientos obtenidas de ensayos de carga con plato y extrapolación al tamaño de las bases.
Cargas permisibles en pilares.
Cargas actuantes en pilotes, hincado de pilotes y configuración final.
Cargas actuantes y de rotura en pilotes basadas en fórmulas estáticas y/o ensayos de penetración.
Pilotes perforados: contribuciones de cargas de adhesión y base.

- Excavaciones profundas:

Diagramas de presiones de tierra en parámetros anclados o apuntalados.
Diagramas comparativos en paredes diafragma.
Estabilidad de la construcción y deformaciones de las excavaciones de pared diafragma con lechadas arcillo-bentoníticas.
Deformaciones de la masa soportada y de fundaciones ubicadas en ella.
Hinchamiento del fondo, en suelos generales (C', ϕ').
Elección del proceso de la depresión del nivel freático, factibilidades, preferencias, riesgos, deformaciones consecuentes.
Tratamiento del suelo (inyectado, etc.) y beneficios resultantes.

- Fundaciones de máquinas:

Diseño para la atención de vibraciones o impactos.
Estimaciones del comportamiento debido a vibraciones.
Estimaciones del comportamiento transmitido de las vibraciones.

- Túneles:

Estabilidad del frente.
Depresión del asentamiento en superficie.
Influencia de la depresión de asentamiento en fundaciones adyacentes.

- Etcétera...:

A modo de ejemplo consideramos en forma un poco más amplia el primer item listado. Un tratamiento análogo podría y debería aplicarse en todos los items.

Cuando aceptamos que rocas fracturadas produciendo pérdidas de agua mayores a 1 Lugeon (¿cómo se ensayó? ¿cómo se computó? ¿cómo se interpretó?) deben inyectarse, ¿no es eso sino la más cruda receta? ¿somos capaces de predecir algo del comportamiento de dicha fundación rocosa (a) si no inyectamos; (b) si la roca estuviera caracterizada por 0,1 Lugeon ó 10 Lugeon?; (c) ¿qué criterios existen, si los hay, para distribuir las perforaciones de drenaje o alivio dentro de la roca? o ¿cómo variarían los criterios de acuerdo al uso o no del inyectado? Y así, sucesivamente. Como bien sabemos, estamos lejos de poder responder predicciones racionales causa-efecto sobre tratamientos comparativos: hemos aceptado las prácticas publicitadas por precepto. Y, si es bastante difícil difun

dir el uso de un precepto determinado, icuan-
to más difícil es revocar su uso después de
que la onda epidémica se ha esparcido, si es
necesario corregir o mejorar!

Como ampliaremos en el punto 4, para la mayo-
ría de estos items, existe un número consi-
derable de trabajos publicados indicando bajo
ciertas hipótesis como analizar las subpresio-
nes, los caudales y gradientes de filtración,
etc. en dicha fundación. Sin embargo, como
todo ingeniero junior responsable argumentará,
después de haber completado todos los cómputos
(a menudo, mediante distintos procedimien-
tos),

(a) ni él está remotamente convencido del
realismo de su cómputo,

(b) ni está en absoluto apoyado en su crite-
rio y decisión en cómo emplear el resultado.

"Their's not to reason why

Their's but to do and die"

(Carga de la Brigada Ligera, Tenny-
son)

"No hay que razonar el por qué,
hay sólo que hacer y morir"

Tal es la naturaleza de una RECETA, y está en
la naturaleza del paciente usar el remedio
con confianza.

En una triada curiosidad-esfuerzo-experiencia,
que en proporciones variables podría definir
la evolución desde la juventud a través de la
adolescencia y hacia la madurez, tanto en
personas como en tecnología, siendo los tres
elementos indispensables para el progreso,
obviamente reconocemos que las recetas usadas
en forma imprudente, lamentablemente los en-
torpecen. Su objetivo es simplemente minimi-
zar (los costos de) el esfuerzo, especialmen-
te aquél desafortunado. Pero, lamentablemente,
lo que más ellos logran es:

(a) nublar las condiciones para la adquisi-
ción de experiencia, porque las recetas son
soluciones PARAGUAS;

(b) matar la curiosidad. Esta es, en verdad,
la consecuencia más perniciosa en la práctica
porque, de la experiencia, el esfuerzo y la
curiosidad, la más importante es la última.

Para algunos espíritus privilegiados, el mun-
do moderno favorece el mantener eterna la lla-
ma de la curiosidad, de la juventud. La in-
vestigación no es una actividad; es una acti-
tud que puede invadir cualquier ocupación. Si
reconocemos que la juventud es un período en
el cual enfrentamos una relación despropor-
cionalmente elevada entre las cosas desconoci-
das y nuevas y las cosas ya aprendidas, el
único hecho afortunado de la agresión del mun-
do tecnológico es que puede mantenernos eter-
namente niños. Y nadie puede negar que en el
mundo de la ingeniería geotécnica, nuestra
humilde, pero estimulante, posición como ni-
ños es mayor que en cualquier otro terreno.
(Memo I).

Finalmente, el efecto integrado deriva del
axioma que la experiencia se gana en la acti-
vidad practicada. Si la actividad es de recur-
so fácil y de curiosidad reprimida por las
RECETAS, el vector de la experiencia consagra
simplemente el subproducto indeseado de otro

elemento de trabajo indispensable de la inge-
nería. Al usar una receta exitosa, podemos
estar usando un paraguas tan grande que exis-
ta un sobre-diseño grande frecuente. No sólo
la sociedad paga, en consecuencia, un precio
inmediatamente elevado: el precio mayor ocul-
to crece con el tiempo. Debe protegerse el
prestigio. Las condiciones de falla son difí-
ciles de cuantificar con una precisión razo-
nable y los Factores de Seguridad se encuen-
tran en debate, pero la falla es un anatema y
debe mantenerse a distancia: honestamente no
adquirimos una experiencia estadística cuanti-
ficable ni de las fallas, ni de los Factores
de Seguridad nominales escasamente entendi-
dos. Si un histograma de comportamientos,
bajo una receta dada, no cruza, al menos oca-
sionalmente, los límites de lo presuntamente
deseable-indeseable, perdemos la posibilidad
de ganar experiencia para uno de los Princi-
pios de Diseño que considero fundamental (Con-
ferencia Rankine, 1977):
Principio de Diseño Nº 5: "Para todo comporta-
miento deseado y asumido, verifique qué ocur-
re, como consecuencia, si no tiene éxito".

¿Cómo se llega a una infructuosa solución
paraguas, de gran sobre-diseño, sino con el
costo consiguiente y los efectos sobre el
costo de vida? Hay que destacar que el perjui-
cio de tales tendencias es peor si las RECE-
TAS y las SOLUCIONES PARAGUAS en la ingenie-
ría geotécnica no son específicas de las con-
diciones locales, como ocurre con la tenden-
cia avasalladora, especialmente a través de
la bien intencionada difusión internacional
de la comunicación y libros autorizados.

Sin embargo, no todo es gris. Llegar a una
solución, aún mediante RECETAS, significa que
admitimos la existencia del problema. Eso ya
significa dos pasos adelante: uno grande es
conocer el problema; otro escalón, es conocer,
por lo menos, una solución aceptable provi-
soria.

4. TEORIZACIÓN Y ANÁLISIS-SINTESIS

Mientras la creatividad se produce, y los
preceptos logran el que hacer de la ingenie-
ría, afortunadamente la ciencia de la inge-
nería acumula. Y es allí donde reside nues-
tro interés y preocupación actual.

Trataré de suministrar mi interpretación, a
pesar del riesgo y la certeza de tropezar con
otras interpretaciones, igualmente válidas.
Después de haber recorrido largamente un ca-
mino, lo que interesa es el avance incremen-
tal con un esfuerzo incremental a lo largo de
cierta dirección, a lo largo de nuestras
propias evaluaciones individuales de supues-
tas direcciones. Lo que debe evitarse es el
movimiento browniano.

4.1. Interpretación personal de hitos

Nuestra Mecánica de Suelos convencional debe
sus primeros pasos exitosos al corte del nudo
gordiano de las complejidades y vagas cali-
ficaciones de la geología, dirigida como una

de las ciencias naturales de la época, y al haber asumido un modelo mental fértil de cuantitativismo determinístico basado en ensayos concienzudos, y acompañado del análisis matemático. El ensayo de consolidación, y su uso en el cálculo de asentamientos, representó básicamente una idealización característica modelo-prototipo. La teorización de la mecánica de suelos fue racional, sobre la base de asociaciones de parámetro único. La clasificación de suelos se determinó mediante la fuerza dominante, los sólidos. La interferencia del agua (presiones "neutras") debió ser separada y sustraida. La mayoría de los parámetros y ensayos creados y en uso fueron conscientes o inconscientemente hacia un concepto dominante, dicotómico: cohesivo, no cohesivo; (C, ϕ^0) o (ϕ , ϕ^0); permeable, impermeable; compresible, incompresible; plástico, no-plástico; estático, dinámico; presiones activas, pasivas; y demás. Hasta cierto punto, podemos percibir que la aún penetrante pseudo dicotomía de los problemas de fallas como distintos de los de asentamientos, y muestras inalterados vs. remoldeados (dejando de lado los inexorables adjetivos, parcialmente inalterados vs. totalmente remoldeados) es un resultado inevitable de la penetrante conciencia de la época. (Memo F1).

En resumen, para beneficio de un progreso rápido de las racionalizaciones en la mecánica de suelos, se empleó la experimentación directa en suelos homogéneos idealizados, y esencialmente en cada problema individual causa-efecto, referido a un simple par de parámetros.

Al hacer una comparación con las actitudes de las ciencias naturales colaterales-salud y sanidad, etc. - uno puede postular que el ingeniero (estructural) puso en la naciente Mecánica de Suelos una mayor proporción de actitud de acción, el síndrome de la solución, más el contexto de ensayo causa-efecto de la Resistencia de Materiales, más la preocupación prioritaria por las fallas (y la directiva colateral para investigar mediante ensayos destructivos).

Mientras tanto, los campos de las ciencias naturales, e incluso aquéllos de la salud y la sanidad, de gran importancia para el progreso de nuestra sociedad, se desarrollaron muy notablemente a pesar de estar restringidos a la observación y los ensayos no destructivos, siendo esencialmente imposibles los ensayos destructivos en los ambientes geológicos y en los organismos biológicos (muerte). Bajo la contención de la observación de miles de unidades del universo estadístico de pequeñas y múltiples causas y efectos interfiriéndose, ayudados, sin duda, por el análisis retrospectivo (back-análisis) de una multitud de casos de extrema falla (muerte inexorable), los campos de las tecnologías biológicas recurrieron a una aplicación más intensa de los elementos estadísticos de múltiples regresiones de parámetro análisis multivariados, análisis de factores, observaciones agrupadas en teoría de la regresión, etc.

Las tasas comparativas de inversión social y

de investigación en los dos enfoques merecerían una evaluación, y en forma correspondiente, las proporciones comparativas de costo/beneficio de las dos tecnologías al servicio de la sociedad a través de la ingeniería civil y la sanitario-médica. El hecho es que la geotécnica in situ es mucho más semejante a las condiciones de la Naturaleza, con muchas pequeñas influencias simultáneas y, en algunos sentidos, la euforia de los éxitos del ingeniero-hacedor con un enfoque determinístico y las subsiguientes correlaciones de parámetros únicos (frecuentemente pseudo-correlaciones, de estadísticas fortuitas) puede ahora pagar el precio de frustraciones ante heterogeneidades. La fase de respetuoso reconocimiento de las sensibilidades de condiciones naturales y de condiciones innatas en cada caso individual como diferente de los demás, llegó a la naciente mecánica de suelos como una secuela de los primeros y rápidos avances, probablemente como problemas de ingenieros consultores sobre vicisitudes incrementadas en importancia y proporción. Podríamos llamarla la fase de la visión de problemas heterogéneos de la ingeniería de suelos. Destacó la experiencia, la cual era excelente e inevitable, pero dejó el sentimiento de que los caminos hacia el logro de la misma eran escasamente cartografiados. (Memo F2).

Habiendo postulado las dos tendencias primeras, sostengo que la clasificación de suelos sobre la base de curvas granulométricas totalmente desintegradas era obvia, teniendo en cuenta el dominio aceptado de los sólidos (partículas), y el interés en sedimentos recientes. Los triunfos iniciales retrasaron luego el reconocimiento de la importancia de las formas de las curvas granulométricas y de las formas de las partículas, etc., las que aún deben ser racionalmente medidas, clasificadas y relacionadas a comportamientos. Además, en las grandes masas de tierra tropicalmente meteorizadas y suelos no-saturados, endurecidos y parcialmente cementados, la incapacidad de ensayar y definir "un tamaño significativo de un conjunto de partículas y su estructura" para una clasificación apropiada del comportamiento del suelo ha llegado a ser una de las dificultades de partida para la adaptación de la mecánica de suelos convencional a la ingeniería.

El reconocimiento de que en tamaños finos de limo-arcilla los comportamientos de la plasticidad asumieron la preeminencia en la clasificación de los suelos fue otro de los primeros pasos significativos. Los ensayos de índices (Atterberg-Casagrande) sobre comportamientos de suelos plásticos se difundieron ampliamente por su simplicidad y han servido considerablemente. Sin embargo, han acumulado críticas, en parte porque se aplican a suelos totalmente plásticizados y remoldeados, y en parte por los ensayos relativamente imperfectos estandarizados y sólidamente atrincheros. Algunos interesantes estudios de investigación en el período 1958-70 ofrecían racionalizaciones seductoras, referidas a la mineralogía, Índice de Actividad fracción-arcilla, succión, resistencias al esfuerzo de corte no drenadas, etc. Pertenecen al período de in-

investigación para comprender los comportamientos de materiales sintéticos remoldeados. Se propuso una excelente teorización sobre los índices del límite líquido y límite plástico, reconsiderándolos en dos simples ensayos de índices de resistencia no drenada, al esfuerzo de corte (del orden de $0,17 \text{ kg/cm}^2$ y unas 100 veces mayor) basado en la línea de estado crítico de suelos remoldeados. Al discutir sobre correlaciones, comentaremos los muy lentos progresos de la propuesta racionalización parcial.

Debe atribuirse gran importancia al reconocimiento de la Estructura y Sensibilidad de las arcillas. Al llevar los hallazgos de laboratorio hacia los elementos del terreno in situ "inalterados", se desprendieron cuatro consecuencias: a.- el comienzo de esfuerzos hacia muestras "inalteradas" e investigación sobre los efectos de la perturbación/remoldeo; b.- el esfuerzo colateral hacia los ensayos in situ; c.- el énfasis en los "ensayos triaxiales" destinados a la investigación del camino de tensiones en el comportamiento tensión-deformación-resistencia; d.- la incipiente conciencia de las variables condiciones $K'o$ para definir los estados in situ de tensión de los elementos del suelo.

La fase de respeto de la investigación por las debilidades sensitivas de las arcillas generó un período extenso de esfuerzos a lo largo de lineamientos de la mineralogía de arcillas, efectos químicos coloidales, tixotropía, pequeños efectos de traza, mejora del suelo por elementos de traza, influencia en la estructura del suelo. Si bien contribuían a la comprensión profunda del investigador de los comportamientos intrínsecos, para los lectores de publicaciones, los efectos pueden haber sido variados debido a los muchos supuestos (en serie) en las correlaciones simplificadas y las condiciones idealizadas. El efecto neto sobre la práctica puede evaluarse como de una mínima relación beneficio/costo.

Los conceptos y soluciones de la ingeniería que suprimieron durante alrededor de una generación los problemas de sifonaje y licuefacción de arena (filtros y criterios sobre ellos, por un lado y relación crítica de vacíos por otro) figuraban entre los primeros hitos más importantes.

Estimulados por las investigaciones de las arcillas de Londres (London Clay), se realizaron importantes avances sobre los principios del comportamiento de la resistencia al esfuerzo de corte de arcillas preconsolidadas y arcillas fisuradas. Pero, mientras que se promovían los ensayos triaxiales del camino de tensiones, el hito principal es el reconocimiento de $K'o$ en las tensiones in situ, justificadamente diferente del asumido $K'o = 1 - \sin \phi'$ (característico de las condiciones normalmente consolidadas).

Indudablemente, la conferencia sobre Investigación de Resistencia al Corte de Boulder, Colorado ASCE, 1960, es uno de los hitos principales de la madurez de la mecánica de suelos. Los criterios de fallas (Mohr, relación

efectiva principal de tensiones vs. tensión desviante), predominantemente los ensayos de deformación controlada y los análisis de presión efectiva (vs. presión total) ganaron terreno de un modo tan convincente que, posiblemente, el péndulo podría oscilar hacia atrás un poco, por ejemplo, en casos especiales de comportamiento de colapso (sugiriendo análisis de tensión controlada, carga blanda, tensión y presión total). Sin embargo, seguidamente los ajustes que surgieron de las fallas observadas de talud de $FS = 1,00$ en los análisis del círculo de deslizamiento, fué una exageración determinística que aún transmite influencias indeseables en el pensamiento y en la práctica de la geotécnica. (Memo F3).

Paralelamente, debemos destacar los casos impactantes de la presa Malpasset (1959) y del deslizamiento del embalse de Vajont (1963) como generadores de la Mecánica de Rocas y de la importancia de la discontinuidad débil.

En el diseño de fundaciones poco profundas, la conciencia de deformaciones como preocupación principal había sido camuflada bajo los reducidos coeficientes de resistencia (Terzaghi, etc.) de una "falla local en materiales compresibles". Gradualmente, sin embargo, la práctica cayó por la borda y toda la atención se concentró en computaciones de asentamiento más realistas a ser comparadas con RECETAS de deformaciones limitantes permisibles propuestas. En fundaciones profundas, un hito especial podría ser la Conferencia de Londres sobre Pilotes Excavados de Gran Diámetro donde se enfatizaron las co-participaciones diferenciales de carga-asentamiento de adhesión y de la base y, nuevamente, se destacaron los criterios de asentamiento en comparación con las formulaciones de resistencia de análisis-límite. El punto decisivo más significativo sería probablemente concedido a las presentaciones hechas en París (1961) de los ensayos de carga en pilotes en escala-prototipo de la estación Chevreuse-Iraba mostrando la significativa limitación en las formulaciones teóricas rígido-plásticas de la capacidad de carga aumentada con la profundidad.

No es necesario mencionar como la muy reconocida cosecha dominante de los últimos 15 años, a los análisis de elementos finitos y un buen número de soluciones analíticas para comportamientos elásticos y elasto-plásticos de las masas de suelos, e interacciones suelo-estructura.

Puede estimarse que la capacidad computacional para tensiones y deformaciones se ubique unas décadas adelantadas con respecto a las capacidades para proporcionar datos de entrada genuinos, y obtener beneficios de la información de salida resultante, para decisiones sensatas. Como resultado de estos rápidos avances se produjeron las propuestas para ecuaciones constitutivas.

A través de unas aproximadamente tres décadas de esfuerzos para aplicar la mecánica de suelos convencional, se han producido muy significativos: a.- avances en ensayos in situ

(especialmente destacados cuando las muestras -inalteradas-más-ensayos de laboratorio cayeron bajo un gran cuestionamiento); b.- listados e informes sobre suelos peculiares, no-saturados, fisurados, expansivos, colapsibles (loess, etc.), saprolítico, laterítico, arcillas vivas, etc., reclamando una teorización más generalizada.

Dentro de los esfuerzos de investigación y prueba en los últimos años ha existido un lento crecimiento de la estadística simple para cubrir heterogeneidades. Debe destacarse la utilidad decreciente de la mera estadística cuestionable o espuria.

Finalmente, merecen una mención especial las observaciones de campo y los casos históricos. Terzaghi tempranamente destacó la importancia de las observaciones de campo, pero es como si los casos históricos estuvieran destinados a constituir una advertencia de extravagancias ejemplificando la importancia de la "experiencia", más que la documentación para un histograma de tendencias naturales cuantificables, de las cuales se obtiene la experiencia. En los esfuerzos hechos con miras a la PREDICCIÓN del comportamiento, otro hito significativo, las frustraciones se expusieron repetidamente en los últimos doce años. La imposibilidad de predecir ha sido un principio fundamental como resultado de los ensayos del camino de tensiones esperanzadamente minuciosos, y de la computación sofisticada. Algunas de las frustraciones se atribuyeron a las cuestiones sobre estados in situ de tensión, destrucción de muestras ante un muestreo-ensayo típico, invalidación de deformaciones y principalmente de pequeñas deformaciones aún cuando las condiciones de falla de la muestra permanecen relativamente no afectadas, etc. Se ha abierto ampliamente una puerta hacia los pronósticos probabilísticos y las aplicaciones de la teoría de decisión. Debe destacarse que en muchas de tales aplicaciones pioneras, los intentos son mucho más meritorios que los métodos, los resultados, o especialmente las exigencias. (Memo F3).

La línea reciente más remarcable de desarrollo se encuentra relacionada con la instrumentación observacional. El primer objetivo apunta hacia la confirmación de teorías y diseños, y, por lo tanto, ha recibido ayuda, pero también, de algún modo, pre-puesta una camisa de fuerza. Sin embargo, las posibilidades seriales son incalculables: por ejemplo, ya existen algunas exitosas tendencias hacia la advertencia sobre umbrales de daños a través de registros sofisticados de generación micro-acústica, etc.

4.2. Correlaciones dominantes de primera aproximación

Han existido repetidas advertencias en el sentido de que la mayoría de las correlaciones establecidas en la primitiva Mecánica de Suelos para ayudar al geotécnico, prácticamente sirvieron para clasificar algunas inter-relaciones perceptibles, pero ni satisfacen en concepto, ni son suficientemente

útiles en la práctica para cuantificar estimaciones.

Las críticas principales son que, habiendo sido extraídas de una experimentación de laboratorio idealizada: a.- eran correlaciones de parámetros únicos, generalmente sin un mínimo reconocimiento de aún un segundo parámetro significativo interviniente; b.- estaban generalmente establecidas por un ajuste visual de las líneas rectas mejor asumidas, sin considerar el significado de las dispersiones; c.- se basaban en ensayos de muestras remodeladas, sin indicaciones de efectos naturales de estructura, tiempo, cementaciones, compresiones secundarias, etc.

En verdad, sin embargo, detrás de estas críticas, yace un concepto, según el cual no se hizo el mínimo esfuerzo para unir con otras correlaciones y datos los mismos o parecidos parámetros y las implicaciones teóricas. La razón debe haber sido la psicología determinística de pares únicos de relaciones dominantes causa-efecto y probablemente existió la presión psicológica por la urgencia de "publicar o perecer", el COMPLEJO EUREKA.

Consideramos en forma separada algunos ejemplos relacionados con las arcillas remodeladas, ya que por lo menos sobre éstas debe haber una reproductividad de ensayos, y las dispersiones deben ser atendidas como tendencias definidas y significativas, requiriendo múltiples regresiones, etc.

a.- Compresibilidad virgen - Arcillas remodeladas

La muy útil y simple correlación $C_c = 0,007 (W_L - 10)$ necesita ajustes. Las dispersiones alrededor de ella deben tener justificaciones identificables y correlacionables. Por ejemplo, para comenzar, considerando que para un W_L determinado existe una amplia gama de valores I_p posibles en suelos de composiciones diferentes, es increíble que, en la arcilla remodelada, C_c no deba expresarse para reflejar alguna interferencia de I_p como un segundo parámetro mínimo, aunque la clasificación en la Carta de Plasticidad de suelos arcillosos haya enfatizado tal interferencia dual. Existe la intuición de que a un W_L dado, los suelos con un mayor I_p deben arrojar un marcadamente mayor C_c . ¿Está comprobado, y qué correlación $C_c = f (W_L, I_p)$ puede ofrecerse como correctiva?

Además, es muy probable que pudieran existir también algunas influencias de granulometría (contenidos de inertes) y relación de vacío inicial, ya que no es razonable esperar que estos parámetros físicos obviamente influyentes afecten de una manera similar tanto los ensayos de Índice de Plasticidad como la compresibilidad virgen. (Fig. 1).

Por lo tanto, destaquemos los cambios de actitud requeridos. En la naturaleza, todo es diferente a menos que se compruebe aceptablemente similar, todos los factores intervienen, a menos que se comprueben suficientemente in-

significantes (función del problema). Mientras tanto, para los pioneros fué importante poder concentrarse en el tema mayor y único para no perderse en dispersiones. El problema es que "los nuevos estudiantes no conocen las viejas lecciones", y los viejos estudiantes (ya que todos somos eternos estudiantes) han generado para los viejos problemas el desprecio de la familiaridad. La difusión del análisis-síntesis geotécnico alcanzó círculos relativamente insensibles a los comportamientos fundamentales y las simplificaciones convencionales. Nuestros grandes mentores de los primeros días de la ingeniería de suelos enfrentaron las humillantes complejidades de los problemas no cuantificados e hicieron un esfuerzo para lograr correlaciones convencionales, que ellos bien reconocieron como convencionales, idealizadas y simplificadas; de este modo, al aplicar una simplificación, llevaban consigo el beneficio pleno de la sabiduría de aquéllos que parten de la complejidad de la realidad y dolorosamente llegan a la capacidad para destilarla, obteniendo las esencias de la simplicidad necesaria para resolver el problema. Se le ha enseñado a una nueva generación de geotécnicos las soluciones simplificadas como si las ecuaciones fueran la realidad, y las dispersiones, posibles errores, generalmente sin el suficiente énfasis en las hipótesis: y, de tal manera, la racional simplicidad de las racionalizaciones ha seducido y suprimido toda sumisión hacia la Naturaleza.

b.- Coefficiente de la presión lateral en reposo $K'o$, arcilla remoldeada e inalterada

Un segundo ejemplo se refiere a la sugerencia de que en arcillas "típicas" normalmente consolidadas, el convencional $K'o = 1 - \sin \phi'$ esté sustituido por una regresión lineal $K'o = 0,44 + (0,42) I_p/100$ para $20 < I_p < 80$ y esto, esencialmente indistinto de ser "alterada" o "inalterada".

Primeramente, nos gustaría sustituir la dicotomía alterada-inalterada por valores de sensibilidades parciales S_{tp} y, de ser posible, corregir cualidades variables de muestreo-ensayo mediante alguna forma de extrapolación hacia lo que podría posiblemente ser el comportamiento íntegro de los elementos del suelo. (Fig. 2). La importancia de este comportamiento en deformaciones pequeñas merece, en este momento, una creciente atención por las reconocidas frustraciones con las predicciones de las mismas. Además, debe reconocerse que, en nuestro uso de la "experiencia" en proyectos anteriores, debimos hacer todos los esfuerzos para adoptar los parámetros mencionados de calidades de muestreo-ensayos de diferentes períodos y regiones. Ha habido un esfuerzo sistemático e inexorable para mejorar el muestreo-ensayo inalterado. Es así que, uno de los errores inaceptables de juicio es suponer que los valores citados de resistencia y deformabilidad de un proyecto de arcilla determinado (ej.: Londres) en 1952 pueden agruparse en el mismo universo estadístico con aquéllos de un proyecto adyacente en 1982. Con las condiciones de descarga (o pre-

sión activa), podemos ser conservadores empleando conclusiones de los años '50 y '60, pero muy por el contrario ocurre con las de carga (o presión pasiva). En ésta, la asociación de comportamientos con resistencias erróneamente bajas, y elevadas deformabilidades, puede promover un ciclo de diseños desfavorables.

De cualquier modo, han existido repetidas indicaciones de que no debemos aceptar ciegamente $\phi'_{\text{inal}} = \phi'_{\text{remol}}$, y muchos otros factores significativamente afectados por una compresibilidad al corte (u_f , etc.) se diferencian marcadamente en los estados inalterado y remoldeado. Por consiguiente, ¿no resulta extraño que un parámetro in situ inalterado (en reposo) esté correlacionado con un índice remoldeado estrictamente empírico (I_p) y luego, se postule como inafectado por la diferenciación radical "inalterado vs. remoldeado" (incluso en arcillas muy sensitivas)?

El problema no es académico, pero de suma importancia. Citando a Wroth, 1975, informe "Medición in situ de tensiones iniciales y características de deformación", Conferencia ASCE, "la atención se centra en la incertidumbre de cualquier medición de laboratorio de $K'o$ (el coeficiente de la presión de tierra en reposo) y la dificultad de hacer mediciones precisas en el campo". Sin embargo, dediquémonos simplemente a las arcillas remoldeadas.

Existen, por ahora, muchas soluciones analíticas sugeridas así como también ecuaciones estrictamente empíricas deducidas, y en algunas de las deducciones se empleó también una mezcla libre de ecuaciones analíticas y correlaciones vigentes de parámetros únicos. La sugerencia adicional aquí ofrecida (Fig. 5b) intentaría mostrar que la misma información citada continuaría en acuerdo, muy satisfactoriamente, con referencia a las regresiones no-lineales, que se creía estar más de acuerdo con las tendencias teóricas.

Comenzamos adoptando relaciones exponenciales de agotamiento para ϕ' vs. I_p como se acepta intuitivamente (Fig. 3) y corroborado experimentalmente, no obstante las comprensibles amplias dispersiones. Luego tratamos de no transgredir las evidencias de los valores extremos de $K'o$ normalmente consolidado, correspondiendo aproximadamente a $\phi' = 30^\circ$ para $I_p = 5$ y $\phi' = 5^\circ$ para $I_p = 350$ (sodio-bentonita), así también como la tendencia asintótica $K'o + 1,0$ cuando $\phi' + 0^\circ$. La creencia básica es que no debemos sacrificar el reconocimiento intrínseco de $K'o$ (normalmente-consolidado, en reposo, por lo tanto en condiciones de límite respecto a la elasticidad teórica) como generado por una función de la tensión de corte, y así dando forma a un factor de seguridad con respecto a los límites de resistencia al corte. De esta manera, en la Fig. 4, resumo una alusión a métodos de práctica profesional de hipótesis de trabajo sobre el supuesto cuerpo de una teorización aceptada, y cierta observación pragmática mínima.

Arriba se encuentran las ecuaciones varias

veces mencionadas en los libros. Una comparación directa de la expresión simplificada $K'o$ (nc) con el criterio de falla de Mohr-Coulomb, sugiere que las condiciones $K'o$ prevalecen sobre un factor de seguridad mayor de $FS = 1 + \sin \phi'$. Es así que la variación $K'o$ (nc) con I_p debería correlacionarse con aquella de $\phi' = f(I_p)$. Incidentalmente parece razonable que se asuma que las condiciones $K'o$ prevalecen hasta un $FS = 1,5$ para un material de $\phi' = 30^\circ$ ya que es frecuente observar en esos materiales un comportamiento lineal tensión-deformación hasta $2/3$ de la tensión pico de desviación. Sin embargo, para materiales con un ϕ' bajo, habría una conclusión desconcertante de comportamiento "en reposo" hasta factores de seguridad mucho más bajos. (Fig. 5).

Podríamos seguir un poco más a lo largo de la misma línea con respecto a los valores $K'o$ (ocr) bajo diferentes condiciones OCR. En una arcilla preconsolidada, si se supone la envolvente completa de resistencia, incluyendo el tramo con cohesión, y si arbitrariamente mantenemos constante la razón del FS de envolventes "elásticas" en reposo a envolventes de tensiones en rotura, podríamos determinar trigonométricamente la banda de razones de tensión $K'o$ (ocr) posibles a través de la mayor parte del rango preconsolidado. Apuntará la investigación a examinar tales hipótesis de trabajo? Una vez más, para comparar diferentes suelos arcillosos, reapplicaremos razonamientos similares a los valores variables ϕ' como función de I_p . Obviamente, interferirán otros parámetros y razonamientos por ser más dominantes. Sin embargo, ¿cómo podemos descansar satisfechos sin examinar el método en nuestra locura? (Fig. 4c, 5c).

c.- Resistencia al corte no drenada-cohesión

Uno de los parámetros-índice de gran interés para la primitiva mecánica de suelos fue la cohesión de arcillas. Los materiales altamente arcillosos se asociaban automáticamente con la cohesión elevada: ésta se obtenía aproximadamente como la mitad de la resistencia de compresión no confinada. Luego vinieron los ensayos triaxiales UU (δQ) y CU (δR) para recuperar algo de la cohesión que se consideraba inexorablemente pérdida con el muestreo y los ensayos, mediante a) alivio de tensión total; b) alivio de presión de pre-consolidación.

Inevitablemente, llegaron los avances de la investigación triaxial de corte, asociando la resistencia de corte no drenada, directamente con la pre-consolidación. Mientras tanto, se propuso una "correlación" estrictamente empírica y a menudo repetida de allí en más, para c_u vs. p_c , habiéndose asociado la correlación de parámetros únicos con I_p . Las arcillas fueron automáticamente relacionadas con la plasticidad; por lo tanto, la cuantificación de arcillosidad debe estar reflejada por el índice de plasticidad (indicador de plasticidad). Curiosamente, las ecuaciones son tales (ver Fig. 7b) que, cuanto más elevada es el I_p , mayor debe ser la cohesión para una determinada presión de consolidación.

Muchos geotécnicos han dedicado cierto cuestionamiento a la tendencia de que la teorización convencional parecería ser directamente opuesta a la tendencia anticipada. Deben citarse, entre otros, Bjerrum y Simons, 1960, Conferencia de Investigación de Corte de Boulder. Las tendencias anticipadas de acuerdo con la teorización convencional están reflejadas en las Figs. 3, 6 y 7. ¿Cuál es la explicación de la discrepancia?

Las primeras sospechas y preguntas serían con respecto a los valores de ensayo de c_u y p_c empleados, especialmente si surgieran de "muestras inalteradas". El asunto está en suspenso, si bien la correlación empírica encuentra un uso frecuente. Para un valor dado de W_L , existe una amplia gama de valores posibles I_p (Carta de Plasticidad). Las derivaciones simplistas que aparecen en las Figs. 6 y 7 tienen por objeto mostrar la importancia de la investigación de las regresiones de c_u/p_c vs. el par de parámetros de plasticidad (W_L, I_p). Las derivaciones asumen que podríamos atribuir intuitivamente tendencias para la interferencia probable del segundo parámetro, no incluidas en las presentemente citadas correlaciones, $C_c = f(W_L)$ y $\phi' = f(I_p)$. En el gráfico (Fig. 7A), se concluye que alrededor de la línea A, la resistencia no drenada S_u a la humedad W_p variaría alrededor de 8 kg/cm^2 (aparentemente muy alta de acuerdo con la experiencia general) y que los valores bajos, tales como $S_u(W_p) = 1.7 \text{ kg/cm}^2$ (Wroth y Wood, 1978) podrían ser sólo compatibles con arcillas de muy baja plasticidad, bien por debajo de la línea A.

Mientras tanto, en la Fig. 7B, no habría más que un pequeño rango de coincidencia de S_u/p_c con C/p_c , con las arcillas de la línea A alrededor de (W_L, I_p) de unos (100,60); para la mayoría de las combinaciones viables de (W_L, I_p), habría una diferencia muy significativa entre C/p_c y los valores ideales simplificados de S_u/p_c .

¿Por qué las arcillas por encima de la línea A son "grasas" y "duras"? Se sospecha que la razón por la cual la tendencia teórica asumida resulta invertida puede residir en el hecho de que c_u está más influenciado por "las tensiones neutras internas" que lo que imaginamos como resultado de nuestro modelo físico. Además de la tensión capilar (presión neutra negativa), podría existir una interferencia de atracciones y repulsiones intercoloidales mineralógicas de la arcilla para ayudar a retener la energía de la compresión. Posiblemente, una medida de tales tendencias podría estar insinuada por la curva de histéresis entre C_c y C_e de cada material. Como su ponemos, el área de tal histéresis no aumentaría paulatinamente en la dirección del creciente C_e (por lo tanto, W_L y/o I_p), pero parece mostrar una forma-plato, pasando a través de un mínimo con condiciones moderadamente arcillo-limosas.

¿Cuánto llevará investigar y clarificar estos puntos?

d.- Teoría propuesta simplificada-unificada

para índices de plasticidad

Algunos conceptos pertenecientes a la Mecánica de Suelos del Estado Crítico se han utilizado para proponer una base de teorización para la importancia de los contenidos de los límites líquido y plástico de arcillas (remoldeadas), (Wroth y Wood - 1978). En verdad, ya que los ensayos de límites de Atterberg fueron considerados generalmente como imperfectos ensayos empíricos de índices, cautiva nuestra imaginación encontrar los dos valores absolutamente independientes, groseramente asociables por una teoría unificada. De esta manera, se llega a la propuesta de que "las propiedades índice (sean) lógicamente redefinidas simple y directamente en términos de la resistencia no-drenada del suelo" y que "pronto se adopte el concepto razonado para redefinir el límite plástico como aquél contenido de agua que da un aumento de 100 veces en la resistencia al corte sobre aquélla correspondiente al límite líquido".

¿Qué maravilloso es que las intuiciones de hace tanto tiempo, Atterberg 1911, encuentren respaldo en la simple lógica de la resistencia al corte de un modelo teórico tan moderno como la teorización del estado crítico de la arcilla de Cam! Sin embargo, a los fines de la ingeniería cotidiana, avanzamos en la práctica proponiendo la supremacía de una lógica de parámetros únicos como sustituto de los ensayos de "clasificación" de plasticidad?

Si examinamos más cuidadosamente, hallamos que las derivaciones lógicas dependen mucho de simplificaciones asumidas y condiciones promedio (N.B.: la línea A fue inicialmente una relación promedio propuesta de $I_p = f(W_L)$, ver de Mello, Sydney 1979), y también del deseo de una teoría de comportamiento-unificado. ¿Es realmente "constante" la resistencia al corte no-drenada s_w de las arcillas? Definitivamente, no (Youssef y otros, 1965; Wroth y Wood, 1978); la variación de 25 a 13 g/cm² para $30 < W_L < 180\%$ es muy pequeña en resistencias, pero no así en proporciones, y es presumiblemente consistente. ¿No son las resistencias al corte medidas en W_L y W_p realmente más que resistencias al corte no drenadas convencionales, a diferentes valores c y p_c ? ¿No sufre una arcilla limosa algunos efectos dinámicos en el límite líquido del "problema de inestabilidad de talud"? ¿Una sodio-bentonita no evidenciaría razonablemente un efecto contrario de mayor resistencia al corte de "impacto"?

Pueden plantearse muchas de estas preguntas antes de que los geotécnicos llegaran a sentirse seguros de que una gama razonable completa de condiciones ha sido cubierta por la nueva y excelente teoría, de modo de decidir pasar la posta en la carrera de relevos de teorías competidoras.

Sin embargo, el punto principal que puedo plantear se refiere específicamente al intento. ¿No reconocemos que la "personalidad de la plasticidad" (aún remoldeada) de suelos arcillosos está representada por una amplia

gama y número de grupos taxonómicos? ¿No es la clasificación e identificación un intento de hacer notorios los grupos taxonómicos diferenciados? ¿No es la demostración de que una única relación matemática simplificada podría representar "todas las arcillas" un deseo diametralmente opuesto a aquél de identificación y clasificación de diferencias?

Indudablemente deberían mejorarse las técnicas de ensayo para disminuir los errores erráticos, pero no para suprimir las diferencias consistentes, por pequeñas que sean. Mi indagación y denuncia (Sydney, 1979) sobre la Carta de Plasticidad como una fotografía de suelos diferenciales es que el gráfico está mal concebido porque encierra a todos los suelos dentro de un estrecho marco.

Una vez más, no podemos sino destacar cuánto lugar hay para el trabajo y el desarrollo, incluso en un problema tan básico.

4.3. Correlaciones pseudo-estadísticas y necesidades de la ingeniería

El lugar que ocupan las CORRELACIONES en la ingeniería es muy importante como un paso de adelanto al uso de las RECETAS para soluciones de trabajo. Las RECETAS proporcionan amplias SOLUCIONES PARAGUAS, en el aspecto conservador, de modo de poder ejercitar las decisiones y acciones garantizando que, la solución es mejor que lo "mínimo necesario". Por consiguiente, he destacado que en la Ingeniería Civil y Geotécnica, la experiencia se recoge de la "silenciosa mayoría de casos" que no proveen en absoluto a ningún trabajo de divulgación; por lo tanto, no es necesario que nos descorazonemos ante la incapacidad de predecir qué ocurrirá, o deberá ocurrir, porque, en general, es suficiente predecir qué es lo que no ocurrirá.

Sin embargo, la economía en la Ingeniería Civil, y especialmente en la Geotécnica, es de crucial importancia para la Sociedad y su costo de vida; lo que más importa son los menores costos y los primeros costos enterrados que actúan como la primera prima de seguro en todo lo que sobre él se apoya.

Es así que surge la importancia de las CORRELACIONES. Estas deben ayudarnos a acercarnos a los límites de la impunidad, mejorando nuestra capacidad de predecir lo que probablemente ocurrirá.

Obviamente, las correlaciones deben ser estadísticas. La mecánica y la ingeniería de suelos han llegado gradualmente a ese reconocimiento. Pero ¿estamos derivando y empleando las correlaciones estadísticas de una manera satisfactoria?

La respuesta más general es un NO categórico. Hasta ahora, las aplicaciones no satisfacen a los hombres de experiencia, que frecuentemente son capaces de estimar las "probabilidades anteriores" (Bayesiana) y también las "probabilidades posteriores" (el Método Observacional Cuantificado) de parámetros y resultados significativos dentro de bandas más angostas

de indeterminaciones, que lo que sugieren las publicaciones y los datos. Tampoco satisfacen al ingeniero geotécnico practicante, quien no sabría cómo tener que decidir sobre proyectos de responsabilidad ante tan amplias dispersiones.

Las publicaciones recientes se encuentran llenas de ecuaciones y gráficos de regresión estadística, tales como los seleccionados casualmente para reproducir en las Fig. 8, 9, 10, sólo para ilustrar algunos puntos de discusión. Pueden destacarse los siguientes cuatro puntos en la mayoría de estas "regresiones de parámetros únicos casuales":

a.- En muchos casos, las dispersiones son mayores debido a los datos de ensayos que los que ocurrirían en la realidad. "Natura non facit saltus": las excentricidades de la Naturaleza generalmente no son radicales; tienden a seguir rumbos moderadamente suaves de variación. (Incidentalmente, sin embargo, cuando la geología presenta una abrupta discontinuidad, no es casual, ni una dispersión, sino un definido efecto de una causa determinística, aún si pudimos no haberlo sospechado o conocido). Por otra parte, debido a la muy pequeña escala de la mayoría de los ensayos geotécnicos, y la capacidad destructiva de hombres y máquinas, los ensayos tienden a sufrir y reflejar variaciones más erráticas que las finalmente observadas en los prototipos.

Como ilustración de tal experiencia, se podría hacer referencia a datos reproducidos de destacadas publicaciones y bastante representativas de las dispersiones de los comportamientos de bases en arenas (Fig. 12) y/o de parámetros de pilotes inyectados e hincados bajo condiciones plenamente investigadas. Las dispersiones aparecen como desalentadoras. Sin embargo, la silenciosa mayoría de exitosas fundaciones, diseñadas de acuerdo con estudios mucho menos minuciosos, no confirmarían las probabilidades de asentamientos diferenciales significativas, que resultarían de la aplicación de datos tan dispersos.

b.- Un notable número de publicaciones proporcionan las ecuaciones de regresión para la correlación simplemente entre los valores promedio de X vs. Y. Lo menos que podría y debería hacerse a modo de complemento es proporcionar las bandas de por ciento de confianza con respecto al promedio. Una RECETA sólo puede interpretarse como una recomendación de límite inferior o superior, conservadora: por lo tanto, si queremos sustituir una CORRELACION por una RECETA, con toda justicia, debemos usar una ecuación de una banda-confianza-por ciento, de límite inferior o superior.

Además, es importante distinguir, en concepto, entre tales bandas de confianza alrededor de promedios, en comparación con aquellas de eventos únicos. Para un ingeniero que construye 1000 casas, para una venta posterior, puede ser bastante apropiado trabajar con bandas de confianza sobre promedios. Sin embargo, para el ingeniero que construye una

casa única para un cliente determinado, sería injusto discutir otra cosa más que las probabilidades de un evento único. (Fig. 8).

c.- Debido a muchos factores, incluyendo los ya mencionados, es comprensible que, con el intento de mejorar correlaciones, un número de trabajadores especialmente dedicados haya recurrido a correlacionar una vasta cantidad de información. Si el universo estadístico fuera con toda seguridad el mismo, el considerable aumento de información ayudaría, pero principalmente con respecto a promedios y bandas de confianza alrededor de promedios.

Sin embargo, es utópico esperar universos estadísticos basados sólo en un par de parámetros sin incluir parámetros significativos adicionales que, de sitio en sitio, harían el universo tan diferente como para quitar mérito a cualquier correlación significativa. Por ejemplo, si tratamos de correlacionar los resultados CPT o SPT vs. ensayos de carga de placa, encontraríamos que la interferencia de precompresiones (OCR y el variante K'o, etc.) de sitio en sitio aumentaría la dispersión de puntos individuales alrededor de la regresión media en vez de disminuirla.

d.- Finalmente, debe destacarse que una correlación de trabajo de un sitio específico tiende inevitablemente a convertirse en ilegítima al trasladarla a otros sitios, debido a la imposibilidad de insertar ajustes para compensar los otros muchos parámetros de relativa importancia, que no están explicitados. Es ahí donde reside la fuente de error y frustración más frecuente de la ingeniería geotécnica actual. Si un autor ha demostrado que se encontró una razonable correlación: $X = f(Y)$ en algunos sitios y suelos, otros geotécnicos podrían muy bien beneficiarse con la indicación del tipo de correlación ofrecida (si se justifica); pero no deben proceder a emplear la ecuación específica (etc.) sin algún(os) intento(s) de insertar factores de ajuste, deseadamente razonables. Lamentablemente, cuanto más dedicado es el geotécnico, más probablemente resulte contribuir a la entusiasta importación de ecuaciones inadaptadas e inadaptables.

¿Es necesario comentar la seducción de los gráficos log-log para linearizar ecuaciones o para disfrazar los verdaderos anchos de las dispersiones? (Figs. 8, 9 y 10).

5. APRECIACION DE ALGUNAS "SOLUCIONES PRACTICAS DE LA INGENIERIA"

Como la ingeniería geotécnica es nuestro interés principal, al evaluar el estado alcanzado y la necesidad real para revisiones sinceras, voy a limitarme sino a unos pocos ejemplos de sentencias dominantes en la práctica corriente.

5.1. Presas de núcleo arcilloso - Plasticidad del núcleo

Está ampliamente reconocido y señalado que

una de las grandes inquietudes en las elevadas presas de tierra y enrocado radica en la posibilidad del agrietamiento transversal del núcleo debido a asentamientos diferenciales, distorsiones. Aunque sólo unas referencias dispersas implican que la única preocupación estriba en el agrietamiento por tensión (que sólo se producen en la parte superior) ya que los desplazamientos de corte-plano tienden a hacer a éste más impermeable, y no lo contrario, aceptamos el problema como es generalmente estipulado. El requerimiento cualitativo estándar para evitar el problema es un "núcleo plástico". Aquí encontramos un ejemplo importante de algunas de las confusiones que deben expurgarse, generadas por simples asociaciones irracionales de palabras cuando una de éstas está vagamente definida. (Fig. 11).

Lo que realmente se desea es el "comportamiento plástico" ante bajas presiones de confinamiento, es decir, la capacidad de soportar grandes deformaciones sin "fisurarse", es decir, "la fisuración, abierta, en tensión".

Como una primera asociación de palabras cuestionables, uno encuentra este requerimiento transformado en aquél de grandes deformaciones ante la falla por corte en ensayos triaxiales: cuestionable, pero de algún modo aceptable, porque en las curvas tensión-deformación "frágiles" vs. "plásticas", es en las primeras que tiende a producirse la fisuración abierta.

Es en el próximo paso que se produce la sorprendente confusión, porque se confunde el comportamiento de la plasticidad con el índice de la misma. Este último representa una potencialidad, una esencia de ser, una escala de contenidos de agua sobre los que un suelo presenta un "estado plástico". Mientras tanto, el propósito se refiere a un comportamiento plástico a una condición dada (temporaria), como compactado a un contenido de agua dado, la humedad correspondiente al óptimo del Proctor, por ejemplo. Ocurre que los suelos de elevado I_p deben ser compactados a contenidos de agua por debajo del límite plástico W_p debido a problemas inherentes de compactación.

De acuerdo con mi experiencia (de Mello, ICOLD, Madrid 1973) sólo para los valores I_p intermedios (aprox. $7 < I_p < 22\%$) el contenido de agua de compactación Proctor es más húmedo que W_p . De todos modos, no hay una lógica en la asociación de palabras entre índice de plasticidad y comportamiento plástico, tensión-deformación al contenido de agua conforme compactado. (Fig. 11).

5.2. Fundaciones de zapatas, arenas

Si bien los asentamientos en arenas están generalmente reconocidos por ser mucho menores que en materiales arcillosos, se ha difundido que en fundaciones poco profundas (zapatas, plateas) en arena, lo que rige el diseño es el problema de los asentamientos diferenciales. Las arenas se asocian generalmente con depósitos más turbulentos y, por lo tanto, más erráticos. Por consiguiente, los

asentamientos diferenciales no difieren mucho de los asentamientos máximos totales.

La ingeniería de fundaciones ha luchado mucho tiempo con las dos etapas del problema: a.- correlacionar los ensayos índice con las "zapatas modelo", ensayos de carga con placa; b.- establecer métodos de extrapolación, de placas a zapatas de tamaños completos.

En la Fig. 12 (D'Appolonia y otros, 1968, 1970) se resume el nivel actual de sofisticación que puede pretender ser el mejor que ha ofrecido la mecánica de suelos al profesional. ¿Se puede estar satisfecho con tales amplias proporciones de dispersión?

Sabemos que una arena precargada prácticamente no expande; por lo tanto, la precarga debe tener un aspecto destacable en la reducción del asentamiento y asentamiento diferencial. Obviamente, sin embargo, las pequeñas densidades incrementales del elemento del suelo $dx.dy.dz$ no proporcionan influencias destacables en la resistencia. Por lo tanto ¿es de extrañarse que un índice de resistencia no pueda reflejar fácilmente mejoras en la incompresibilidad? Si están en juego dos incógnitas influyentes (empaque inicial reflejado en la fricción, más OCR de precarga), ¿podemos tener la esperanza de resolverlas con una sola ecuación? ¿No debemos tratar de mejorar los medios para predicciones de diseños mediante un perfilamiento diferencial, de modo de emplear mayor número de ecuaciones simultáneas, de mayor sensibilidad, para resolver las incógnitas necesarias?

5.3. Ejecución de túneles en suelo blando

El progreso de la ingeniería puede tipificarse por la sentencia: "hacemos, luego comen zamos a explicar y comprender, y gradualmente podemos y debemos cuantificar".

Con respecto al diseño de túneles, existen algunas simplificaciones verdaderamente remarcables de tiempos anteriores, que deberían haber sido reconocidas, pero se vieron empañadas y, por lo tanto, se puede manifestar que temporariamente se impidió una etapa intermedia. Y, como ocurre a menudo, las percepciones físicas, categorizadas y simplificadas, fueron empañadas por el hecho de que, durante cierto tiempo, un precepto pseudo-teórico distrajo la atención.

Los problemas eran "cohesión" bajo liberación lateral de tensión, filtración y "tiempo de auto-soporte". Extrañamente, el énfasis de la teorización de la mecánica de suelos, en relación a las arcillas blandas saturadas bajo carga (no drenada) "rápida" (1942-'60) dominó el panorama tan rotundamente que casi podríamos decir que, para la ingeniería práctica de túneles (Peck 1969, casi hasta la fecha), prácticamente olvidó los factores realmente dominantes de liberación de tensión, filtraciones y tiempo de auto-soporte.

La Fig. 13 presenta esquemáticamente, en la forma de perfiles hipotéticos del subsuelo, los parámetros de conocimiento reconocidos en

los dos períodos arbitrariamente citados (c. 1946 y c. 1969) que representan hitos de referencia. En comparación, un perfil actual, mostrado junto al otro, destacaría muchos parámetros obvios fundamentales de necesidad. En primer lugar, entre los avances de los últimos veinte años (después de la Conferencia de Investigación de Corte de Boulder, 1960, etc.) se ha puesto énfasis en los análisis de tensión efectiva y presiones de poros (red de escurrimiento u más Δu debido al ΔV del corte), los ensayos apropiados del camino de tensión, reconocimiento de la importancia del aire en los poros (S%), reconocimiento de la gama de variaciones e importancia de K^0 , y, finalmente, en la cresta, y como resultado de la onda computacional, los parámetros de "elasticidad" (E , ν) y demás.

Se ha sostenido repetidamente que una vez que un razonamiento teórico establece la columna vertebral para un determinado análisis-síntesis, el método de la ingeniería necesita que usemos esa columna para completar con el músculo y los adornos de la experiencia. No podemos pasar por alto los Índices (ya sea sobresimplificados o parámetros complejos) que no se ajusten a la teorización, aún cuando pueden haber sido usados como puntales temporarios. El hecho de que los datos (más específicos o precisos) no se encuentren disponibles en conformidad con la línea propuesta no nos exime de asumir los parámetros deseados y necesarios: sólo sirve para mostrar el orden de significación de nuestras incógnitas y, por lo tanto, el interés técnico y económico al buscarlos. Mientras tanto, el ingeniero debe y puede asumir parámetros como se requiera, y puede y debe usar aproximaciones (a menudo escogidas indirectamente) para sus hipótesis de trabajo.

En las tres columnas de la Fig. 13, lo que sobresale es nuestro total abandono a la fecha de ensayos para la evaluación de diseño del "tiempo de autosoporte".

Simplemente a los fines de aclarar el principio fundamental anterior como una técnica de la ingeniería, se pueden mencionar dos puntos cruciales del diseño del escudo de un túnel en suelo blando, en el desarrollo urbano.

a.- Estabilidad del frente

Es, sin lugar a dudas, uno de los problemas más serios. Al avanzar en la excavación de un túnel, nos encontramos con una condición temporaria de diferentes grados de proximidad de provocar una falla en el frente y/o el techo. Además, es particularmente crítica porque siempre se avanza hacia lo desconocido y se enfrentan condiciones localizadas no-promediables.

La "estabilidad" en cuestión se ha asociado exclusivamente con un valor de "cohesión" (históricamente y, en general, aún obtenido de los ensayos de compresión no confinada, en el caso de arcillas saturadas plásticas en las que se presume que la envolvente de resistencia UU ó Q es $s = c = 0,5 q_u$). Por rutina,

se tiende a buscar un Número de Estabilidad (Broms y Bennermark, 1967).

$$\frac{yz - pa}{su} > 5 \text{ ó } 6$$

yz = presión vertical total a profundidad z del centro del túnel.
 pa = presión del aire sobre atmosférico.
 su = resistencia al corte no drenada de la arcilla.

El trabajo de Broms y Bennermark (1967), muy parecido al de Bjerrum y Eide, representa claramente una importante contribución para su tiempo y para el problema específico considerado. Trataba sobre las arcillas plásticas saturadas ($s = c$, $\phi = 0$ no drenado), normalmente consolidadas (sv total de sobrecarga como la tensión principal), y demostraba claramente la asociación de la estabilidad del frente con una formulación de la capacidad de carga, cN_c . En posteriores exposiciones, nos limitaremos a simples condiciones bidimensionales, a fin de aclarar las condiciones comparativas en juego. Del mismo modo en que generalmente se efectúa en las formulaciones de capacidad de carga, se puede estimar la estabilidad del frente circular a partir de formulaciones bidimensionales mediante el uso de factores de ajuste y de forma (a menudo, obtenidos de situaciones análogas).

Los ensayos de Broms y Bennermark eran, literalmente, ensayos de extrusión por presión. Existe el supuesto (conservador) de que la falla causada por un creciente sv mantendría la misma tensión de desviación máxima (función de q_u y cohesión), como falla provocada por la disminución de oh : la disminución de oh interno fue simulada por un aumento del sv externo. Este supuesto es idealizado porque, en la práctica, hay una tendencia a comprimir y generar presiones positivas de poros en el primer caso, mientras que en el segundo, cualquier tendencia a la expansión en el frente crearía inmediatamente tensiones capilares.

Hay una cuestión significativa con respecto al método empleado para simular las presiones de confinamiento: "la presión de confinamiento fue utilizada para investigar el efecto del aire comprimido para impedir que un material cohesivo fluyera dentro de una excavación o un túnel. Se empleó la glicerina como fluido de confinamiento".

Las influencias importantes de la tensión capilar, y de los fluidos intersticiales diferenciados, y las tensiones de superficie líquido-líquido, habían merecido cierta atención en los primeros años de la década del '50. Lamentablemente, sin embargo, son generalmente excluidas en condiciones idealizadas de laboratorio y/o son, a menudo, descuidadas. En la Fig. 14, se resumen ciertos datos representativos, sólo como un recordatorio. La especial importancia del aire comprimido en el frente de un túnel no puede separarse de algunos meniscos capilares, y del hecho de que los suelos generalmente no

están plenamente saturados. Dependiendo de la magnitud de presión del aire, en realidad puede existir una inversión favorable de la dirección del flujo y consiguientes presiones de filtración favorables, para complementar las tensiones capilares que se generan y propagan favorablemente.

En las arenas arcillosas, saturadas y sumergidas de San Pablo, (Fig. 15A), los ensayos de laboratorio indicaron que, si bien bajo gradientes muy pequeños (alrededor de 0,2) no se producía prácticamente ningún cambio en el contenido de humedad $W\%$ (alrededor de 0,2%), bajo gradientes mucho más elevados (hasta 30), se lograron disminuciones ΔW de hasta 6% en menos de 1 hora. En la Fig. 15B se encuentran los gráficos de la variación de resistencias de compresión no confinadas con $W\%$. Como bien se sabe es desfavorable el secado completo. Sin embargo, las ventajas de una presión del aire algo más elevada, (y gradientes locales en los puntos críticos) son tan evidentes, que no es casi necesario destacar que existe un remedio directo, simple y beneficioso para evitar el secado completo de un frente de arena: rociar la superficie con humedad, preferentemente agua barrosa (sucía).

El primer hecho básico con respecto a la falla bajo liberación de tensión es que, como un principio general, los materiales exhiben una histéresis de carga-descarga (en grados crecientemente variables) y, por lo tanto, bajo condiciones de descarga, existe siempre cierta "intersección de cohesión" y $\phi = ds/d\sigma$, por pequeña y/o temporaria que sea. Cuando nos ocupamos de una condición tan transitoria (excavación del frente de un túnel), tan próxima al FS = 1,0, no podemos permitirnos pasar por alto estos pequeños componentes al comparar experiencias exitosas y desfavorables.

Un factor de ajuste que podría aplicarse al $s = c$, Número de Estabilidad $\phi = 0$, en consideración de un valor ϕ aplicable, ha sido sugerido por Rebull, 1972. La influencia comparativa se indica en el gráfico de la Fig. 15C. Sin embargo, a menos que un análisis pueda realmente tomar en cuenta los problemas de las presiones en los poros, no es probable facilitar comparaciones apropiadas.

Simplemente como ejemplo de métodos de análisis disponibles para evaluar soluciones comparativas, presentamos una serie de casos analizados sobre la base de redes de escurrimiento y envolventes de tensión efectiva. En primer lugar, se destaca que las redes de escurrimiento y los análisis han sido preparados para una condición bidimensional (tomándonos la libertad simplemente para ejemplificar). La Fig. 16 muestra la estimación del factor de ajuste que podría ser deducido de una manera simplificada para la transferencia de datos bidimensionales a tridimensionales, con respecto a las presiones de poros de la red de escurrimiento.

La siguiente figura (Fig. 17) indica, esquemáticamente, para superficies de falla hipotéticas,

cómo se estima la resistencia no drenada in situ, tomando en cuenta sólo los valores u de la red de escurrimiento y K^0 , aplicados a la sobrecarga $\sigma'v$ y una envolvente de tensión efectiva. Es sabido que, en principio, puede existir la necesidad de corregir los valores de u de la red de escurrimiento debido a tendencias a Δu como una función del cizallamiento Δv . Puede ser aplicado el criterio propio a tales correlaciones, a la luz de una idea del comportamiento del material, y el posible camino de tensiones. Independientemente de las superficies de falla que puedan ser analizadas, no podemos dejar de destacar que el Número de Estabilidad puede variar muy ampliamente dependiendo de u y K^0 .

En las siguientes figuras (Figs. 18, 19 y 20), hemos esbozado las redes de escurrimiento bidimensionales para algunas de las condiciones típicamente halladas en la ejecución de túneles, y en los métodos empleados para controlar las presiones de filtración. El propósito es simplemente comparativo. Bajo la hipótesis de una presión del aire comprimido algo excesiva, durante una breve condición accidental, se supone que existe esencialmente una inversión del flujo de agua en el suelo saturado, dentro de una sección variable lateralmente confinada; por lo tanto, admítase aplicable el mismo esquema de líneas de escurrimiento y equipotenciales.

Finalmente, en la Fig. 21, resumimos la "estática de masas" comparativa que debe darnos una idea de las influencias de diferentes tratamientos de drenaje y/o aire comprimido. Suponiendo que los valores resultantes $I(u) = U$ en las superficies de falla (estática de cuerpos rígidos basada en las tensiones totales y fuerzas neutras límite de la hipótesis de la membrana) sean la clave para el problema total de estabilidad, la comparación se basa simplemente en estos valores.

Para las presentes comparaciones (cuerpo rígido con presiones neutras límites), se emplea la reducción de la fuerza horizontal a cero mediante "transferencia de eje", porque el efecto benéfico real del aire comprimido es reducir (o ocasionalmente incluso invertir) las tensiones efectivas debido a las filtraciones. Los resultados sólo nos indican tendencias, porque debemos distinguir cuidadosamente entre los artificios empleados para el análisis de la estática de los "cuerpos rígidos" y el grado al cual el "comportamiento de la tensión efectiva" sólo se establece hasta el punto en que se han materializado las correspondientes deformaciones (com presiones y expansiones, relación de vacíos). En una arcilla ideal perfectamente saturada, los cambios no drenados instantáneos de presiones de poros no generan cambios de resistencia in situ.

Pueden extraerse muchas conclusiones importantes, intuitivas en la práctica de ejecución de túneles, no sólo con respecto a "la estática de cuerpos rígidos", sino también en relación a las condiciones de falla localmente críticas. Estas están afectadas princi-

palmente por la liberación de tensión de las tensiones horizontales más elevadas (con tendencia general a la expansión y pérdida de resistencia concomitante con la inversión principal de tensión), y también debido a las posiciones de gradientes más críticos de salida de filtraciones, y correspondientes tendencias a la expansión, pérdida de resistencia y falla. Tales condiciones localizadas pueden analizarse aproximadamente mediante los círculos de Mohr. Dependiendo de tales condiciones, las soluciones no drenadas de estabilidad, basadas en los teoremas-límite de plasticidad, pueden no lograr reflejar ninguna semejanza de las realidades enfrentadas en el campo.

Como comentario concluyente en relación a la estabilidad del frente, debe destacarse que el problema tiene importancia no sólo con respecto a la estabilidad transitoria en sí misma, sino también con respecto a los asentamientos. Como es bien sabido, las deformaciones aumentan significativamente a medida que el FS disminuye. La ingeniería de suelos no está documentada con ensayos de carga con plato (compresivos) en los frentes de las calicatas, si bien es un ensayo de mucho uso para las cargas transversales en pilotes, y está lleno de posibilidades prácticas. Más notorio aún, no existe absolutamente ningún dato sobre deformación-descarga de platos soportando frentes verticales (análogo a observaciones de convergencia a través de los diámetros de los túneles). Si tales datos son obtenibles, podrían diagramarse de un modo similar al de la Fig. 22, donde hemos analizado los ensayos de carga con plato, de la fundación de varios suelos de San Pablo. La muy rápida disminución de E al acercarse a la "falla" es como se esperaba. Se sospecha que, bajo condiciones de "carga-blanda" de tensión controlada, el comportamiento de descarga posiblemente revelará una caída aún más pronunciada de E en la escala inferior del FS.

b.- Predicción de las depresiones de los asentamientos

Es comprensible que la estimación de la depresión del asentamiento constituyera la segunda dificultad principal en la época en que Peck ofreció su gran contribución hacia la organización de los avances del entonces arte estrictamente empírico, a los fines de hacerlos susceptibles a su mínimo tratamiento de la ingeniería geotécnica. Por lo tanto, así fué que, como ocurriera tan a menudo anteriormente, la profesión le debe una gran gratitud, al hecho de que un hombre de importancia deseara saltar al vacío para ofrecer: (a) como un primer plan, una RECETA, aquél de una curva Gaussiana de asentamiento (anteriormente postulada por Litviniszyn, 1955), con la advertencia que dice "aunque el uso de esta curva no tiene una justificación teórica, proporciona al menos un expediente temporario" (pag. 240); (b) las indicaciones cualitativas de los factores principales intervinientes; (c) la tabla resumen de "toda" la información disponible, con la candida confesión de que "la información...es sorprendentemente escasa" y con la apropiada exigen

cia de "observaciones de campo a escala completa".

Se sostiene aquí, sin embargo, que la colección de datos necesita un modelo mental, y debemos urgentemente desechar en su totalidad la desafortunada asociación con una curva Gaussiana, porque representa un callejón sin salida, y no lleva consigo ninguna idea-fertilidad. Debemos fomentar algún análisis teórico mínimo de los diferentes parámetros asociados con las observaciones de campo a escala completa, ya que sólo se obtendrá un progreso en los procedimientos de diseño y predicciones si comenzamos a disipar el pronóstico innecesariamente pesimista: "Debido a la dependencia de la pérdida de terreno de los detalles de construcción, es poco probable que las investigaciones teóricas resulten provechosas, excepto en algunos de los materiales más simples, tales como arcillas plásticas" (pag. 245). Aunque las RECETAS constituyen la base válida para los avances y las decisiones de diseño, deben ser rápidamente adaptados mediante CORRELACIONES estadísticas sobre el comportamiento observado a fin de permitir una revisión y un progreso. Y debemos hacer esfuerzo para resistir la ampliamente difundida práctica de las regresiones estadísticas casuales, ya que una correlación estadística no tiene sentido, y puede ser peligrosa si no está basada en la teorización sobre el modelo físico, para establecer la naturaleza de la ecuación y sus coeficientes.

Seguramente se acepta que en la ejecución de túneles, enfrentemos automáticamente una mayor proporción de condiciones estrictamente localizadas de heterogeneidad y posible falla (pérdida de terreno), como se destaca en el ítem 6.1 con respecto al factor FI de puntos individuales o fractiles en un histograma.

Tales condiciones son aquéllas que deben ser, ya sea tolerables y mantenidas como riesgos incuantificables, o deben ser resueltas en el diseño y la construcción mediante "un cambio del universo estadístico" (es decir, un tratamiento que esencialmente excluye el problema). Nuestra preocupación en el proyecto ingenieril sólo puede cambiarse en condiciones que permitan el promedio, y las cuantificaciones en él basadas. El hecho es que los asentamientos a menudo se distribuyen lo suficientemente bien para convalidar las estadísticas de los promedios.

La Fig. 23 resume los preceptos de Peck (1969) con respecto a la depresión de los asentamientos. Los puntos básicos son: (a) geometría, dimensiones; (b) una curva Gaussiana de asentamientos, sin indicación de desplazamientos; (c) un gráfico marcando los datos disponibles observados (un punto para cada caso) con referencia a las clasificaciones de índices, prescindiendo de la asociación con parámetros geotécnicos.

La presunta curva Gaussiana es, en realidad, la de cambios pseudo-elásticos y/o elasto-plásticos dentro de la masa semi-infinita.

Tal es la naturaleza del fenómeno en juego cuando el diseño y la construcción de túneles procede bajo condiciones normales, con minimizadas ocurrencias erráticas defectuosas. No hay absolutamente nada probabilístico o estocástico acerca de ello. En realidad, para ocurrencias críticas locales (derrumbes, etc.) existen probabilidades de ocurrencia, a lo largo del túnel: pero difícilmente se podría predecir o presumir, o aún establecer a posteriori, las distribuciones de frecuencia de tales ocurrencias para el avance longitudinal del túnel (el cual además, a menudo, representaría un universo geomecánico perceptiblemente cambiante, y no variaciones casuales dentro de un universo presuntamente constante).

En verdad, es extraño que un fenómeno probabilístico, y una función respectiva, se hayan sugerido alguna vez. Litviniszyn analizó la subsidencia que estaría provocada en un loess si hubiera un colapso o cavidad local subterráneo. Representando el material (considerado un cuerpo rígido, discontinuo, separado por rajaduras) como una masa de esferas uniformes, y visualizando el derrumbe como el movimiento hacia abajo de una esfera, obviamente llegó a la conclusión de que el perfil de la subsidencia en superficie podría representarse mediante una probabilidad Gaussiana.

El resultado es matemático, inevitablemente. Dos fenómenos que, bajo condiciones idealizadas, conducen a la misma ecuación no son, por lo tanto, similares.

Hay muchas situaciones en las que, después de hacer las presunciones simplificadoras necesarias (generalmente término medio y Gaussianas), las ecuaciones matemáticas de un determinado fenómeno físico se hacen idénticas a aquéllas de muchos otros fenómenos totalmente distintos. Por ejemplo, las similitudes clásicas entre las redes de escurrimiento Darcy-Laplace y los modelos eléctricos análogos o las disposiciones de limaduras de hierro dentro de campos magnéticos apropiados. Sin embargo, sería absurdo continuar con una dogmatización sobre el resultado matemático (idealizado), insistiendo en ubicar los datos experimentales o observables del primer fenómeno en la ecuación del segundo. Por ejemplo, cuando interviene la capilaridad en el resultado de la red de escurrimiento, con seguridad no es contra los modelos eléctricos de analogía que debe forzarse la ubicación de datos.

Peck destaca que "todo túnel en suelo blando está asociado con un cambio en el estado de tensión del terreno y con deformaciones y desplazamientos correspondientes", y por lo tanto, es sorprendente que la formulación de Litviniszyn haya desmerecido una asociación directa con los cambios de tensión-deformación en un medio pseudo-elástico (ver Fig. 24), especialmente en vistas de una temprana y brillante contribución de Carrillo, ya mencionada, "Subsidencia en el área Long Beach-San Pablo, Cal.: el efecto de un centro de tensión" (1949). Según mi parecer, el proble-

ma principal ha sido el primitivo uso confuso del término "pérdida de terreno", y el intuitivo sentimiento de los capataces en la ejecución de túneles, que los asentamientos (es decir, aquellos destacables) derivan de la pérdida de terreno. Como en la práctica, la atención propia se concentra primero en las evidencias inmediatas de causa-efecto, y especialmente en las fallas, la confusión primitiva es comprensible. Sin embargo, no tiene nada que ver con las cuantificaciones de la ingeniería, ni con los "puntos representativos" (aún sin una banda de dispersión) diagramados a partir de los datos tabulados por Peck (y por muchos autores).

En realidad, inclusive para el "derrumbe de cavidad", debe reconocerse como mucho más conducente hacia una colección y comparación de experiencia provechosa, si en vez de adoptar una postulación estocástica geomecánicamente estéril (disociada de parámetros físicamente comprensivos y derivables), la autoridad hubiera postulado recurrir a formulaciones de plasticidad ("derrumbe de cavidad", como una inversión de las ampliamente reconocidas soluciones de "expansión de una cavidad en un medio infinito").

El hecho más curioso es que el fomento de la prescripción de diseño de la curva Gaussiana predomina entre las mismas compañías de diseño que están sumamente interesadas en difundir el uso de los Análisis de Elementos Finitos para el mismo problema, toda vez que la forma de la cavidad difiere de la circular o, toda oportunidad que haya en la Mecánica de Rocas de insistir sobre los problemas de tensiones. Un solo ejemplo (ver Fig. 25) es suficiente para ilustrar lo que es obvio.

El cándido reconocimiento (pag. 231) de Peck "no es posible aún ... distribuir la pérdida de terreno entre los movimientos inevitables asociados con un método particular de construcción y los movimientos adicionales que pueden surgir debido a una mano de obra deficiente o técnicas defectuosas", hace imperativo examinar (estadísticamente) las variables condiciones K'o, FS, E, (etc.) a lo largo del túnel (universo constante de técnicas de la construcción) a fin de separar, como en hidrología, los "caudales pico de los de base".



- INEVITABLE**
- (a) Cualquier método de construcción. Minimizado. Simplemente liberación de tensión, "descarga E rápida".
- E = f(FS) Referirse a "muestra intacta" como ideal inasequible E intacto.
- [Asociado con técnica y detalles de construcción específicos.
- (b) Coeficiente de ajuste ($<1,0$)
- Cambio de E (perforación)
 - E = f(FS), plastif. incipiente.
 - "Duración" en "inmediato"
 - Tiempo a largo plazo

DERRUMBE

PERDIDA DE TERRENOS: errática.

Ocurrencia probabilística a lo largo de la longitud del túnel, pero f (FI, FI_{ind})

PARA UNA POSICIÓN DADA



En este sentido, podría ser un asunto discutido, si es ventajoso o desventajoso, que la formulación del derrumbe perteneciente a Litviniszyn nos condujera a una distribución exactamente similar de asentamientos como las soluciones elásticas y elastoplásticas. Distribuciones ampliamente diferentes podrían ser seleccionadas. Sin embargo, ¿cómo podrían ser diferentes, si la formulación estocástica no representa más que una abstracción matemática para condiciones tan idealizadas como para producir el comportamiento físico anticipado? En resumen, la prescripción de Gauss debe excluirse "in limine" por ser estéril.

Existe un punto adicional de gran importancia para el diseño. Peck (1969) nos da la forma de la curva, pero no nos proporciona una ayuda directa para establecer el asentamiento máximo pronosticado de cada sección, directamente arriba del coronamiento. Hubo una indicación de primer orden: "Las mediciones han establecido con una exactitud razonable la equivalencia del volumen del asentamiento de superficie y el volumen de terreno perdido dentro del túnel como consecuencia de la excavación". Esta indicación es físicamente irreal, ya que debe existir siempre cierta atenuación y, en grados diferenciales. Incluye si se refiere específicamente a "terreno perdido" como una condición de falla, es absolutamente imposible que los volúmenes transmitidos a través del medio sean, aún "instantáneamente", equivalentes. Las atenuaciones a través del medio deben depender mucho del FS en el frente, y del $\Delta E/\Delta FS$ en el frente y a través del medio y, por supuesto, de las distribuciones tensión-deformación.

La Fig. 26 presenta la indicación publicada (Souto Silveira y Gaioto, 1969) que se basa en una correlación intentada de la información de Peck, sin recurrir a intuiciones teorizables. La asimilación de datos obtenidos de casos de túneles totalmente diferentes, inevitablemente nos conducirá a una estadística fortuita, a confusión, y a correlaciones espurias. En la misma figura 26, he incluido esquemáticamente lo que podrían ser tendencias realistas para las correlaciones: estas curvas pueden ahora obtenerse sin dificultad de los análisis elasto-plásticos de elementos finitos.

Finalmente, en la misma Fig. 26 he indicado que aún asumiendo parámetros de comportamiento geotécnico inalterado, existe una diferencia neta entre considerar el apoyo de plato-

-plano (o presiones de superficie de cuerpo rígido, admitido envuelto por membrana impermeable) y el uso realista de tensiones de masa, tensiones efectivas, debidas a la gravedad, con aquellas debidas a las filtraciones. Las deformaciones no son equivalentes. El artificio computacional de rutina es perfecto para la estática de cuerpos rígidos. Dado que las deformaciones pequeñas, y las diferenciales, han llegado a ser importantes para los edificios, debe considerarse esta fuente significativa de divergencias de comportamiento y opiniones.

En resumen, ambos problemas mencionados ilustran el hecho de que el profesional se ha visto privado de la oportunidad de desarrollar histogramas sensibles de comportamiento no-falla a lo largo de sus túneles: ya sea, porque él trabaja con una RECETA ampliamente sobre-simplificada, o porque tendría que llegar al extremo de los análisis de elementos finitos (la mayoría de ellos incompatible mente sofisticados para los datos y los modelos de comportamiento de suelos disponibles). Coleccionar datos pseudo-estadísticos de distintos túneles alrededor del mundo es semejante a registrar cualesquiera índices aleatorios (por ejemplo: altura vs. peso de todas las especies bípedas del mundo).

5.4. Empuje de tierras sobre soportes en excavaciones profundas

Una vez más, para el diseño de excavaciones entibadas, el profesional cuenta con las RECETAS de Terzaghi y Peck (1967) y Peck (1969). Durante los últimos doce años, con el aumento exponencial de proyectos que requieren excavaciones profundas, surgieron muchas preguntas tales como: cómo tener en cuenta los perfiles del subsuelo típicos con estratos variables; cómo adaptarse a diferentes K_o y deformabilidades; cómo adaptar los preceptos a paredes diafragma (rígido-continuas, por lo tanto, término medio, obviando la necesidad de una envolvente de las peores condiciones locales); y así, sucesivamente. La pregunta básica realmente desconcertante planteada por la mayoría de los profesionales se remonta a las raíces de la mecánica de suelos convencional, tensiones totales vs. efectivas, drenado vs. no-drenado. La pregunta planteada es: ¿cómo toman en cuenta las RECETAS el agua del subsuelo, la red de escurrimiento y las presiones de poros?

Del examen del informe de Peck, 1969, la respuesta es: no las toman en cuenta! De los 23 perfiles excavados presentados en las figuras, 17 no tienen la indicación del nivel de agua, mientras que 6 sí la tienen; en ningún caso están explicitadas las condiciones probables o adoptadas de drenaje y de presiones de poros.

Obviamente, el intento de la RECETA puede y debe ser evaluado antes de que proliferen su aplicación, sin tomar en consideración las variables condiciones del emplazamiento y los avances del conocimiento geotécnico. Los dos problemas separados son: a.- la fuerza lateral total, necesariamente dividida en presión

efectiva del empuje de tierra y la presión del agua; b.- la distribución de presiones.

Analizando retrospectivamente las cargas observadas en puntales (Peck) se obtiene el parámetro para a.- y puede evaluarse b.- razonablemente.

Es bastante comprensible que, en una excavación entibada con pilotes hincados y planchas transversales, hayamos tenido que trabajar con una envolvente porque cualquier falla local podría llevar consigo un catastrófico efecto progresivo similar a un castillo de naipes. Ocurre entonces, que la RECETA corresponde aproximadamente a 1,3 veces la Fuerza Activa de Presión adoptada. Incidentalmente, en general un "Factor de Seguridad" de 1,3 se adapta satisfactoriamente a bajas deformaciones.

De este modo, la corrección mínima de las recomendaciones podría ser la aplicación de un multiplicador de 1,3 a E-activo. Y para E-activo, podemos y debemos usar nuestras mejores computaciones actuales basadas en presiones efectivas de empujes de tierras y presiones de poros. La Fig. 27 intenta mostrar esquemáticamente las ordenes de magnitud de correcciones que pueden estar comprometidas, si restringimos (sobre-simplificamos) la consideración de los efectos del agua nada más que a fuerzas neutrales de borde, en las cuñas activas del equilibrio límite.

En resumen, tanto éstos como muchos otros ejemplos deben destacarse con nuestro más profundo respeto y gratitud por las fructíferas contribuciones que nos ayudaron hasta este punto. Que se hace parte intrínseca del glorioso destino de una fruta que debe madurar, caer y hecharse a perder, para que de su semilla puedan crecer otros árboles que darán más frutos.

5.5. Estabilidad de taludes compactados de enrocado y observaciones de deslizamiento

Existen muchas evidencias que demuestran que antes de la utilización de la mecánica de suelos en el análisis de la estabilidad de taludes de enrocado, las pendientes de los mismos eran en su totalidad mayores y nunca se supo de problemas de deslizamientos. Parecería por consiguiente y una vez más, que una bien intencionada pero mal orientada utilización de la teoría de mecánica de suelos es responsable por la reducción innecesaria de la inclinación de esos taludes. El enrocado es un material granular que se idealiza como partículas sin cohesión, simulándolo a una arena de partículas de gran diámetro; y por consiguiente, esta aberración se hace más patente en el enrocado compactado.

Naturalmente que existe un interés técnico definitivo en mejorar la simulación del comportamiento de taludes de enrocado y, es obvio que la presión económica en incrementar las pendientes aumenta significativamente

hoy en día cuando su utilización en muchas obras se amplía a escala mundial.

El interés y la necesidad de medir movimientos a fin de determinar el "grado de satisfacción" ("SI", índice de satisfacción, De Mello Rankine Lecture, 1977) en la estabilidad del talud enrocado. Insistimos y repetimos una vez más que cuando se ha determinado un modelo físico del colapso que se repite con frecuencia, no es nuestro interés sentirnos satisfechos con un factor de seguridad (nominal) obtenido mediante el cálculo en un análisis de estabilidad, sino que deberíamos interesarnos en lograr un histograma de los diversos grados de comportamiento (o sea valores "SI") en función de las deformaciones que se producen previas a un colapso. Enfáticamente, repetimos que:

a.- En taludes de enrocado (estrictamente granulares y sin cohesión) "la estabilidad se asegura automáticamente a medida que se conserva truye a inclinación constante" (De Mello, Rankine Lecture, 1977) y, por consiguiente, estamos buscando un factor de garantía (FG) más que un factor de seguridad (FS), por consiguiente, reconocemos que un valor $FG = 1.00+$ significa un mayor grado de estabilidad que $FS=1.00$.

b.- Mediante el análisis de taludes de longitud infinita se calcula un resultado muy conservador y representativo del límite inferior correspondiendo a una hipótesis de cero cambio de volumen ($AV=0$) en la superficie de deslizamiento.

c.- Con la excepción de posibles movimientos sísmicos, no existen futuros incrementos de esfuerzos que pudieran desestabilizar un talud que posea una estabilidad satisfactoria hoy en día.

Por consiguiente debe ser beneficioso observar los movimientos superficiales (la mayoría de los planos inestables reflejan efectos interiores acumulados) y considerarlos como un índice que señala las tendencias en el comportamiento.

Un gran número de observaciones efectuadas en botes de enrocado para almacenamiento y uso posterior (con alturas de 30 a 45 metros) en grandes obras suministran informaciones interesantes al comparar su comportamiento con el de taludes excavados inclinados con el ángulo de reposo. Se han medido y nivelado en detalle muchos taludes estables en más de quince tipos de rocas de gran tamaño. El histograma de la roca colocada por el sistema de bote se condiciona a que la superficie inestable en movimiento recupere su estabilidad (Fig. 28). Este fenómeno se asocia con la fricción dinámica del fragmento de roca que posee el mínimo grado de estabilidad. Al compararlo con el talud excavado, observamos dos tendencias diferentes, una zona superior de mucha pendiente (cercana a la vertical) controlada por las rocas más estables que se han movido de su posición inicial (fricción "estática") de reposo, y la zona más inferior conformada por una mezcla de material excavado y material de bote. Al compararlos con material compuesto por

partículas de menor diámetro, sub-redondeadas su histograma muestra un material más poroso que el obtenido mediante ensayos de laboratorio en arena uniforme. Sin embargo, aún en pilas de almacenamiento, de rocas angulares, efectuados por el sistema de bote, existe un beneficio definitivo si lo comparamos con las características de las pilas por excavación, el cual, posiblemente, se debe a un aumento de la resistencia generada por pre-esfuerzo, además de los factores ya mencionados. Nos podríamos preguntar ¿Cuál es el ángulo de fricción promedio (ϕ') que se debe usar en un análisis nominal de estabilidad, el de taludes por relleno o el de excavación por el fondo, después de lograrse el beneficio de pre-esfuerzo? En el caso de los enrocados compactados por capas con el pre-esfuerzo y entramamiento por compactación, ¿Qué ángulo de inclinación podemos lograr sin riesgo de colapso o comportamiento poco satisfactorio?

Las observaciones de primer orden más sencillas son las de movimientos verticales y horizontales de puntos ubicados en el talud de aguas abajo. Estos puntos de referencia se instalan tan rápidamente como sea posible, evitando el uso de sistemas sofisticados que no son necesarios y que sólo causan retrasos indeseables. La Fig. 28 muestra los movimientos observados a medida que se construye el terraplén de la presa. Estas observaciones directas y sencillas constituyen una base para la discusión sobre "Índices de satisfacción" en taludes de enrocados para el momento que mayores pendientes en estos taludes sea de interés en la práctica profesional. ¿Por qué no podemos anticipar el comportamiento satisfactorio de taludes 1:1 cuando estos se han usado en muchas obras?

6. NECESIDADES Y FUTURO DE LA INGENIERIA GEOTECNICA Y LA MECANICA DE SUELOS

El intento ha sido apuntar hacia las predicciones en la Investigación y la Práctica. Con respecto a esta última, podemos desechar la capacidad computacional. Por consiguiente, con respecto a la investigación y práctica, el problema radica en cómo dirigir nuestros esfuerzos más fructíferamente. Obviamente y por fortuna, existe un gran número de ideas y una gran variedad de opiniones. Sería desastroso si más de un par de ilustrados colegas tuviera las mismas opiniones sobre lo que se presume desconocer; ya felizmente, es bastante difícil encontrar a muchos que estén de acuerdo sobre lo presuntamente conocido. En los desafíos de la investigación y de la vida, hemos aprendido a estimar las diferencias. Es por eso que me aventuro a ofrecer mi propia impresión personal, ya expresada en otras oportunidades.

En principio, permítanme explicarles que, para mí, el producto industrial de la educación de la ingeniería civil y de la actividad colateral de investigación y desarrollo deben ser reconocidos, con orgullo, como DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA INGENIERIA. La investigación y

la publicación son realmente medios para tal fin y uno lamenta observar que, a menudo, se ha olvidado tal objetivo pragmático a través del gusto mismo de la prosecución académica para su propio beneficio.

6.1. Definiciones revisadas de los factores de seguridad nominales

Existen muchas fructíferas discusiones sobre los significados de los factores de seguridad, pero todos reconocen que son y seguirán siendo nominales. No podemos evitar la necesidad psicológica de calcularlos. He destacado que en diseño de ingeniería civil de proyectos de gran responsabilidad y consecuencia, un principio conveniente de observar es el de prueba preliminar, es decir, someter los elementos del suelo durante el período de construcción a tensiones por lo menos apenas mayores que aquellas que pueden predecirse bajo condiciones críticas de operación. Por lo tanto, surge la necesidad de reconocer una diferencia entre el Factor de Seguridad convencional y un Factor de Garantía. En realidad, en una primera aproximación, propuse la diferencia entre, por lo menos, tres factores nominales: el de Seguridad (convencional) y aquellos de Garantía y de Seguro. A menos que en toda nuestra colección de datos hagamos una distinción entre ellos, en correlaciones subsiguientes con el comportamiento, estaremos generando dispersiones y confusión.

En la Fig. 29, postulo que cuando se sabe que las resistencias son mayores que algún valor pre-ensayo (histograma truncado), la razón de la resistencia a la tensión pronosticada no es más un Factor de Seguridad sino un Factor de Garantía. En la Fig. 30, he resumido esquemáticamente los casos de pilotes empujados estáticamente por gatos y los hincados dinámicamente hasta "el rechazo", como una condición en la que el truncamiento favorable del histograma en resistencias establece tal Factor de Garantía FG, en comparación con el rutinariamente definido $FS = (Resistencia_{error}) / (ES_{fuerza_{error}})$. Además, en el otro extremo, hay situaciones en las que el histograma de resistencias puede ser sólo menor que un cierto valor ideal (ejemplo: el de la muestra intacta); en consecuencia, el FS de rutina cambia a un Factor de Seguro FI. En la Fig. 30 se indican esquemáticamente las situaciones, sugiriendo que los problemas de pilotes perforados y los de túneles con escudo se relacionen frecuentemente con los valores de FI en lugar de FS. Obviamente un $FG = 1,5$ vale mucho más que un $FI = 1,5$, mientras un $FI = 1,5$ vale obviamente menos que el $FS = 1,5$.

Por obvias razones psicológicas innatas, nuestra colección de datos de comportamientos aceptables vs. inaceptables seguirá requiriendo una asociación con los factores nominales de "cuánto distará del límite, la condición crítica pronosticada".

6.2. Atención concentrada en los histogramas significativos de comportamiento pre-falla

Debemos reconocer claramente la distinción de

dos etapas; primero, de establecer el histograma de la continuidad de comportamientos que gradualmente empeoran; y segundo, de aplicar la decisión por sí o por no de truncamiento de tales histogramas de acuerdo con los sistemas individuales de valores (inexorablemente variables). (Memo G).

Hemos desperdiciado muchos esfuerzos en la infanzal búsqueda de "la detonación y los fugos artificiales" de una falla repentina. Es comprensible, pero "cuando yo era niño, hablaban como tal...". Sin embargo, ya es hora de que crezcamos y adoptemos actitudes adultas. Por ejemplo, si queremos investigar terraplenes en arcillas blandas, debemos observar el comportamiento a medida que aumenta gradualmente su altura (en una arcilla blanda constante), así como debemos controlar la creciente fiebre del paciente, el recuento sanguíneo gradualmente variable... Debemos realmente decidir qué vamos a instrumentar y para qué monitorear, ya sean deformaciones, o emisiones micro-acústicas, etc., de modo que sea significativo y que abra un amplio espectro fácilmente discernible y sea preferentemente simple y económico.

Por ejemplo, al discutir asentamientos diferenciales tolerables (o inaceptables), en edificios, más que la "primera grieta" (la cual es obviamente quimérica), lo que debe observarse es la relación de cambio en las grietas, con el cambio de asentamiento diferencial y distorsión, como presentará más adelante. Es muy fácil y significativo observar la evolución de una grieta después de localizada. Y, como las distorsiones debido a asentamientos diferenciales de dos columnas adyacentes se acentúan inevitablemente de piso en piso, un significativo universo estadístico para analizar, lo constituyen los distintos pisos del mismo edificio. Téngase en cuenta que el nivel de referencia del décimo piso actúa como "fundación" para el undécimo, del mismo modo que la fundación (bajo tierra) actúa como soporte de la planta baja. Y, para ser honestos, no podemos agrupar diferentes edificios de Hong Kong, Chicago, San Pablo y Londres en un mismo universo estadístico simplemente porque todos llevan el nombre de "edificios". ¿Qué sería de la zoología si todos los bípedos fueran estadísticamente analizados en un mismo universo?

Dos ejemplos bastan. La lista es larga; en realidad, en casi todos los proyectos hemos agrupado condiciones significativamente diferentes en universos únicos simplemente con la excusa de nombres similares. ¿Por qué es tan difícil corregir tal absurdo? La culpa es atribuible tanto a los Ingenieros como a los Clientes. ¿Qué difícil es diseñar y construir una larga presa con el mismo talud variando longitudinalmente, digamos de 1:2 a 1:2,5 a 1:2,8 cada cien metros aproximadamente, sólo con el objeto de recoger datos confiables sobre un comportamiento de deformación pre-falla variante, para aguijonear y promover un poco nuestras definiciones de las fronteras de la impunidad. El complejo de CIENCIAS EXACTAS, el complejo de la CERTEZA y el de la dicotomía CORRECTO-INCORRECTO son difíciles de

desarraigar.

6.3. Observaciones de acciones incrementales vs. consecuencias

Uno de los errores más comunes de la tecnología experimental y observación próximos a cero son muchas las causas inexorables. Puedo resumirlo citando una hermosa frase de Byron, que le mereció ganar un concurso de ensayos sobre el tema del milagro de Canaan al ser transformada el agua en vino. Frente a una docena de páginas en prosa, la frase ganadora era poéticamente concisa: "El agua contempló a su Señor y enrojeció". El momento que decidimos instrumentar -el punto instrumentado ha sido escogido- se ha hecho singular y "enrojeció". En la cercanía de cero de cualquier parámetro, la dispersión y los errores abundan. Lo que debemos hacer es concentrar nuestros esfuerzos en observar el comportamiento vs. la acción, y luego extrapolar hacia cero si lo deseamos. Sólo para ejemplificar, regresaré al problema del agrietamiento de edificios.

Si restamos interés al comienzo de la primera grieta lo cual implica montar un amplio sistema de monitoreo y alerta para ganar la lotería, sin un real indicio de donde podría surgir, nos organizaríamos en forma muy económica para permitir que comience el agrietamiento. Todos los oficinistas junior, o residentes, se convierten en nuestro sistema de monitoreo sin cargo... Todos están interesados en la aparición de una grieta, o pueden fácilmente ser invitados a tan agradable cooperación. Inmediatamente después de que la grieta aparece (asociable con asentamientos diferenciales), podemos instrumentar la observación de la velocidad de crecimiento de la grieta y, concomitantemente podemos instrumentar el monitoreo de los asentamientos de las dos columnas adyacentes. Además, se pueden monitorear los asentamientos diferenciales en los niveles de muchos pisos arriba y abajo de dicho crecimiento, y se puede estar alerta en caso de que se desarrollen agrietamientos similares en otros pisos. Tales observaciones significativas de $\delta G / \delta (\Delta p)$ donde G = grieta y (Δp) = asentamiento diferencial, bajo condiciones lo más cercanas al mismo universo físico que sea posible.

La investigación de laboratorio ha conducido a fructíferas conclusiones, porque siempre respetó la necesidad de investigar esencialmente sólo dos parámetros al mismo tiempo, y todos los otros mantenidos constantes; y reconoció tempranamente la necesidad de corregir "errores de instalación o disposición" cercanas a cero.

En el laboratorio realmente importante de observación de prototipos, lamentablemente se han pasado por alto las leyes de la investigación tecnológica, pero se les debe prestar atención. Veo la mayor promesa para la ingeniería geotécnica y civil a través de un esfuerzo concertado siguiendo estos principios.

6.4 Cuantificaciones de la calidad de las muestras para cerrar significativamente

el círculo de la experiencia

Después de la primera distinción de muestras inalteradas vs. alteradas (o totalmente remodeladas), y a pesar del reconocimiento de la tremenda importancia del remoldeo en la compresibilidad, tensión-deformación-resistencia y la permeabilidad, no ha habido absolutamente ningún registro sistemático sobre la calidad de las muestras, y como ellas afectan todos los datos publicados de ensayos en supuestas muestras inalteradas, para representar elementos in situ. En el mejor de los casos, en unos pocos ejemplos, las indicaciones sobre muestras han sido dadas mediante "especificaciones del método", y no, como debería ser, vía "especificaciones del producto final". Cuatro escuelas notables han dedicado sus esfuerzos fructíferos de investigación para comparar los comportamientos de tensión-deformación-resistencia de Elementos Intactos (o de Campo) y muestras Perfectas, Inalteradas, Parcialmente Alteradas y Totalmente Remoldeadas. El índice de Sensibilidad $s_u(\text{inal})/s_u(\text{rem})$ es siempre un Índice de "Sensibilidad Parcial, del cual debemos tratar de inferir una posible condición Intacta. (Memo H, y Fig 2).

Schmertmann (1954) y Broham (1971) recurrieron a las curvas edométricas para una evaluación de los índices de perturbación y comportamiento intacto, pero menos de un 1% de buenas publicaciones ha mencionado alguna vez la sensibilidad o la calidad de la muestra.

	1980	1940	Capacidad del E
	1970		quipo de Cons
	1960	1960	trucción para
Calidad de	1950		"prescindir del
Muestras y	1940	1980	suelo.
Ensayos			

En la Fig. 2 he reproducido los resultados de un análisis simple empleado hace mucho tiempo en un intento de referir las resistencias UU a una presunta referencia común de "calidad inalterada". Alrededor de 1953-56, tuve oportunidad de muestrear y ensayar un volumen significativo de muestras con Shelby de arcillas de fundación, y obviamente noté la relación entre el porcentaje de deformación a rotura y el grado de perturbación, como indicaran las llamadas sensibilidades parciales Stp. Se analizaron los datos de los ensayos estadísticamente, asumiendo regresiones variables con S_t nominal de un presunto comportamiento de un espécimen "perfectamente inalterado", como correspondiente a un pico de falla ante una deformación de 1%. Estas fueron candidas hipótesis de trabajo que cumplieron un propósito y aún pueden seguir haciéndolo, sin presumir ser una "verdad de investigación". Sin embargo, el hecho sorprendente es que aún en arcillas de moderadas a elevadas sensibilidades, todos los resultados de la resistencia están generalmente agrupados, sin intentar referirlos a una base común de datos en lo referente a sensibilidades y perturbaciones parciales.

6.5. Ensayos in situ y perfiles múltiples

No me explayaré en el bien conocido hecho de que se han dedicado considerables esfuerzos a

los ensayos in situ, tanto debido al deseo de identificar las condiciones in situ, como de evaluar las condiciones de la relación modelo prototipo, como de evitar la perturbación asociada con el muestreo y el manipuleo. Los ensayos dinámicos de penetración de cuchara (SPT) el penetrómetro estático de cono (CPT) y sus desarrollos (incluyendo fricción lateral local (LF) para identificación, y especialmente el CPTU como perfilador múltiple), el reciente dilatómetro plano de Marchetti, el ensayo de paleta de corte, el presiómetro de múltiples aplicaciones, el perfilaje del coeficiente K'_0 (por ejemplo a través del camkometer), los ensayos de permeabilidad in situ mediante técnicas de bombeo, y finalmente los ensayos de carga-deformación, constituyen un conjunto de recursos sobre los que se basan nuestros diseños. Las investigaciones oceanográficas del subsuelo han empleado muchos más perfiles múltiples y podrían abrir una promesa mayor si reconocieran los errores, consistentes y erráticos, de los ensayos de la mecánica de suelos convencional.

Todos ellos fueron desarrollados sobre pronósticos racionales pero, como era inevitable, sobre una base teórica tan simplificada que los engaños sólo aparecieron gradualmente. El gran problema que enfrentamos es el desarrollo de métodos para evaluar cuantificablemente las calidades del trabajo. La primera asociación de una perturbación con muestras y, por lo tanto, con el muestreo, condujo a la búsqueda de los ensayos in situ, bajo el pensamiento desecoso de asociaciones ilógicas:

lógicas falsas:

muestras	perturbación
no-muestreo	no-perturbación
ensayos in situ	no muestrean
ensayos in situ	no perturbación in cuestionable

Se ha discutido la aceptabilidad de los resultados de los ensayos in situ sobre la base del complejo resultado final del proyecto construido. Pero, no hay dos casos iguales, las dispersiones han sido grandes, y existen demasiadas etapas y factores intervinientes, que pueden introducir compensaciones y/o magnificaciones de los errores de las investigaciones iniciales.

No sé de ninguna tarea o trabajo de investigación en el cual se haya repetido varias veces un determinado ensayo in situ (por ejemplo CPT ó CPTU), uno junto a otro, a distancias de un par de metros para la evaluación de dispersiones: ni siquiera han existido informes sobre grupos de tales ensayos in situ, comparados uno con el otro.

En comparación con los ensayos de laboratorio, el defecto principal de los ensayos in situ es el de nunca haber sido aplicados antes y después de una carga dada, para verificar su capacidad de reflejar los cambios en las condiciones significativas.

6.6. Ampliación de la teorización para el comportamiento del suelo

Los principales y bien conocidos factores de influencia en el futuro próximo pueden ser: Estructura, Porosimetría, poros de aire, efectos del tiempo, cementaciones. La falta de inclusión de estos efectos es el factor responsable de la mayoría de las inexplicadas dispersiones y discrepancias, una vez aceptados como factores predominantes los de la Mecánica de Suelos convencional.

Excluyo la discusión de las tensiones in situ, afectando todo concepto fundamentalmente racional de ensayo tensión-deformación-tiempo, y el consecuente cálculo de diseño, porque durante mucho tiempo lo he considerado un instrumento para la comprensión del comportamiento del suelo, y no para solucionar variabilidades y dispersiones del diseño y la construcción.

Debemos reconocer que las dispersiones no son simplemente aquellas referidas al muestreo y a los ensayos, sino que se originan ya intrínsecamente en el rechazo de una condición in situ perfectamente homogénea y natural: no sólo las tensiones verticales promedio $\gamma'z$, sino las tensiones verticales promedio $\gamma'z$, sus considerables variaciones debido a deformabilidades diferenciadas y redistribuciones de tensión, sino que también las bastante elevadas tensiones horizontales se encontrarán altamente variables (dentro de un rango viable).

Por lo tanto, dentro de la mecánica de suelos, propongo que los principales parámetros nuevos, para que investiguemos más profundamente, son aquellos que pueden significativamente afectar nuestra aceptación (automática) de tales dogmas iniciales como la ecuación de tensión efectiva de Terzaghi, el tradicional análisis granulométrico, etc. Los parámetros del suelo mencionados afectan una gran proporción de la geografía y la geología del mundo, y los poros de aire es lo que importa para la compactación y para muchos tratamientos del suelo. La formación de núcleos granulares y grumos dominan, a menudo, el comportamiento; así como lo influyen significativamente a menudo los macroporos.

En tono satírico podríamos decir que en un primer período, la mecánica de suelos se ocupaba principalmente de los sólidos (individuales), como el sheriff; luego llegó el período de casi una total dedicación por la investigación de la fase líquida, como el bandido; es razonable que ahora le haya llegado el turno de algún avance en nuestra investigación de la fase gaseosa, como el muchacho bueno.

7. EQUILIBRIO EN EL FILO DE LA NAVAJA DE LA NATURALEZA A UN FS = 1,00

Si por un lado, podemos alegrarnos de nuestra capacidad por dominar la Naturaleza, por el otro, ha existido una creciente conciencia de la necesidad de ser precavidos ante la diferencia entre ganar batallas y ganar la guerra. No sólo los ecólogos son los únicos que deben estar atentos, sino también nuestro propio sentido común. De las exageradas soluciones de una generación surgen las plagas de la

próxima. La Naturaleza no tiene ningún compromiso con el prestigio, medido con respecto a preservar el statu quo. Por el contrario: su prestigio, está asociado a la fantástica capacidad de selección natural al borde del FS=1,00. La lección más remarcable de la reciente conferencia en Estocolmo ocurrió de casualidad: fue la película de un deslizamiento de arcillas vivas (quick) en Noruega, desencadenado por la simple excavación de la fundación de un establo, que rápidamente se extendió convirtiéndose en un rápido flujo de cientos de miles de metros cúbicos de lodo, con casas de la villa flotando en él. El hecho es que, a pesar de nuestras orgullosas estructuras que llaman la atención por sí mismas, la vasta mayoría de las poblaciones viven próximas al equilibrio de la Naturaleza, no mayor que lo necesario. Y es así que los comportamientos indeseables se acumulan y desencadenan continuamente. No simplemente en la licuefacción de arcillas (quick) vivas en Escandinavia, y las avalanchas por deslizamientos de taludes residuales en Hong Kong o los impresionantes caudales lodosos de coluvios pedregosos en los Andes, sino también en los lentos y costosos deterioros de las ciudades establecidas cerca de los océanos, o de fábricas, edificios y presas, que requieren un monitoreo y un mantenimiento costosos.

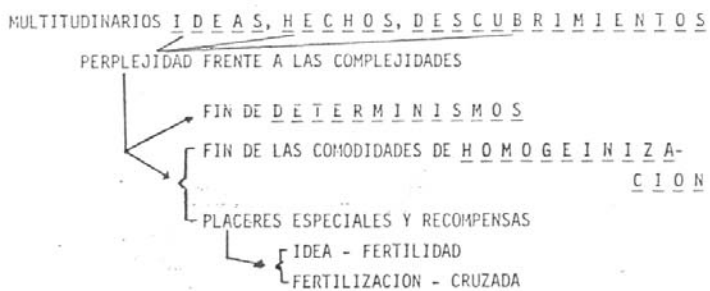
Si las grandes construcciones pueden prescindir de la delicadeza de la mecánica de suelos en la investigación y el refinamiento del diseño, ¿no es a un costo elevado, demasiado elevado para que permita reducirse el costo de la vida? El rendimiento industrial puede proporcionar y absorber la costosa sofisticación debido a las multiplicaciones exponenciales de ítems idénticos. Pero en la ingeniería geotécnica, a un FS cercano a 1,00, cada caso es individual y el costo de la sofisticación no puede atenuarse (Memo I).

Para todas esas situaciones, ¿qué es lo que necesitamos hoy más que nunca? ¿No es un requisito fundamental de la ingeniería civil ser económica, ser no más que un poco mejor de lo suficientemente bueno? ¿Es pedir demasiado de nosotros, Ingenieros Civiles, que ganamos más cuando la ingeniería es sofisticada y costosa, y que tenemos todo por perder, y nada que ganar más que nuestra solitaria dignidad, si los trabajos se hacen menos conservativos; es pedir demasiado de nosotros, que debemos nosotros mismos abogar por una ingeniería más barata, más audaz?

¿Mi cándida estimación de la futurología en la ingeniería geotécnica? ¿Cuál es la razón beneficio/costo de solicitar cooperación de la Naturaleza? ¿Cuál es la razón beneficio/costo de la inventiva? ¿Cuál es la mayor necesidad de la humanidad sino resolver los antiguos desafíos mediante nuevos métodos ingeniosos y económicos? Además de las nuevas fronteras del fondo del océano, de helados o áridos desiertos y de selvas ecuatoriales, ¿no es la principal meta, para cientos de millones, la de vivir en el mundo más habitable en el que ya estamos?

NECESITAMOS D I S C O N T I N U I D A D E S
PARA TOMAR CONOCIMIENTO
DE UN C O N T I N U O

VIVIMOS EN UNA EDAD DE I N C E R T I D U M B R E
Y NOSOTROS LA F O R J A M O S



I N G E N I E R I A ≡ ACTO DE DECISION A PESAR DE DUDAS

{ CIENCIA DE LA INGENIERIA
BUSQUEDAS ANALITICAS Y TALENTO
CAPACIDAD COMPUTACIONAL D E N T R O D E H I P O T E S I S D E
T R A B A J O
PRACTICA DE TAREAS DE INGENIERIA
BAJO RESTRICCIONES SOCIO-ECONOMICO-LEGALES

U R D E N D E I M P O R T A N C I A

1. INVENTIVA O INGENIERIA INGENIOSA
2. INGENIERIA POR RECETAS
3. TEORIZACION E INGENIERIA ANALISIS-SINTESIS



2. ESTAMOS EN LA ERA DE TERZAGHI:

ESA ES NUESTRA PRIMERA REALIDAD

INGENIERIA DE SUELOS

- QUE PUEDE SER ENSEÑADO Y APRENDIDO*
- NO QUE PUEDE SER HECHO

*GRAN NUMERO DE OBREROS DE LA ING. A SER PUESTOS EN TAREAS

DOMINIO DE LA ACTIVIDAD ACADEMICA
EXTENDIDO A TRAVES DE LA VIDA PROFESIONAL

SOMOS ETERNOS ESTUDIANTES

- ACTUALMENTE
 - MUCHO MENOS DE LA VIDA
 - QUE DE UN ALUVION DE TRABAJOS ESCRITOS

CREATIVIDAD

- NO CREADA CON FRECUENCIA
- NO ENSEÑADA GENERALMENTE

AVANCE DE INGENIERIA = REMARCABLEMENTE MEJOR
QUE NECESARIO

(1) IMITADO, POR SER REMARCADO

(2) SALTO ADELANTE, ABRE POSIBILIDAD QUE TOMA TIEMPO,
EN SER USADA POR DEMANDAS EN AUMENTO

2.1. PERSPECTIVA HISTORICA

MUCHAS INVENIONES ELEGANTES HEREDADAS,

DADAS POR SUPUESTO

MEMO B

2.2. MODERNA INGENIERIA INVENTIVA
PRODUCTOS Y PROCEDIMIENTOS

EJ: COMPETENCIA INTERNACIONAL DE SOLUCIONES
PARA LA TORRE DE PISA

EJEMPLOS DE SOLUCIONES FISICAS
DIFERENTES

ELECTROSMOSIS
PRECARGA POR VACIO
PANTALLA PLASTICA-BENTONITA, ETC.
INYECCIONES QUIMICAS SELECTIVAS (ej. PRESA
SERRE PONCON)
TIERRA ARMADA
GEOTEXILES
DRENES VERTICALES DE FIBRA
ESTABILIZACION COLUMNAS DE PIEDRA
ESTABILIZACION COLUMNAS-CAL
PILOTES-RAIZ
PILOTES CCP
COMPACTACION PROFUNDA ETC. ETC.

COMPONENTES DEL DR. LAND

PARA LA INVENCIÓN

SUEÑOS LIBRES

TRABAJO DIREC-
TIVO DURO

EJEMPLOS MEXICANOS

FUNDACIONES FLOTANTES

"CENTRO DE TENSION" DE CARRILLO+BOMBEO DE INYECCION ETC.

PILOTES DE CONTROL

ETC. ETC.

MEMO C

2.3. TENDENCIA SICOLOGICA DE CONSECUENCIA
DE LA INGENIERIA GEOTECNICA
INVENTIVA

IMPOSICION DE EQUIPO ESPECIAL Y PESADO
DEMANDAS EXCESIVAMENTE AGOBIANTES DE LA SOCIEDAD

PASADO: AMOR Y RESPETO POR LA NATURALEZA DELICADA DE LOS SUELOS

TENDENCIA: DESCONSIDERACION BRUTAL DE SUELOS COMO MOLESTIA,
PRESCINDIR DE ELLOS.
SOLUCIONES A PESAR DE CONDICIONES SUBSUELO.

EL HOMBRE, EN CIVILIZACION EN DESARROLLO
VA CONTRA LA NATURALEZA

¿A QUE { SOCIAL
ECOLOGICO } COSTO?

3. RECETAS E HIPOTESIS DE TRABAJO

4. CORRELACIONES REEMPLAZANDO RECETAS

FALACIAS

RECETAS ≠ CORRELACIONES, ECUACIONES, LEYES

CORRELACIONES → ESTADISTICAS ESPURIAS,
DISPERSIONES FRUSTANTES

MEMO D

A. MECANICA DE SUELOS CONVENCIONAL

1. TERZAGHI: DE LA TEORIA A LA PRACTICA

1.1. CAPACIDADES Y COMPLEJIDADES DE
GEOLOGIA ABANDONADAS

1.2. CUANTITATIVISMO
DETERMINISTICO $\left\{ \begin{array}{l} \text{ENSAYO SENSATO} \\ \text{ANALISIS MATEMATICO} \end{array} \right.$

1.3. PARAMETRO-UNICO CAUSA-EFECIO
RACIONALIZACIONES

1.4. CLASIFICACION SUELOS = f(SOLIDOS, PARTICULAS FUNDAMEN-
TALES)

1.5. INTERFERENCIA DE AGUA ("PRESIONES NEUTRAS")
A SER SEPARADAS, ej: SUSTRADAS
ECUACION PRESIONES "EFECTIVAS"

1.6 DICOTOMIA: 100% - 0%, NO VISION DEL HISTOGRAMA DE-DISPERSION

COHESIVO, NO-COHESIVO
FALLA, ASENTAMIENTO
PLASTICO, NO-PLASTICO
DRENADO, NO-DRENADO
"INALTERADO" (PARCIALMENTE), "REMOLDEADO" (TOTALMENTE)
ETC.

VISION DE SOLUCION

ROTURA ./. ENSAYO DESTRUCTIVO & F.S.

2. PERIODO DE DISCIPULADO DISPERSO & CONSO-
LIDACION - 1936 - '48 (ROTTERDAM) - AMPLIO ESPECTRO

3. 1948 TAYLOR - PROBLEMAS FUNDAMENTALES Y
CUESTIONAMIENTOS

TERZAGHI-PECK - INGENIERIA DE SUELOS
PRACTICA, RECETAS

MEMO F₁

4. PERIODO 1945-'60

- 4.1. RECONOCIMIENTO RESPETUOSO DE SENSIBILIDADES DE CONDICIONES NATURALES CONSULTORIA
- 4.2. VISION - PROBLEMA - HETEROGENEO
- 4.3. COMPORTAMIENTOS PLASTICIDAD, ACTIVIDAD FRACCION - ARCILLA
- 4.4. ESTRUCTURA Y SENSIBILIDAD... MUESTREO
- 4.5. ENSAYO IN-SITU INICIAL
- 4.6. ENSAYO TRIAXIAL - CAMINO DE TENSIONES ASUMIDO
- 4.7. GERMINACION CONOCIMIENTO DE K^o VARIABLE

5. PERIODO 1950-'60

- 5.1. EFECTOS QUIMICOS DE COLOIDES
MINEROLOGIA, RASTREO DE ELEMENTOS ESTABILIZACION, etc... → PROPIO ENTENDIMIENTO DE INVESTIGADORES MEJORADO
- 5.2. 1957 LONDRES:
HUMEDA VS. SECA COMPACTACION
 ϕ' VS. ϕ Y $C' = 0$ VS. C_u
- 5.3. CONFERENCIA INVESTIGACION DE CORTE BOULDER, 1960
ANALISIS ESTABILIDAD PRESIONES EFECTIVAS
- 5.4. MALPASSET 1959 --- → MECANICA DE ROCAS; DISCONTINUIDAD.

MEMO F₂

6. PARIS, 1961

6.1. PILOTES, SUCESION DE FUNDACIONES PROFUNDAS
CAPACIDAD DE CARGA RIGIDO-PLASTICO
ECUACIONES, COEFICIENTES.

6.2. INTERFERENCIA DEFORMACIONES.

7. PERIODO > 1966

7.1. DEFORMACIONES COMO PREOCUPACION DOMINANTE

7.2. PILOTES EXCAVADOS DE GRAN DIAMETRO,
LONDRES:
DEFORMACIONES.

7.3. ANALISIS ELEMENTOS FINITOS.

7.4. ESTADO CRITICO DE MECANICA DE SUELOS,
CULMINACION DE MODELO MENTAL DE
ARCILLAS REMOLDEADAS ETC.

7.5. FRUSTRACION CON
ENSAYOS $\left\{ \begin{array}{l} \text{LABORATORIO} \left\{ \begin{array}{l} \text{CAMINO DE TENSIONES} \\ \text{EN LA PRACTICA,} \\ \text{CUESTIONADAS: CONDICIONES} \\ \text{INICIALES.} \end{array} \right. \\ \text{IN SITU, PRIME-} \\ \text{RAS DESILUSIONES} \end{array} \right.$

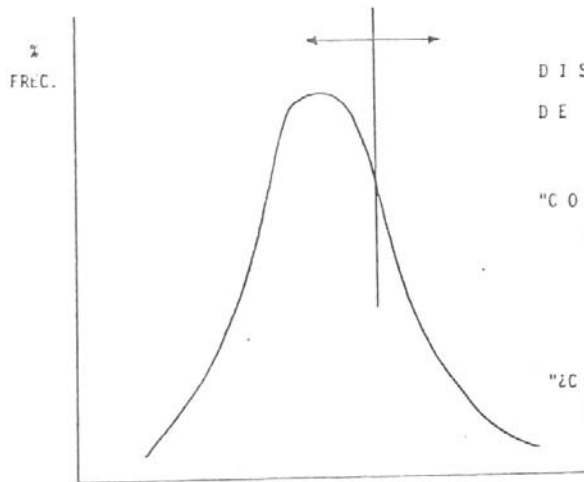
7.6. LICUEFACCION SOLUCIONES PARAGUAS

8. PERIODO > 1970

8.1. IMPREVISIBILIDAD Y
ESTADISTICAS

8.2. REGRESO DE INVENCION Y
DOMINIO DE EQUIPOS &
PROCEDIMIENTOS

MEMO F₃



DISCONTINUIDAD
DE DECISION SI-NO

"CONTINUO DE
REALIDAD"

"¿HECHO?"

"¿C I E N C I A?"

"¿CERTIDUMBRE
MATEMÁTICA?"

"TEORIAS" COMENZADAS FRECUENTEMENTE
CON 3 O 4 PUNTOS

INVENCION GENERALMENTE MUCHO MEJOR
QUE PARA SUPERVIVENCIA A F.S. = 1.00

MEMO 6

CALIDAD DE MUESTREO

¿CUANTIFICACION DE CALIDAD?

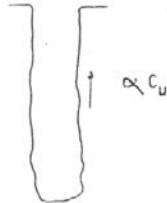
INTACTA (O CAMPO)	}	MUESTRAS & ELEMENTOS DE SUELOS
PERFECTA		
"INALTERADA"		
PARCIALMENTE ALTERADA		
COMPLETAMENTE REMOLDEADA		

NO INFORMACION SISTEMATICA EN ARTICULOS
TECNICOS

EN EL MEJOR CASO "ESPECIFICACIONES DE ME-
TODO"

NO "ESPECIFICACIONES DE PRODUCTO
TERMINADO"

EN CONTRIBUCIONES DE ESTADOS DEL CONOCI-
MIENTO, TODAS LAS MUESTRAS DE MAS DE 30 A-
ÑOS ETC. AGRUPADAS DE ACUERDO A LA DESIG-
NACION "INALTERADA"



EJ.: VALORES DE α PARA
PILOTES C_u EN
1948 = $R_c/2$
¿MODERNO α VANE etc.?

MEMO H

CURIOSIDAD - ESFUERZO - EXPERIENCIA

JUVENTUD - ADOLESCENCIA - MADUREZ

MAS IMPORTANTE DE ESTAS ES CURIOSIDAD

"LOS NUEVOS ESTUDIANTES NO CONOCEN
LAS VIEJAS LECCIONES?"

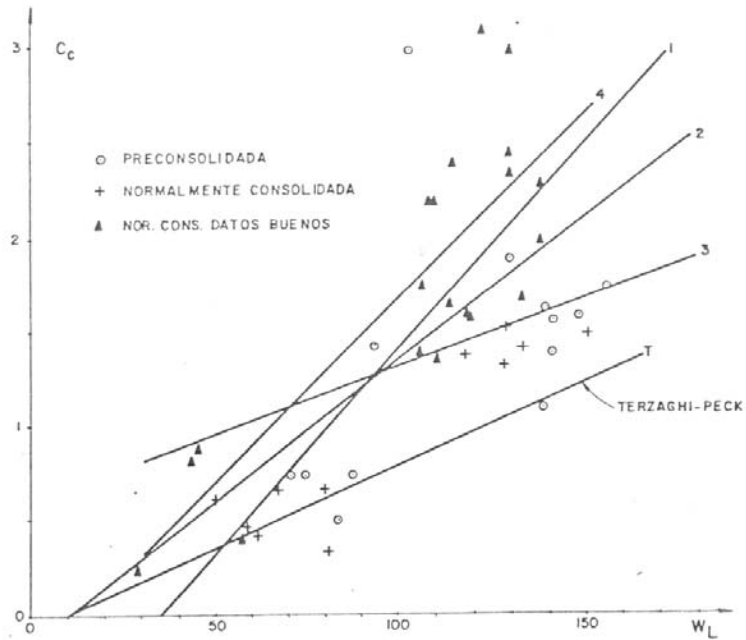
¿LOS VIEJOS ESTUDIANTES HAN ENGENDRADO
POR LOS VIEJOS PROBLEMAS EL MENOSPRECIO
DE LA INTIMIDAD?"

RESPECTO POR EL PASADO

FIDELIDAD AL PRESENTE

INTERES
COMPROMISO } ESTA EN EL FUTURO

MEMO I



	A-TIPO ARCILLA	r	*	B - CONDICIONES DE TENSION	r	*	A-B-C	r	*		
NORM. CONS. n = 32 + Δ	0,0182(W _L -19,05) CORRELACION 1	0,74	3 ^o	σ' _z	0,3289+0,01688 W _L -1,0817 (σ' _z)	0,80	γ' _z	0,1902+0,0026 W _L -0,1700 (γ' _z)	0,71	4 ^o	
				P _c	-0,1232+0,01822 W _L -0,3674 (P _c)	0,75	2 ^o	P _c	0,09859+0,00076 W _L -0,0206 (P _c)	0,65	5 ^o
				e _o	C _R = 0,00275(W _L -30,58)	0,65	5 ^o				
Precons. n = 13 2 ≤ OCR ≤ 25 ○	0,007386(W _L +81,74) CORRELACION 3	0,26	3 ^o	γ' _z	1,3185+0,004054 W _L -1,115 (γ' _z)	0,51	1 ^o	σ' _z	0,3511+0,0002567 W _L -0,1081 (σ' _z)	0,29	4 ^o
				P _c	0,7553+0,007444 W _L -0,1855 (P _c)	0,42	2 ^o	P _c	0,300+0,0005872 W _L -0,02224 (P _c)	0,25	5 ^o
				e _o	C _R = 0,0005767(W _L +488,30)	0,19	6 ^o				
TODOS DATOS n = 45	0,01426(W _L -1,842) CORRELACION 2	0,63	2 ^o	σ' _z	0,4268+0,01272 W _L -0,6561 (σ' _z)	0,66	1 ^o	σ' _z	0,2044+0,001798 W _L -0,08214 (σ' _z)	0,54	3 ^o
				e _o	C _R = 0,00199(W _L +74,20)	0,52	4 ^o				
** n = 20 ▲	0,02025(W _L -14,63) CORRELACION 4	0,77	2 ^o	σ' _z	0,2513+0,01809 W _L -0,7954 (σ' _z)	0,80	1 ^o	σ' _z	0,1953+0,002616 W _L -0,1203 (σ' _z)	0,71	3 ^o
				e _o	C _R = 0,002943(W _L +38,22)	0,68	4 ^o				

* CORRELACION POR ORDEN DE MÉRITO
 ** NORM. CONS. DATOS RECIENTES ESPECIALMENTE CUIDADOSOS DE 32 ENSAYOS DE CORREL. I

FIG. 1 BREVE INVESTIGACION DE CORRELACIONES C_c, C_R EN COMPARACION CON ESPECTATIVAS TEÓRICAS

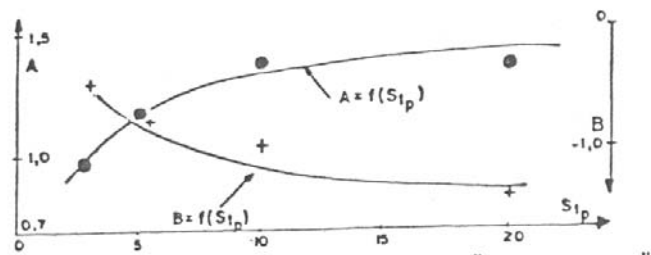
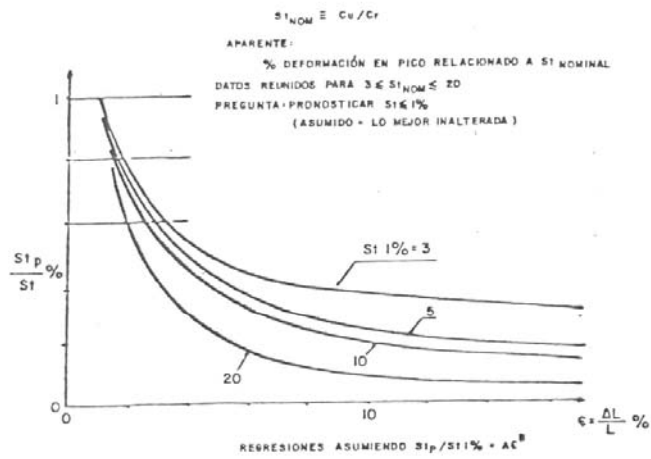
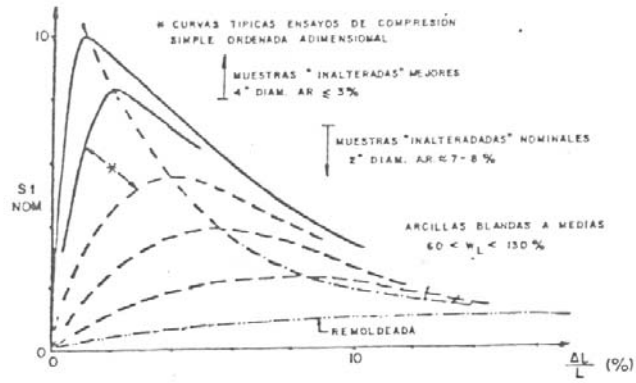


FIG. 2 CALIDAD DEL MUESTREO "INALTERADO" REFLEJADO EN S1 PARCIAL

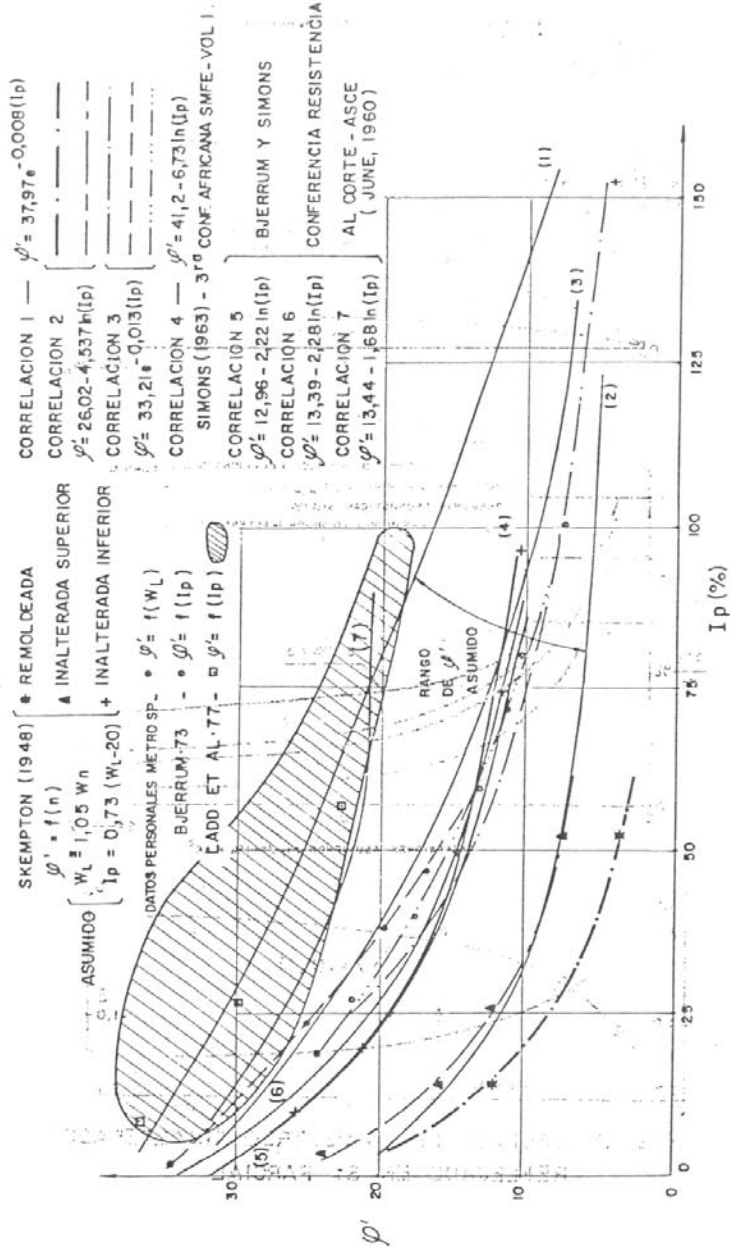


FIG.3 DATOS BASICOS ENCUENTRADOS $\phi'_x(I_p)$

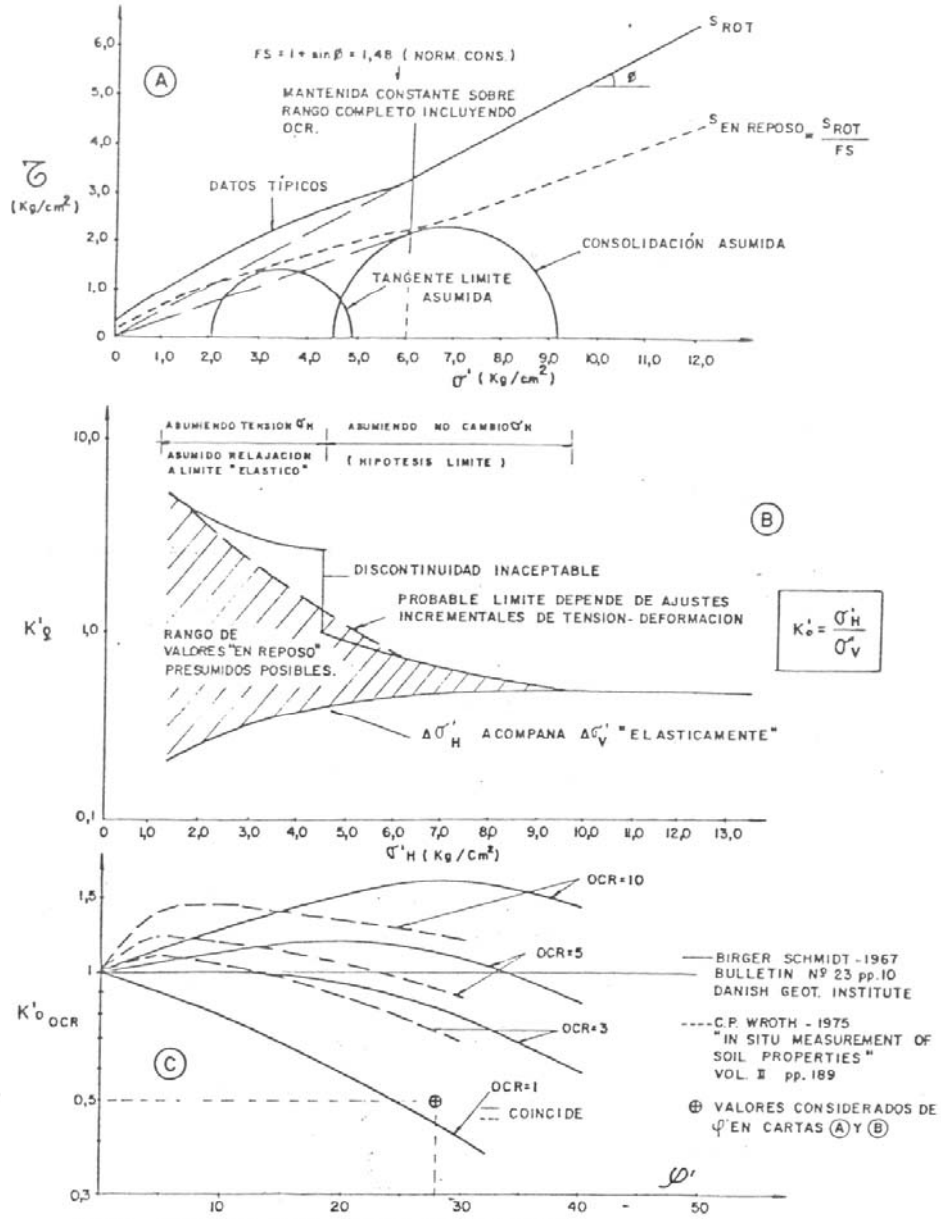


FIG 4 - VALORES "ELÁSTICOS" K'_0 DERIVABLES SUGERIDOS, ARCILLAS OCR.

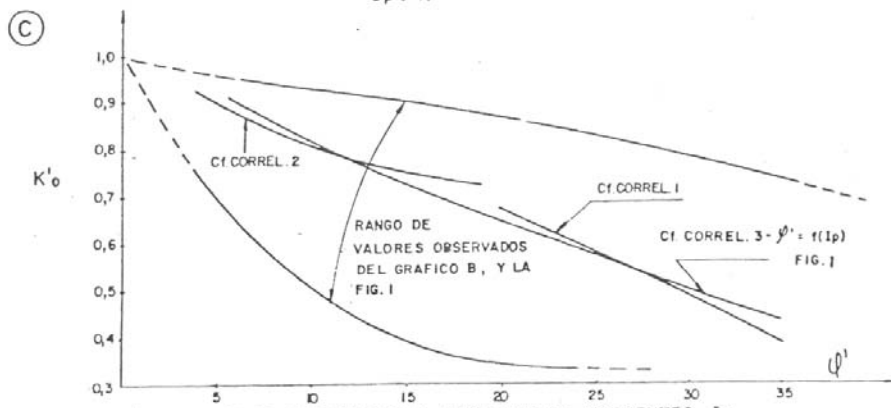
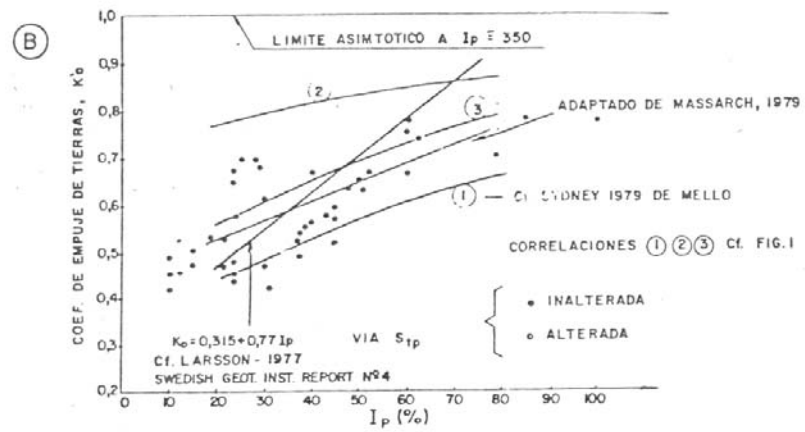
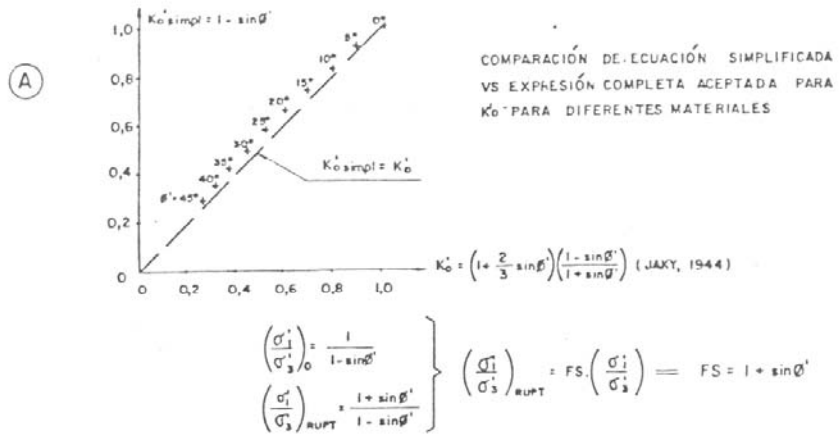


FIG. 5 - K_0 NORM. CONS. POSIBLE PARA ARCILLAS DE DIFERENTES I_p

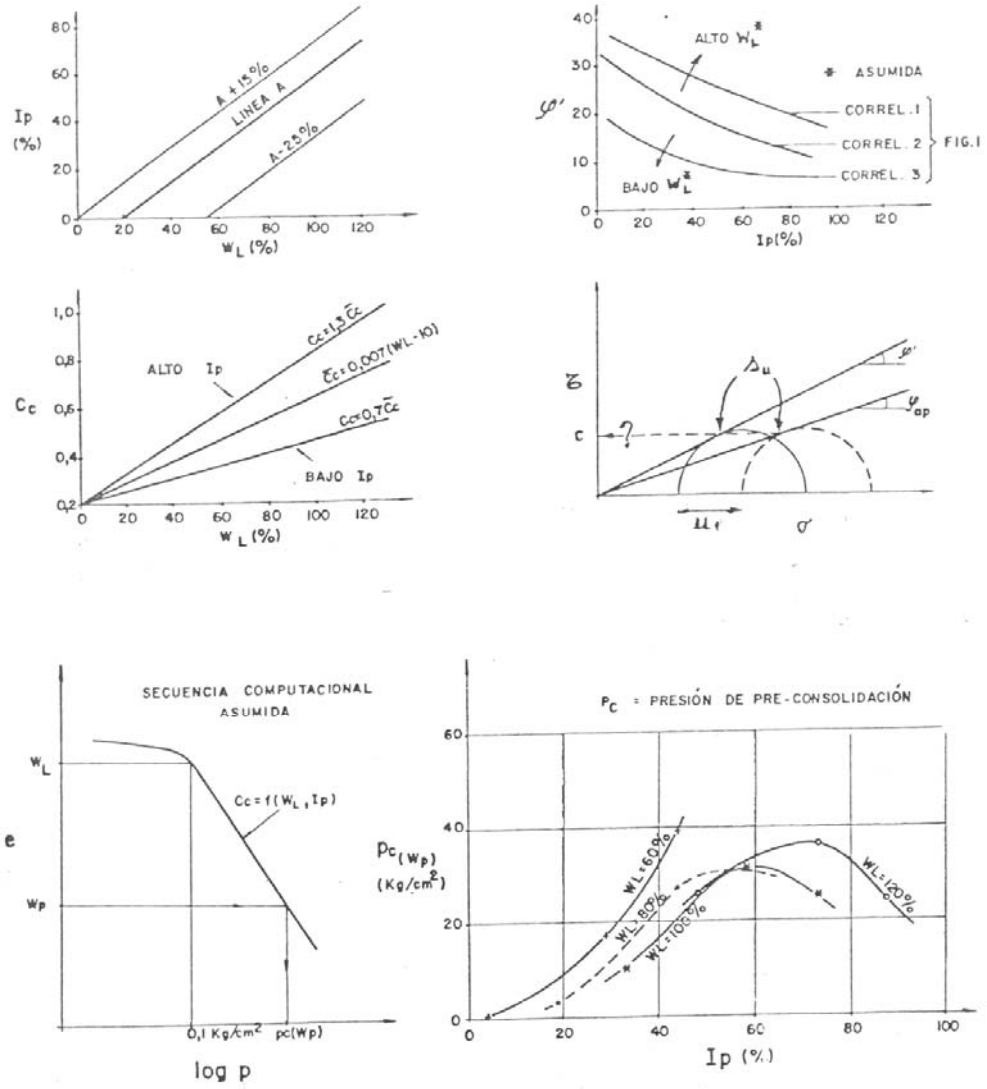


FIG.6 INSERCIÓN CRITERIOSA INTENTADA DE (W_L, P_c) SIMULTANEOS PARA DERIVACIÓN DE PRESIÓN DE CONSOLIDACIÓN EQUIVALENTE PARA w_p .

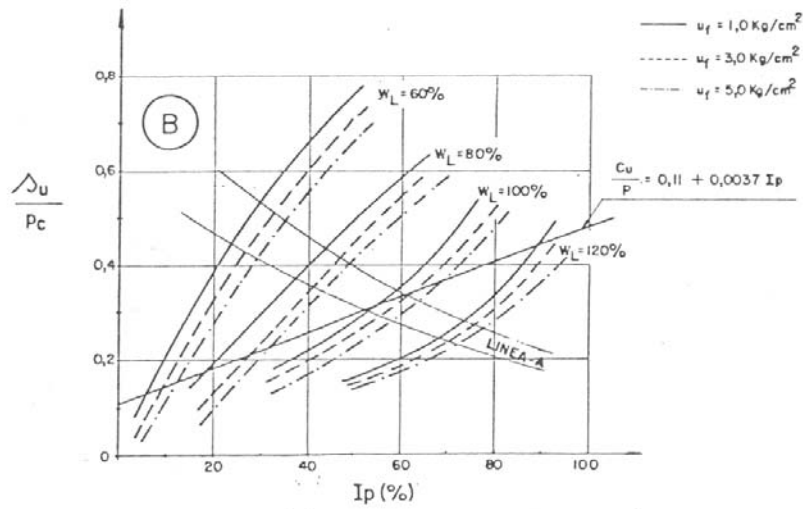
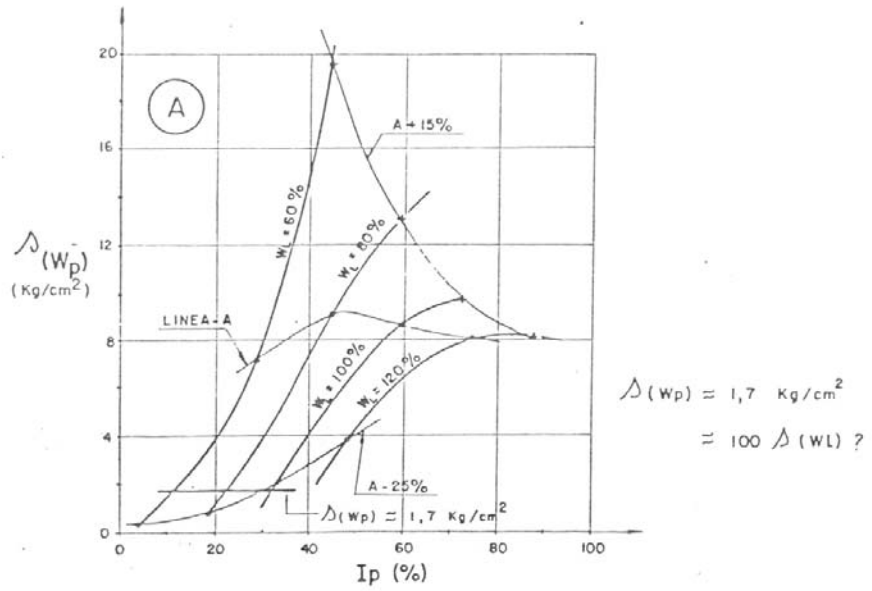


FIG. 7 DERIVACION INTENTADA DE $\Delta u_{(W_p)} = f(W_L, I_p, u_f)$ Y RANGOS DEMOSTRABLEMENTE PROBABLES

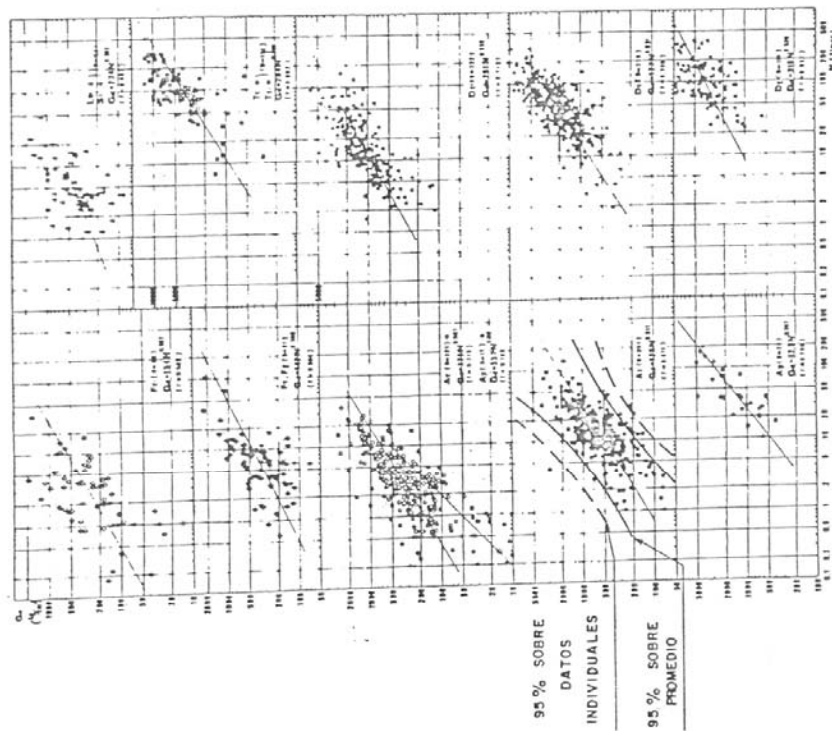


FIG 8 - CORRELACIONES ESTADISTICAS DEL MÓDULO DE CORTE V_s SPT (SUELOS DIFERENTES)

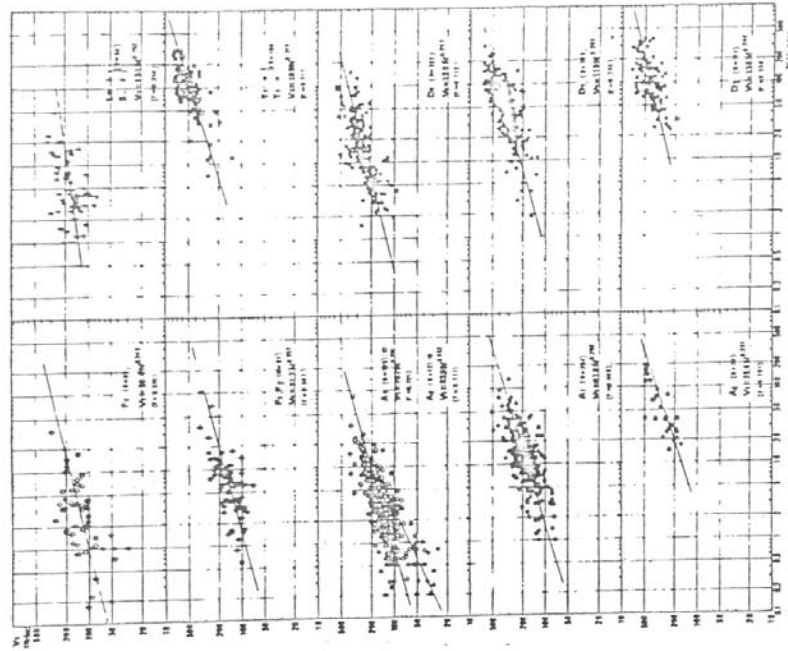
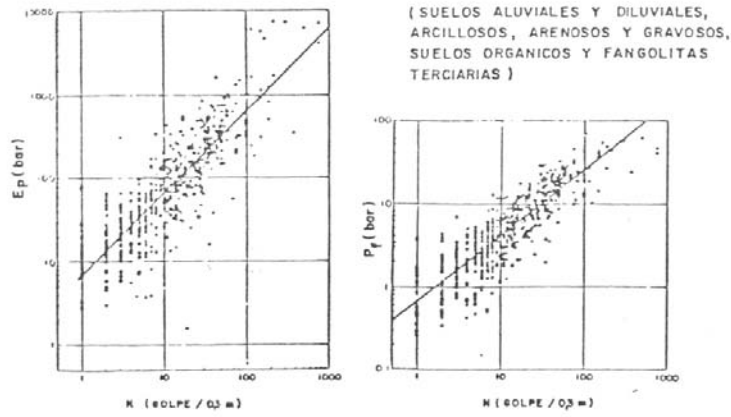
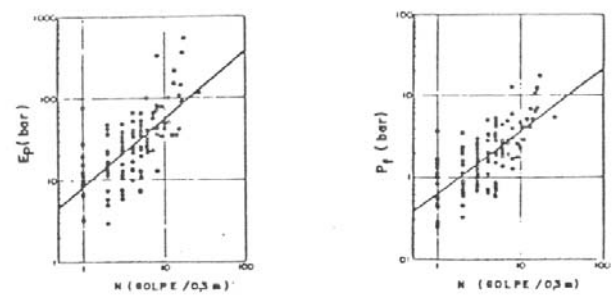


FIG. 9 - CORRELACIONES ESTADISTICAS DE VELOCIDADES DE ONDAS V_s SPT (DIFERENTES SUELOS)

TODOS LOS DATOS



SUELOS ARCILLOSOS ALUVIALES



Apud TSUCHIYA, HB TOYOOKA, Y 1982

FIG. 10 CORRELACIONES DE SPT Vs PARAMETROS DE PRESIOMETRO

EJEMPLO DE ASOCIACIONES IRRACIONALES DE PALABRAS
 COMPORTAMIENTO PLÁSTICO EN ARCILLAS COMPACTADAS EN PRESAS

∴ ALTA PLASTICIDAD TENSION-DEFORMACION

∴ INDICE DE PLASTICIDAD ALTO ?

ie. ALTO $W_L - W_p \equiv$ PROPIEDAD DEL TIPO DE ARCILLA
 \equiv RANGO DE W PARA PLASTICIDAD POTENCIAL

PLASTICIDAD NECESARIA A UNA CONDICIÓN DADA, A $W_{COMPACTACION}$

DIFERENCIA $\left\langle \begin{array}{l} \text{SER} \\ \text{ESTAR} \end{array} \right\rangle$ — ESENCIA

CONDICIÓN A UNA HUMEDAD OPTIMA DE COMPACTACIÓN

USADA COMO INDICE DE I_p APROXIMACIÓN

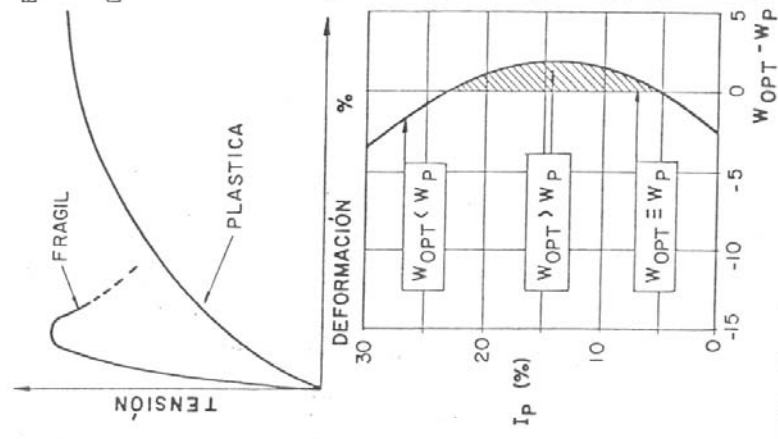
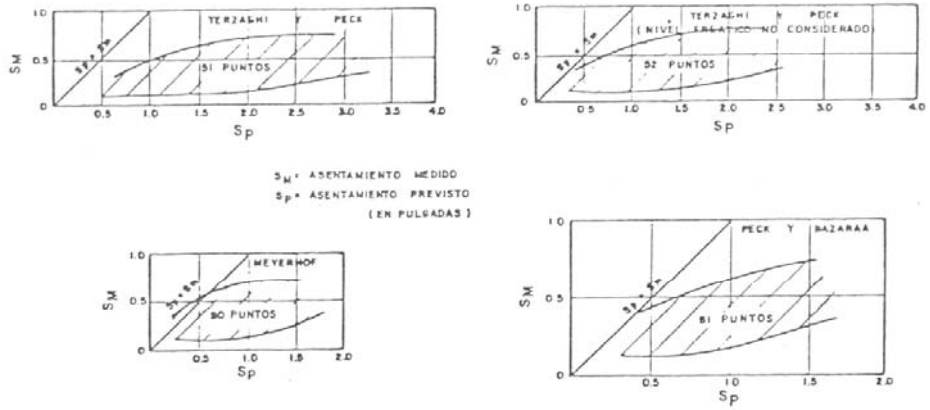
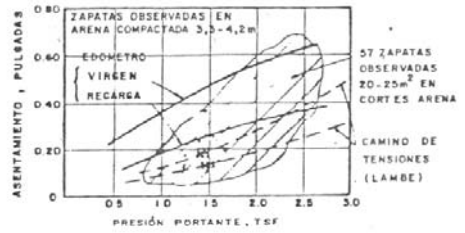


FIG. II PLASTICIDAD DE NUCLEO COMPACTADO VS. AGRIETAMIENTO

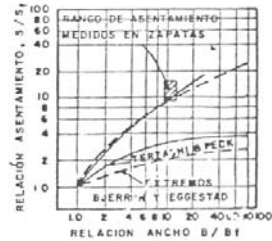


A-) ASENTAMIENTOS MEDIDOS VS. PREVISTOS = f (SPT)



C-) ASENTAMIENTOS OBSERVADOS VS. PREDECIDOS EN ZAPATAS

B-) SPT VS ASENTAMIENTO ENSAYO DE CARGA DE PLACA



D-) ASENTAMIENTO DE ZAPATAS = f (ANCHO)

FIG.12- DISPERSIONES DE PREDICCIONES, ZAPATAS EN ARENAS

(APUD D. D'APPOLONIA ET AL, JOURNAL ASCE SMFD VOL 94 3M3 1966, VOL 96 5M2 1970)

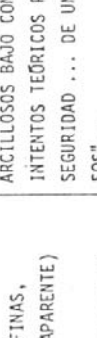
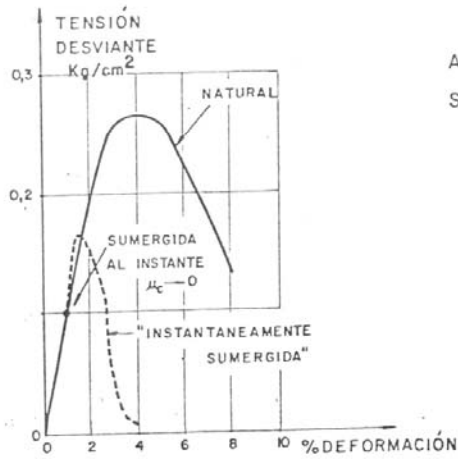
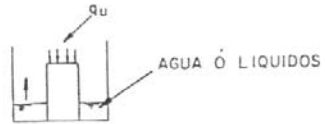
HISTORICO DE PRACTICA DE TUNELERIA APUD PECK, 1969; TERZAGHI, 1946	MECANICA DE SUELOS TRADICIONAL ESTADO DEL CONOCIMIENTO (PECK, 1969)	PERFILADO MULTIPLE ACTUAL DE DATOS GEOTECNICOS
<p>SOLOS PLASTICOS (SQUEEZING SOILS)</p> <p>TERRENO FIRME</p> <p>TERRENO MOVEDIZO (RUNNING GROUND)</p>	<p>ARCILLAS MUY BLANDAS A MEDIAS</p> <p>ARCILLAS FIRMES GRANULAR CEMENTADO O COESIVO</p> <p>PERFECTAMENTE NO COESIVOS: ARENAS SECAS GRAVAS-LIMPIAS SUELTAS</p>	<p>SPT → ESTIMADO s</p> <p>CPTU → ESTIMADO s, E, Cv</p> <p>INALTERADO → PERFECTO → ELEMENTO INTACTO</p> <p>ARCILLAS</p> <p>Pc, Cc, Cv</p> <p>S% OCR</p> <p>K'o (±)</p> <p>N.A. + Ufiltración</p>
<p>TERRENO QUE DESPLACA (RAVELLING GROUND)</p> <p>TERRENO QUE FLUI (FLOWING GROUND)</p>	<p>ARCILLA SENSIBLE (INCL. LEDA) NORMALMENTE CONSOLIDADA</p> <p>ARCILLA PLASTICA GLACIAL</p> <p>ARCILLA PLASTICA FISSURADA (LONDRES, BOOM)</p> <p>ESTABILIDAD EN LA MAYORIA DE LOS SUELOS</p> <p>PAG. 228 "CON LA EXCEPCIÓN DE SUELOS PLÁSTICOS ARCILLOSOS BAJO CONDICIONES NO DRENADAS, LOS INTENTOS TEÓRICOS PARA ESTIMAR EL FACTOR DE SEGURIDAD ... DE UN FRENTE NO HAN SIDO EXITOSOS" ...</p> <p>"DETALLES DE ESTRATIGRAFIA Y ... ESTRUCTURA SECUNDARIA DEL DEPOSITO DE SUELO. COMO ESTOS DETALLES SON IMPREDECIBLES, NO CORRELACIÓN SATISFACTORIA ENTRE F.S. Y LAS PROPIEDADES DEL SUELO MEDIDAS PUEDE SER ANTICIPADA".</p>	<p>ENSAYOS</p>  <p>ENVOLVENTE LINEALIZADA</p> <p>CUADRANTE (QU) CORTE PARA CAMINO DE INTERES</p> <p>ARENAS, ARENAS ARCILLOSAS, LIMOS, ETC.</p> <p>S%</p> <p>N.A. + Ufiltración</p> <p>Uc, E, phi', c', ESTIMADO</p> <p>Pc, K'o</p>
<p>TIEMPO AUTO-SOPORTE?</p>	<p>TIEMPO AUTO-SOPORTE?</p>	<p>TIEMPO AUTO-SOPORTE?</p>

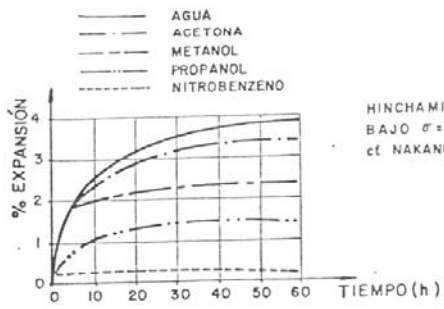
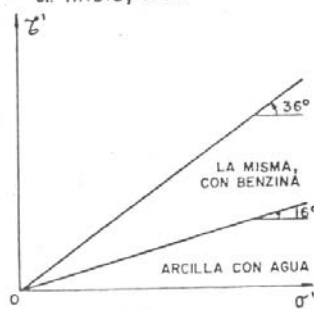
FIG. 13 PERFIL DE SUBSUELO IDEALIZADO Y PARAMETROS ESTIMADOS PARA ESTABILIDAD



ARCILLA PLÁSTICA
SATURADA BLANDA



ENVOLVENTE DE MOHR
cf. HABIB, 1953



HINCHAMIENTO FANGOLITA
BAJO $\sigma = 1 \text{ kgf/cm}^2$
cf. NAKANO, 1967 (FIG. 4)

FIG. 14 INFLUENCIA DE μ_c Y DIFERENTES LIQUIDOS EN COMPRESIÓN SIMPLE

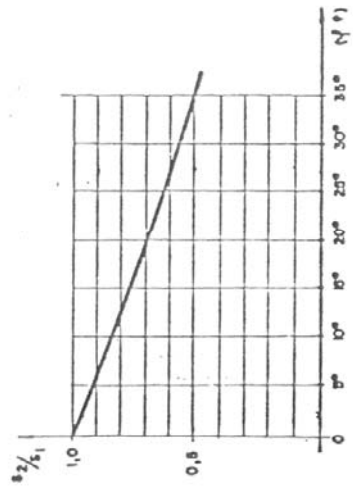
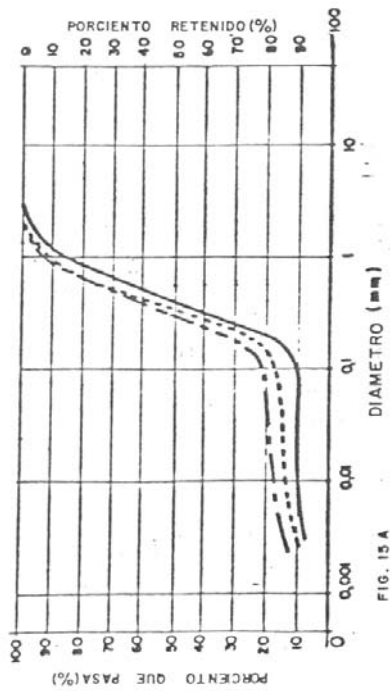


FIG. 15 C. REDUCCIÓN DE S_u REQUERIDO PARA ESTABILIDAD DEL FRENTE EN CASO DE APLICABILIDAD DE UN VALOR DE ϕ .

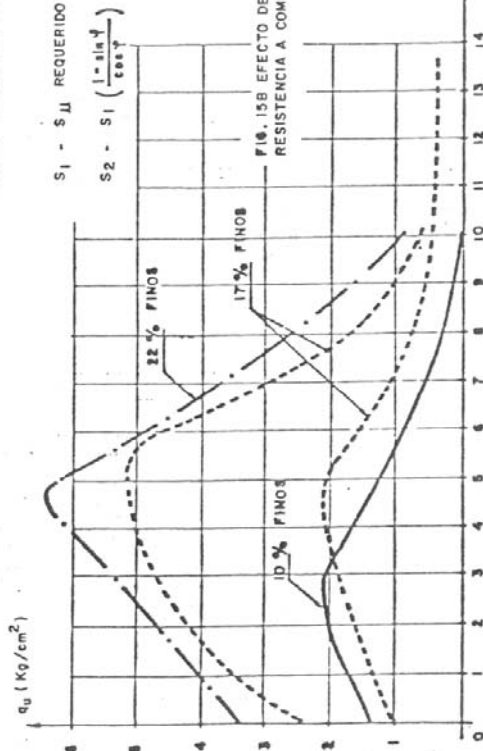


FIG. 15 - DATOS SOBRE COMPRESIÓN SIMPLE DE ARENAS ARCILLOSAS, SAN PABLO (FIG. 15 A - 15 B) INFLUENCIA DE ϕ SOBRE ESTABILIDAD DEL FRENTE. (FIG. 15 C)

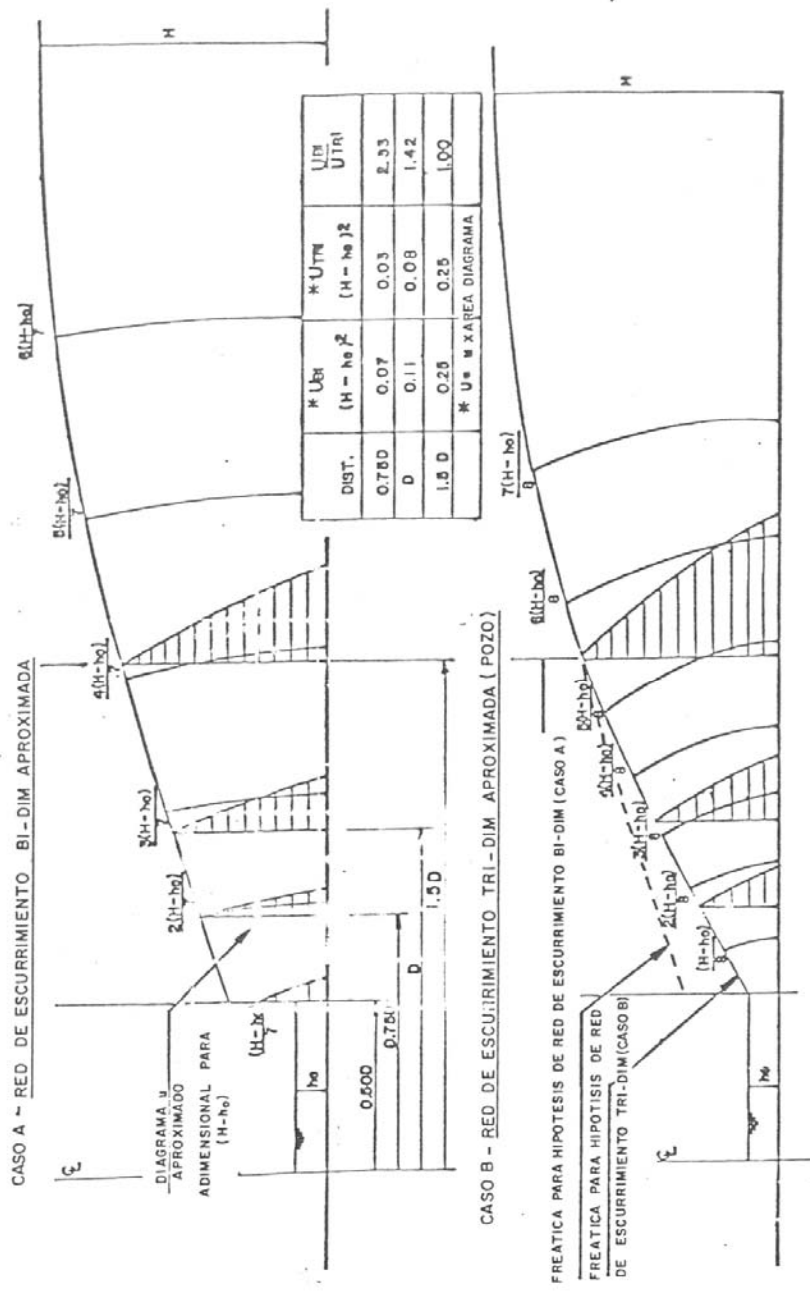


FIG 16 - FREATICA TRANSITORIA SUPUESTA NO AFECTADA A 1,5D DELANTE DEL FRENTE

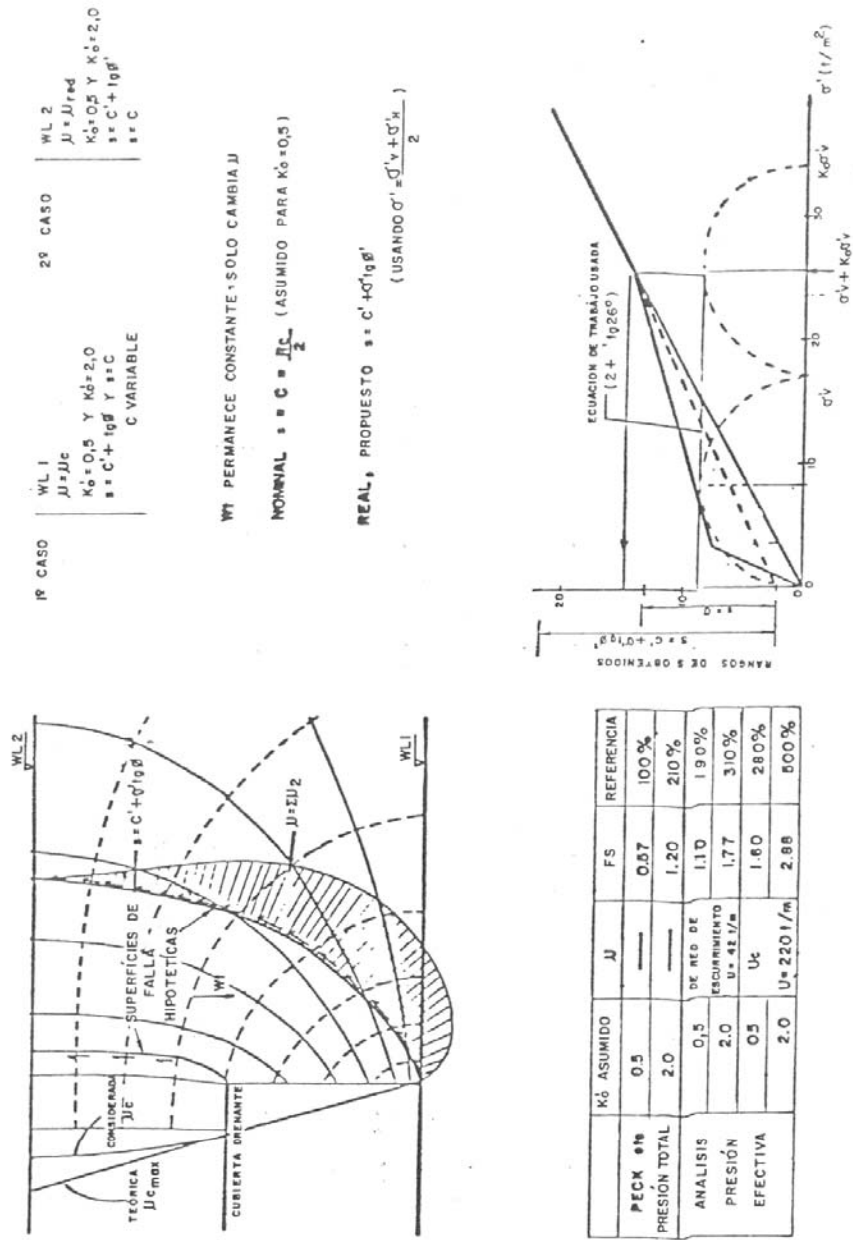


FIG. 17 INDICACIÓN ESQUEMATICA DE PROCEDIMIENTO PARA ANALISES DE PRESIONES EFECTIVAS MERAMENTE PARA COMPARACIONES

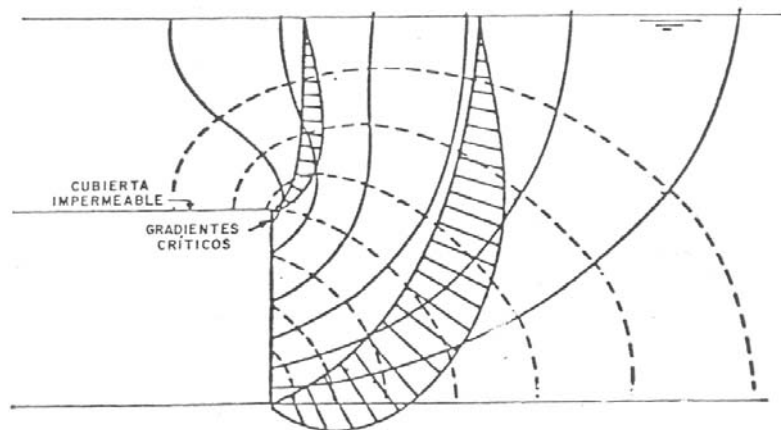
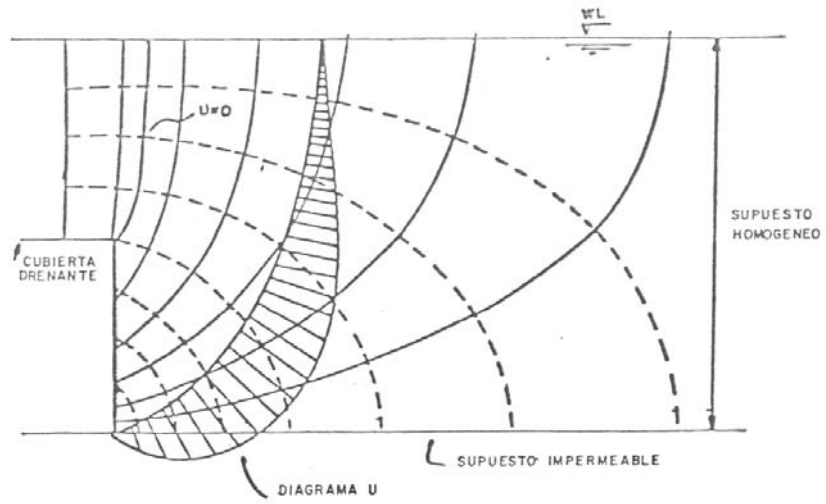


FIG. 18 - CASOS DE REDES DE ESCURRIMIENTO SIMPLES PARA COMPARACIÓN

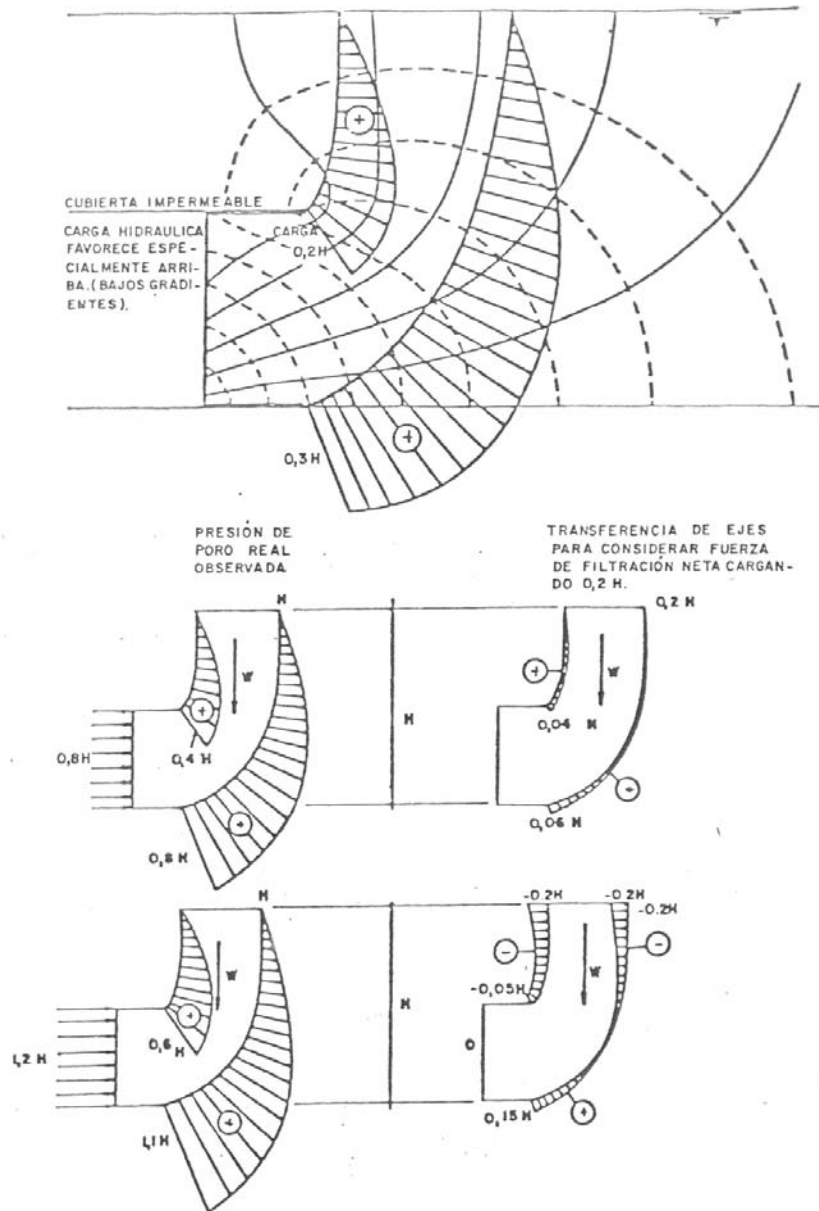


FIG. 19 - CASO ADICIONAL, BORDE CORTANTE AVANZADO. CONSIDERACIÓN IDEALIZADA DE AIRE COMPRIMIDO.

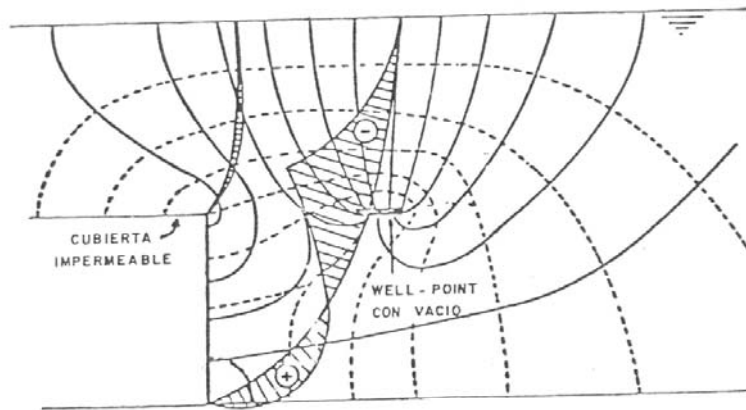
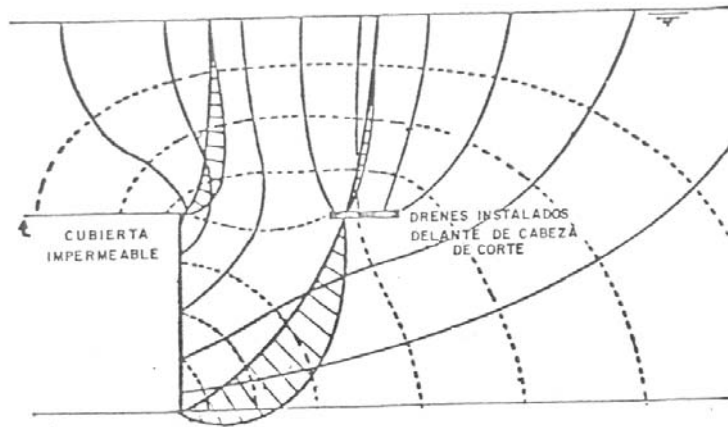
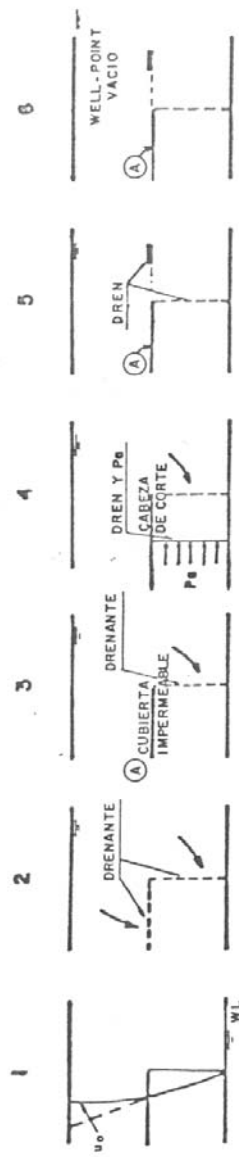


FIG. 20 CASOS ADICIONALES CARACTERISTICAS DRENAJE ESPECIAL ADELANTE DEL FRENTE



a) $P_a = 0$
 b) $P_a = 0,8H$
 c) $P_a = 1,2H$

AIRE COMPRIMIDO

$U_{DERECHA}^{T_u}$ (1/m)	-161	42	43	a) 80 b) 1,5 c) -7	19	-30
$U_{IZQUIERDA}^{E_u}$ (1/m)	-100	0	5	a) 19 b) 4 c) -15	3	4

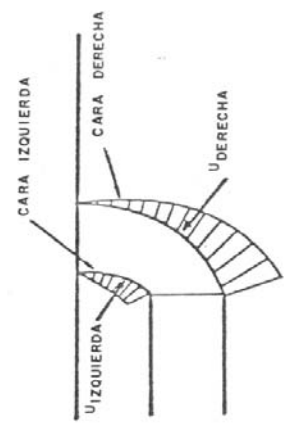


FIG.21 - COMPARACION, SUMARIA DE BENEFICIOS A LA ESTABILIDAD DE MASA ESQUEMATICA, MERAMENTE VALORES U LIMITES.

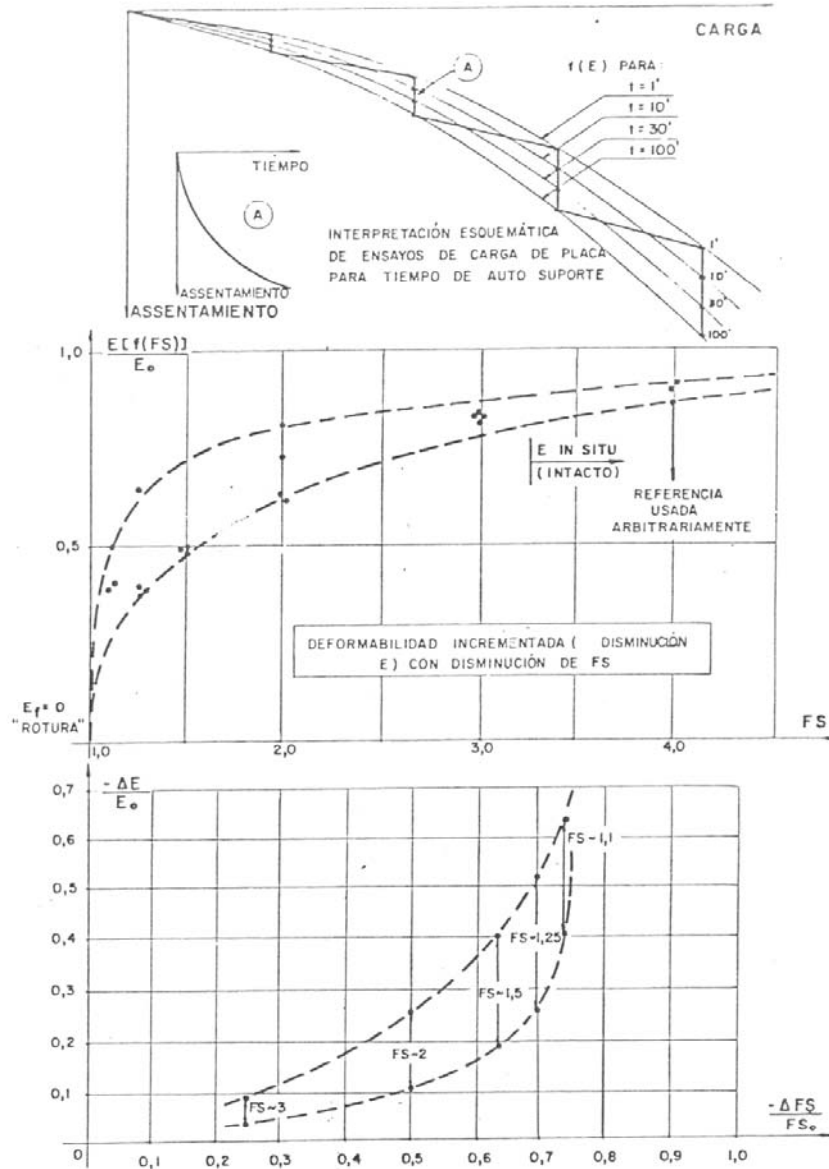


FIG. 22 TRATAMIENTO TÍPICO DE DATOS DE ENSAYOS DE CARGA DE PLACA (CARGA)

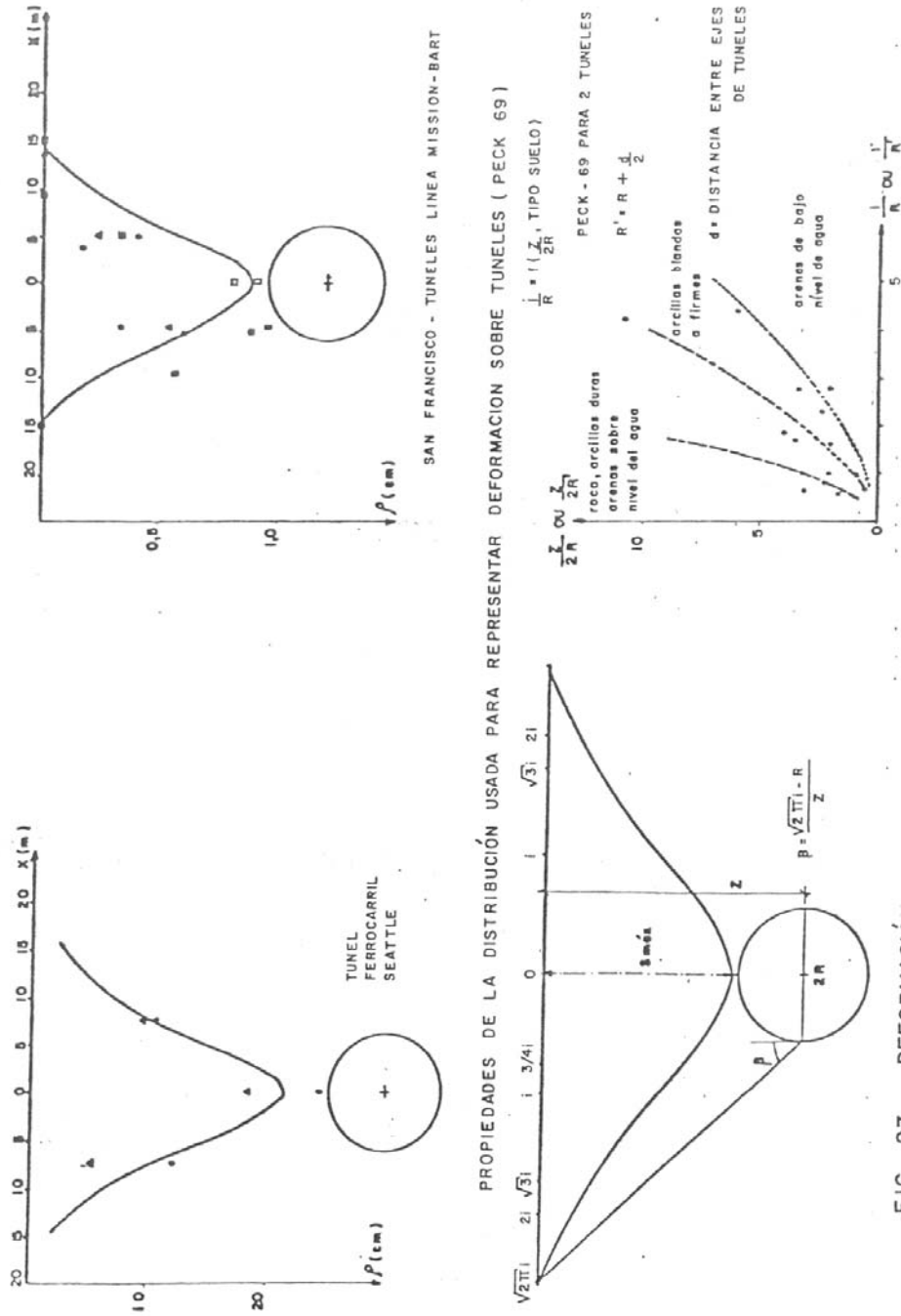


FIG. 23 DEFORMACIÓN EN TUNELES (PECK 69)

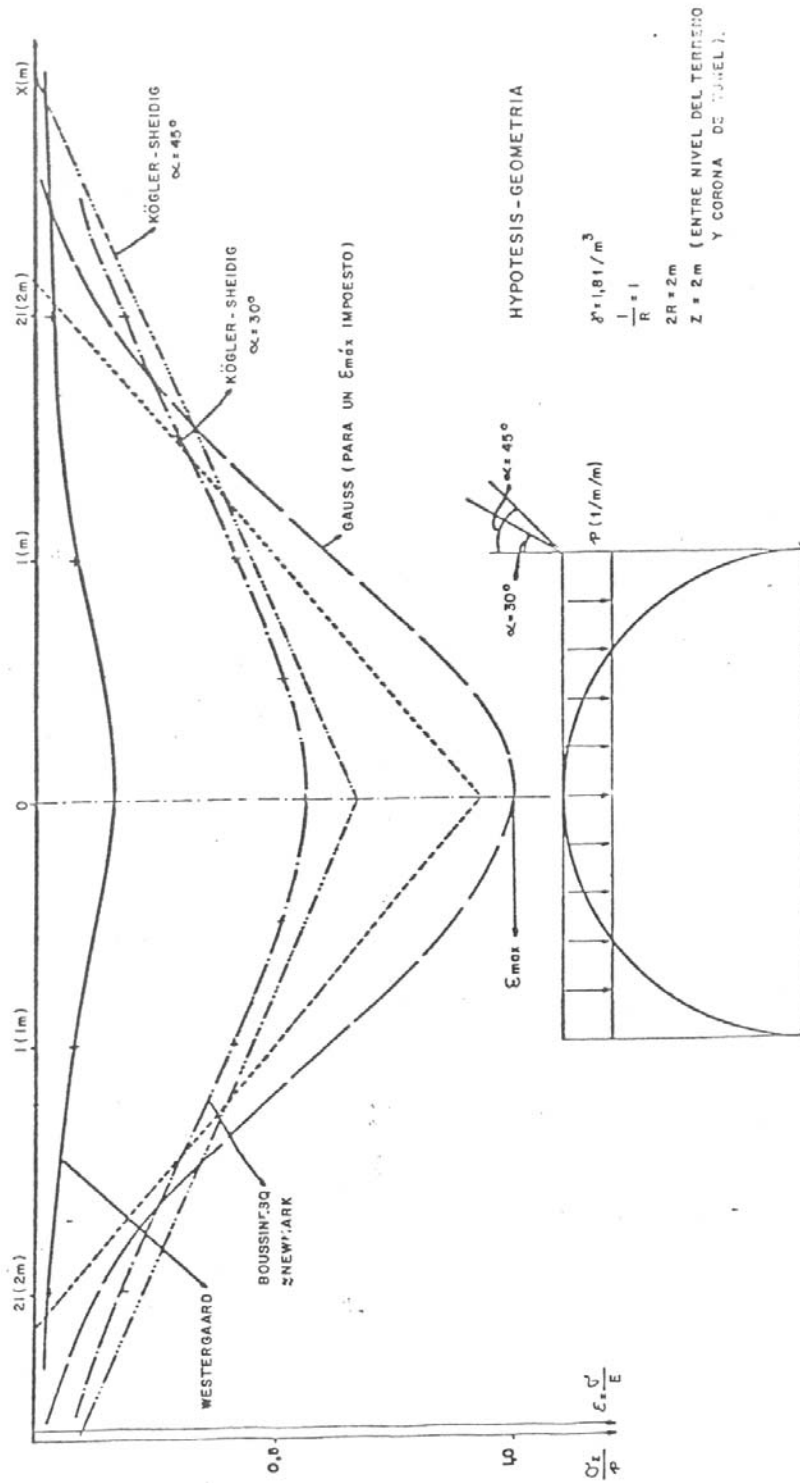
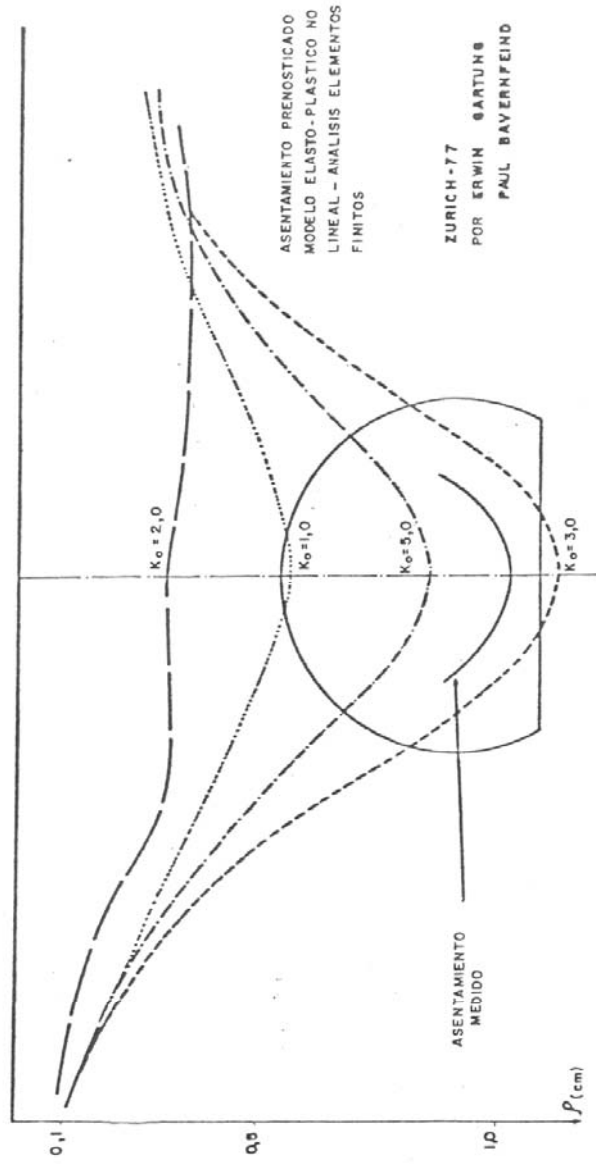


FIG 24 DEFORMACIONES DEBIDAS A RELAJACION DE TENSIONES Vs CURVA GAUSIANA



ASENTAMIENTO PRENOTICADO
 MODELO ELASTO-PLASTICO NO
 LINEAL - ANALISIS ELEMENTOS
 FINITOS

ZURICH-77
 POR ERWIN GARTUNG
 PAUL BAYERNFEIND

TUNEL SUBTERRANEO DE NURENBERG - ALEMANIA - ESTACION CERCANA IGLESIA ST. LORENZ - SECCION REFERENCIA

FIG. 25 - ASENTAMIENTOS COMPUTADOS PARA VARIOS VALORES DE K_0

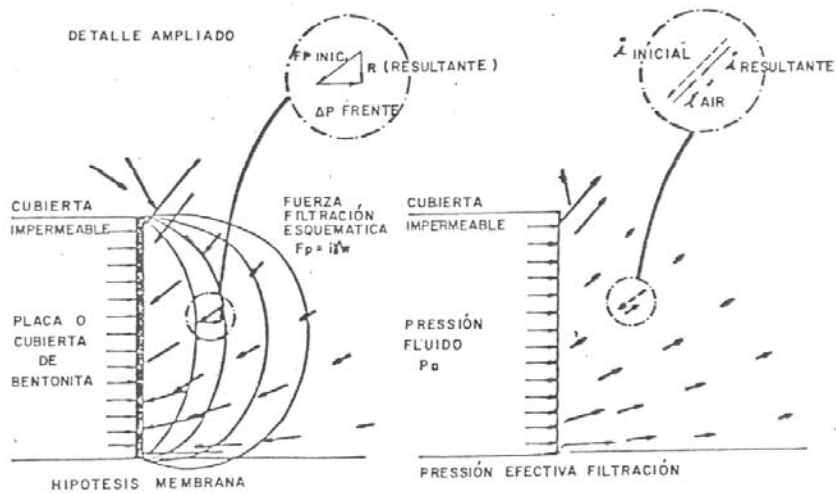
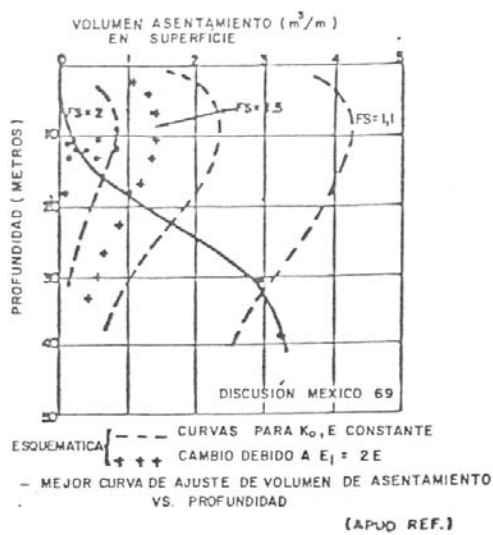


FIG.26 REEXAMINANDO PREGUNTAS SOBRE ASENTAMIENTOS DE TUNELES

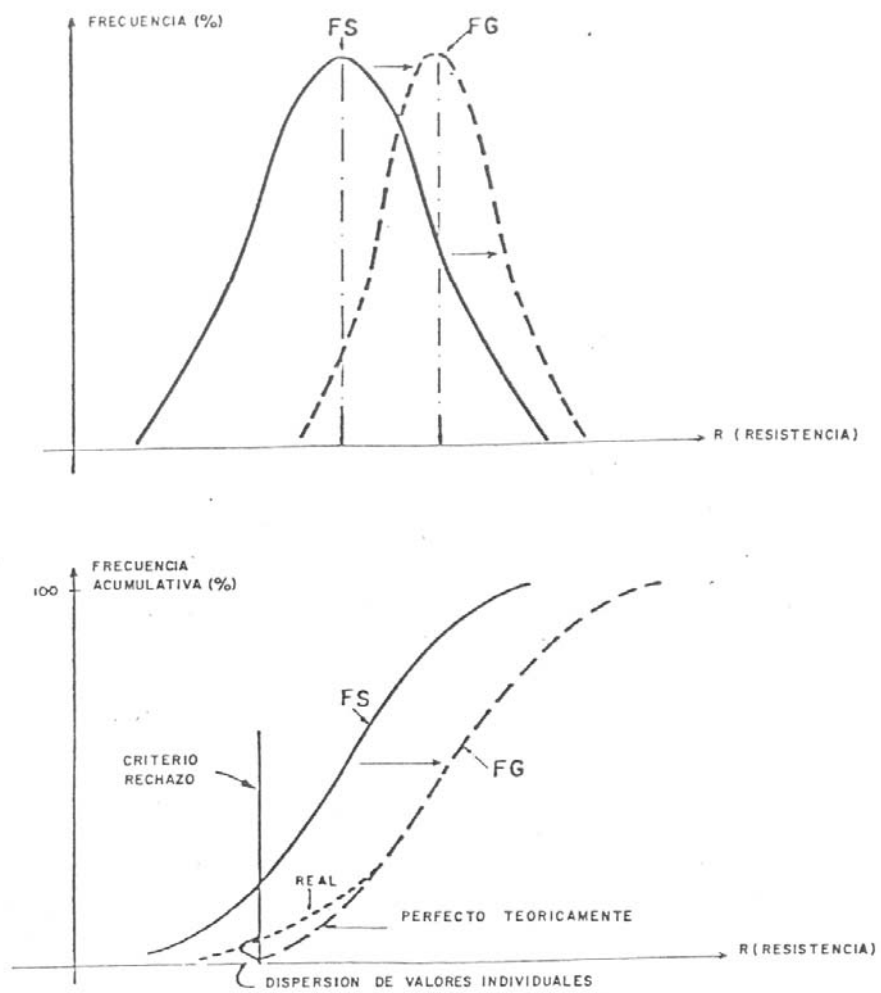


FIG.29 - DISTINCIÓN PROPUESTA ENTRE FACTOR DE SEGURIDAD (FS) Y FACTOR DE GARANTIA (FG).

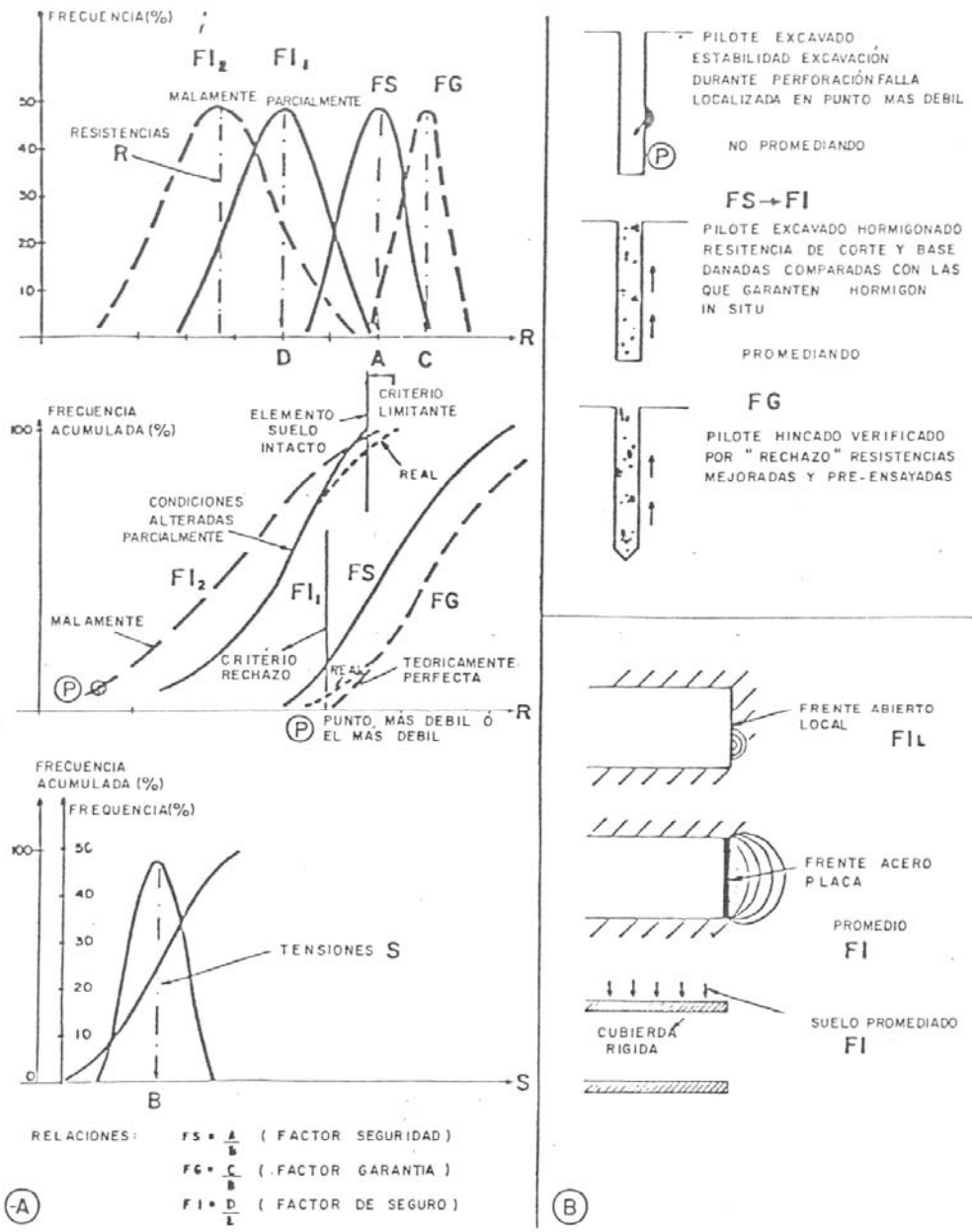


FIG. 30 DISTINCIONES SEGERIDAS EN "FACTORES DE SEGURIDAD"