
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

PRIMER ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS DE SUELOS Y ES
SEPTIEMBRE 4 A 6 DE 1991

COMPORTAMIENTO DE EXCAVACIONES Y METODOS DE ANAL

ALVARO J. GONZALEZ G.

*Ingeniero Civil U.N., M.Sc., DIC
*Socio Director- Análisis Geotécnicos Colombianos
*Profesor Asociado -Fac.de Ingeniería- U.Nacional
*Profesor Externo- Fac. de Ingeniería- U. Javeriana
*Asesor en Deslizamientos - Programa UNDRO- ONAD

RESUMEN

Dentro del proceso de construcción de cimentaciones de en especial cuando se prevén sótanos y la estructura se a edificaciones existentes, es indispensable efe evaluación lo más detallada posible de la condición excavaciones tanto en términos de estabilidad deformabilidad y permeabilidad, mientras se implanta la definitiva y luego ya en operación de la edificación.

Es usual evaluar la estabilidad en términos de esfuerzo arguyendo que se trata de un análisis a corto plazo, evaluaciones no permiten tener una certeza adecuada evolución en el tiempo de la estabilidad, deforma variación de las presiones de poros, lo cual incide y h en no pocos problemas que se han presentado durante la c de cimentaciones en sótanos.

Se discute brevemente el comportamiento general excavaciones, se analizan los inconvenientes de los a términos de esfuerzos totales y se presenta en forma ge contraste con la evaluación en términos de esfuerzos efe

El propósito de esta forma de análisis tiene como acercarse más a la realidad, tener un marco de referenci para el control de la secuencia constructiva y poder las etapas y tiempos críticos con el fin de evitar posible los molestos incidentes de fallas de agrietamientos de edificaciones vecinas y otros que son problemas y pleitos.

Sin embargo estos procesos de análisis requieren de inversión en ensayos, análisis e instrumentación d usualmente se asigna a estas labores, inversión q ampliamente compensada por los ahorros al minimizar los ya mencionados.

1.0 INTRODUCCION

En la construcción de toda edificación se requiere de movimiento de tierras, teniendo como mínimo una operación de descapote para retirar los materiales orgánicos superficiales. En suelos blandos para efectos de flotación, o por requerimientos de parqueos se acostumbra sótanos y en zonas inclinadas u onduladas se necesita usualmente nivelar el terreno. Todas estas operaciones requieren de excavaciones permanentes, las cuales pueden tener como estructura final de contención a la propia edificación. Sin embargo, con el fin de construir la cimentación se requiere de sistemas de soporte temporales de las excavaciones; los cuales, por razones de economía, usualmente se incorporan a las estructuras finales. Todo este proceso es suficientemente conocido, pero se ha descrito para resaltar la permanencia de las excavaciones y la temporalidad de algunos de los sistemas de soporte.

Aun cuando la estructura sea totalmente flotada y teóricamente la carga del material retirado por la excavación se reemplaza por la carga del edificio, el proceso de implantación de una estructura más rígida que el material extraído, con una consiguiente distribución de esfuerzos distinta a la original, afecta los inevitables materiales térreos de cimentación que son inelásticos, no lineales, heterogéneos, frágiles y sobretodo compuestos por sólidos, líquidos y gases, los cuales interactúan en el tiempo y en gran parte de los casos en forma irreversible. En estos casos el orden de los factores sí altera el producto y el principio de superposición por consiguiente no es totalmente aplicable.

2.0 COMPORTAMIENTO GENERAL DE EXCAVACIONES

Una excavación en general y por definición es un proceso de descarga en el cual un material térreo de la superficie terrestre es desalojado de su posición inicial y evacuado hacia otro lugar.

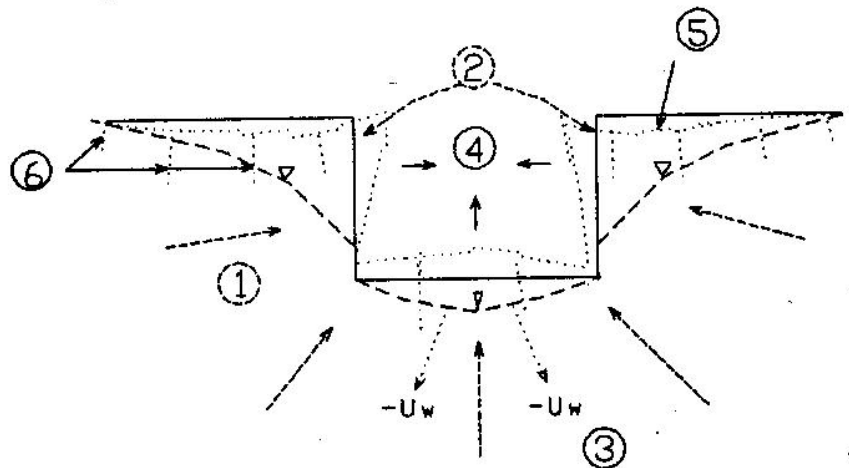
El proceso de descarga produce en el terreno dos efectos principales correlativos, aunque conceptualmente separables:

2.1.- Cambio de la Geometría del Terreno

Este primer efecto conlleva la reducción de la cota inferior de la interfase entre la atmósfera y el terreno y el consiguiente incremento de los gradientes gravitatorios pre-existentes (Figura 1), lo que conduce:

A) A un proceso de drenaje en el caso de materiales por debajo del nivel piezométrico o a reducción de la succión en materiales por encima de este nivel. En el primer caso, el aumento del gradiente hidráulico magnificado además por la reducción de presiones de poros por la descarga, la cual se comentará adelante, lleva a una depresión del nivel piezométrico, la cual puede tener un área de influencia alrededor de la excavación, la cual se incrementa con el

Figura 1 - COMPORTAMIENTO DE UNA EXCAVACION



EFFECTOS PRINCIPALES DE LA DESCARGA

A- CAMBIO DE GEOMETRIA B- CAMBIO DE ESFUERZOS

1- DRENAJE

2- TALUDES

3- REDUCCION DE U_w

4- DEFORMACIONES
CONVERGENTES

5- ASENTAMIENTOS

6- GRIETAS

C- EVENTUAL FALLA

tiempo, ocasionando asentamientos de las zonas aledañas, también crecientes con el lapso de permanencia de la excavación abierta.

B) A la creación de taludes (usualmente verticales) en el caso de terrenos a nivel o a incremento de ángulos y/o altura de los taludes originales de terrenos inclinados.

2.2.- Redistribución de Esfuerzos y Deformaciones

Así hipotéticamente no hubiese cambio de geometría la descarga produce una redistribución de esfuerzos y deformaciones en un volumen importante aledaño a la excavación, los cuales pueden resumirse así:

A) Reducción de los esfuerzos totales con la correspondiente reducción de presión de poros $\Delta\sigma_{UD}$, de acuerdo a la conocida expresión de Skempton (1954) (Figura 2):

$$\Delta\sigma_{UD} = BD*(\Delta\sigma_3 + AD*\Delta\sigma_1(r_1-r_3)) < 0 \quad (1)$$

en la cual BD (<B) y AD ($\approx 1/3$ en ausencia de mejores datos) son los parámetros de presión de poros en descarga.

La reducción de esfuerzos totales lleva a un proceso diferido de expansión del terreno, en todo similar al proceso de consolidación pero en sentido inverso y controlado en el tiempo no por el parámetro C_v de consolidación sino por el de expansión C_e :

$$C_e = k / (G_w * M_e) > C_v \quad (2)$$

Dado que, como se indica, C_e es mayor que C_v , el proceso de expansión ocurre más rápidamente que el de consolidación y es de anotar que la expansión no ocurre solamente en el fondo de la excavación sino en toda la superficie excavada.

B) La variación de esfuerzos por descarga y el cambio de geometría inducen redistribuciones de esfuerzos y deformaciones, de los cuales los principales pueden ser (Figura 1):

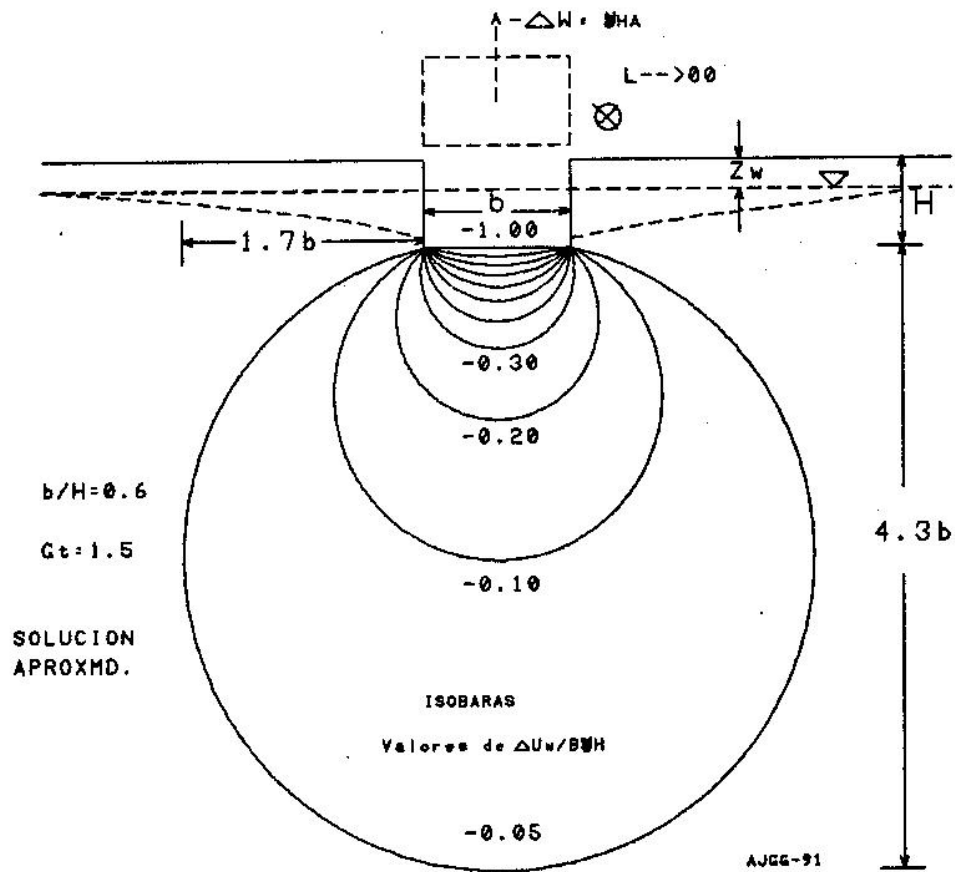
- Deformación vertical de la superficie inmediatamente por encima de la excavación y deformación de las paredes hacia el centro de la excavación.

- Aparición de esfuerzos de tracción y sus correspondientes grietas en la superficie por encima de la excavación, en el piso y algo menos en las paredes.

- Incremento de esfuerzos de corte en el pie de la excavación.

Si los esfuerzos inducidos exceden la resistencia del material de excavación se producirán fallas y si las deformaciones del material terreo, usualmente irreversibles, se dejan pasar de límites tolerables se presentarán daños, todo ello inconveniente.

Figura 2 - EFECTO DE LA EXCAVACION EN LA PRESION DE POROS



2.3.- Comentarios

Como puede apreciarse la fenomenología del proceso de excavación y los efectos producidos son numerosos y complejos y aunque, dentro del proceso constructivo general, la excavación sólo ocupa una pequeña proporción del tiempo, ya que no del costo, debe recibir y generalmente recibe una atención por lo menos similar a la que se da a otros procesos y en algunos casos un mayor cuidado debido a que, en caso de desatención, es causa de numerosas controversias, de retardos en los planes de construcción y fuente potencial de daños en las zonas circunvecinas.

En términos de análisis, el empleo de esfuerzos totales precluye la adecuada predicción de las variaciones de presiones de poros y su influencia general en todo el proceso, en especial en relación con su evolución en el tiempo, por lo que es conveniente evaluar el comportamiento en términos de esfuerzos efectivos.

3.0.- ANALISIS DE ESTABILIDAD EN TERMINOS DE ESFUERZOS EFECTIVOS

3.1.- Generalidades

El nacimiento de la Mecánica de Suelos está marcado con la aparición del Concepto de Esfuerzos Efectivos, promulgado implícitamente por Terzaghi dentro de su Teoría de la Consolidación en 1926, y luego desarrollado por numerosos estudiosos del tema.

Sin embargo, ya para entrar al siglo XXI, aún se emplea para todo tipo de problemas y sin el beneficio de la duda el método de los esfuerzos totales y la resistencia $C_u, \phi=0$ (usualmente denominada no drenada), en especial después del apoyo recibido por este método por parte de uno de los más profundos investigadores del principio de esfuerzos efectivos (Skempton, 1948), con el fin de facilitar los cálculos de estabilidad de la época (en ausencia de toda la abundancia de ayudas computacionales de hoy día), en especial para presas en materiales arcillosos saturados, donde este método es relativamente aplicable por ser las arcillas materiales impermeables y las presas procesos de carga.

3.1.- El Ensayo de Compresión Simple

Skempton demostró que para los casos mencionados la resistencia no drenada (C_u para $\phi_u=0$) en términos de esfuerzos totales estaba muy cerca del valor de resistencia no drenada en términos de esfuerzos efectivos (T_f) material (Figuras 3A y 3B) y que este valor de C_u podía obtenerse muy fácilmente del ensayo de compresión simple, pero con las siguientes condiciones:

a) Material completamente saturado: en caso de que no haya saturación la resistencia C_u resulta en una pseudoenvolvente de Mohr-Coulomb.

b) Material intacto (sin fisuración principalmente) para evitar zonas de debilidad y problemas de drenaje.

c) Procesos de carga, aun cuando Bishop y Bjerrum (1960) lo aconsejan para procesos de descarga pero sin mencionar ejemplos. Sin embargo, el propio Skempton y sus colaboradores tuvieron y han tenido graves dificultades para aplicar este método en las arcillas preconsolidadas del Reino Unido que por su naturaleza aún continúan en un proceso de descarga a largo plazo.

3.2.- Variabilidad de C_u

Skempton y Bishop (1954) dedujeron la formulación en materiales saturados ($B=1$) para evaluar la relación de C_u a compresión con los parámetros de esfuerzos efectivos (c', ϕ'), los de presión de poros a la falla (A_f, B), el coeficiente de presión de tierras en reposo K_o y la presión isotrópica de consolidación inmediatamente antes del ensayo p' , aplicable al ensayo de laboratorio, así:

$$C_u = \frac{c' \cos \phi' + p' \sin \phi' [K_o + A_f(1-K_o)]}{1 + (2A_f - 1) \sin \phi'} \quad (3)$$

Para ciertos casos especiales esta fórmula se simplifica, p ejemplo:

a) Para $A_f=1$ (suelos normalmente consolidados-contráctiles)

$$C_u = (c' + p' \tan \phi') \lambda K_a \quad (4a)$$

y si $c' = 0$

$$C_u = p' \tan \phi' \lambda K_a \Rightarrow C_u/p' = f(\phi') \quad (4b)$$

y teóricamente en ambos casos no influye K_o .

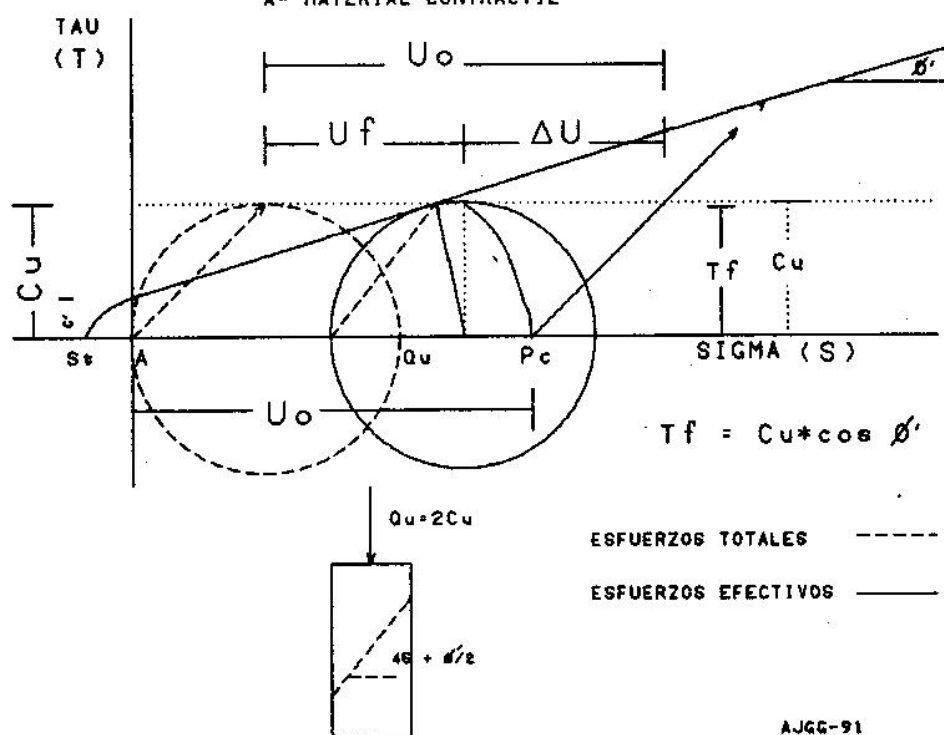
b) Para $A_f=0$ (suelos muy preconsolidados- dilatantes)

$$C_u = (c' + K_o p' \tan \phi') \lambda K_p \quad (5a)$$

para estos materiales es de más difícil aplicación pues normalmente están fisurados.

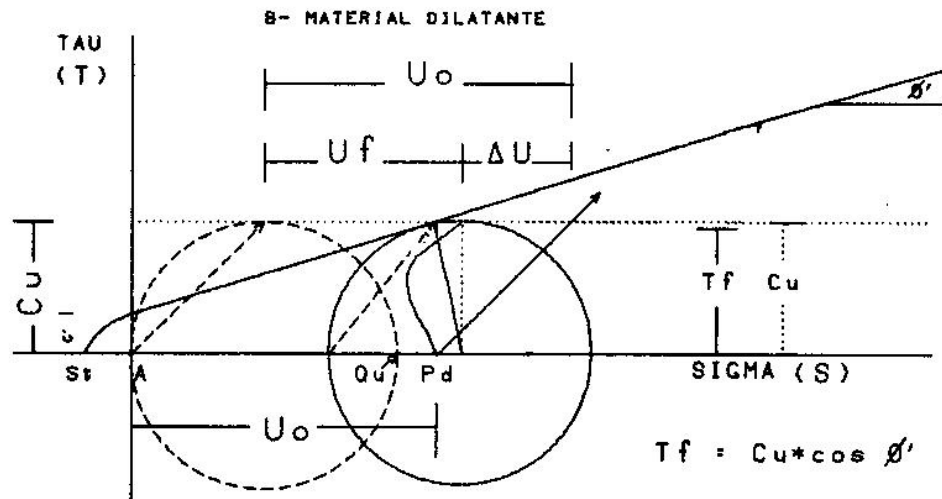
Dada la gran cantidad de factores que intervienen en C_u , es posible encontrar, para condiciones muy variadas, el mismo valor de este parámetro. En la figura 3A se presenta un caso hipotético de un ensayo de compresión simple en un suelo contráctil (c) mientras que en la figura 3B se hace lo propio con un suelo dilatante (d), con la misma resistencia C_u , para lo cual necesariamente $A_{fd} < A_f$, $p_{d'} < p_{c'}$ y $U_{od} < U_{oc}$ y para la misma presión de poros a la falla lógicamente resulta $\Delta U_d < \Delta U_c$.

A- MATERIAL CONTRACTIL



AJGG-91

Figura 3 - ENSAYO DE COMPRESION SIMPLE



ESFUERZOS TOTALES -----

ESFUERZOS EFECTIVOS -----

$$C_u = \frac{c' \cos \phi' + p' \sin \phi' (K_o + A_f (1 - K_o))}{1 + (2A_f - 1) \sin \phi'}$$

AJGG-91

Se aprecia que en ambos suelos el valor de la resistencia C_u está muy cercana al valor de resistencia al corte de falla en compresión T_f , existiendo en los dos casos la relación:

$$T_f = C_u \cos \theta' \quad (6)$$

lo que indica que en carga siempre

$$C_u > *T_f \quad (6a)$$

siendo la desproporción mayor a medida que aumenta θ' .

3.3.- La Resistencia en Descarga Lateral

Con el fin de estimar la validez del método de esfuerzos totales para el caso que nos ocupa, en la figura 4 se han colocado los dos suelos anteriores a trabajar en esta trayectoria, teorizando un ensayo hipotético C_u con descarga lateral.

De esta figura 4 se aprecia que:

a) Al efectuarse la descarga, en razón de la reducción de presiones de poros, los factores de seguridad aumentan, pero los valores de $T_{\max}$ en ambos casos son inferiores a C_u , para una trayectoria drenada hasta la envolvente de falla.

b) Si posteriormente se permite que el material se expanda libremente y hay agua disponible, se presentará un incremento de presiones de poros que llevará a los materiales a la falla en un tiempo controlado por el coeficiente de expansividad del suelo C_e .

c) Los valores de resistencia a la falla T_f , con esfuerzos totales constantes para cada uno, son en ambos suelos inferiores a C_u y con el siguiente orden:

$$T_{fd} < T_{fc} < C_u \quad (7)$$

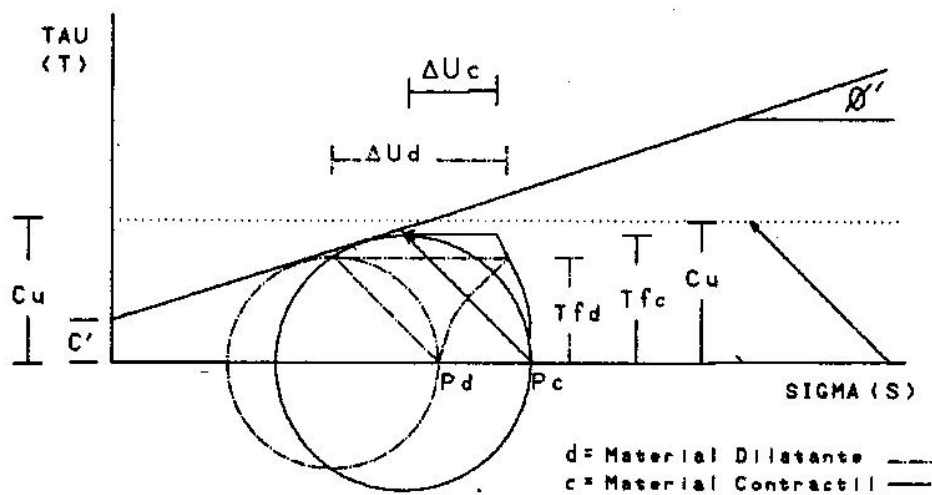
d) Sin embargo las presiones de poros requeridas para la falla son menores para el material contráctil que para el material dilatante. y en compensación, como usualmente $C_{ec} < C_{ed}$, el tiempo a la falla será teóricamente mayor en el material contráctil que en el dilatante, para este caso hipotético de igual resistencia C_u .

3.4.- Comentarios

Como se desprende de lo expuesto anteriormente, la resistencia C_u sobreestima en todos los casos la resistencia disponible y este hecho se acentúa bastante más en los análisis de descarga lateral.

Además de las evaluaciones de estabilidad, ya de por sí no totalmente confiables en el caso de descarga, el uso sistemático de el valor de resistencia C_u para el resto de evaluaciones lo hace tal vez más inseguro y excede la justificación y propósito iniciales del método.

Figura 4 - TRAYECTORIAS DE ESFUERZOS EN DESCARGA LATERAL



PARA c' , ϕ' Y Cu CONSTANTES SE DEDUCE
EN MATERIALES DILATANTES Y CONTRACTILES

- * ΔU_w REQUERIDO PARA FALLA ES MENOR EN CONTRACTILES
- * $T_{fd} < T_{fc} < Cu$

NOTA: LA PRESION DE POROS A LA FALLA PROVIENE DE LA
RECUPERACION DE LOS NIVELES PIEZOMETRICOS

4.0.- CONCLUSIONES GENERALES

Como puede deducirse de lo anteriormente expuesto, los análisis y evaluaciones de la estabilidad de las excavaciones no son confiables en términos de la resistencia Cu.

Para el resto de evaluaciones (deformabilidad, permeabilidad) esta metodología es aún más cuestionable y no permite tener un cuadro integrado del comportamiento de las excavaciones y de sus obras de contención para poder prevenir problemas, reducir costos y minimizar la posibilidad de fallas.

Para validar cualquier método, sin embargo, es indispensable la retroalimentación técnica que impulsa el progreso y esto no puede llevarse a cabo sino con observación cuidadosa e instrumentación adecuada de las obras (la cual es muy incipiente en nuestro medio), mente abierta y el nunca abandonable o reemplazable buen juicio ingenieril.

Bogotá, Septiembre de 1991