

**X JORNADAS GEOTECNICAS DE LA INGENIERIA COLOMBIANA**

**ESTIMATIVOS DE PARAMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT**

**ALVARO J. GONZALEZ G.**

-Ingeniero Civil U.N., M.Sc., DIC

-Socio Director- Análisis Geotécnicos Colombianos AGC Ltda.

-Profesor Asociado-Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional - Bogotá

-Ingeniero Asesor en Geotecnia

**RESUMEN**

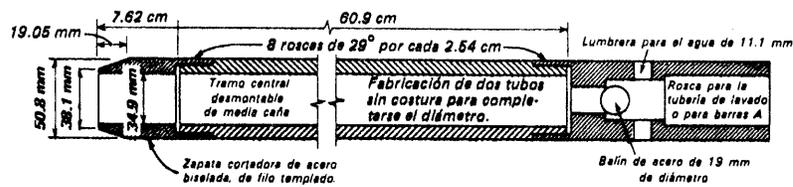
Se presenta un método aproximado de evaluación de los parámetros efectivos de resistencia  $c'$  y  $\phi'$ , mediante el empleo de los datos de SPT (N en golpes/pie). Aunque el método provee valores estimados, se obtienen resultados razonables útiles iniciales, especialmente para materiales granulares o intermedios, siendo menos aproximados para materiales cohesivos.

**1.0 EL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR**

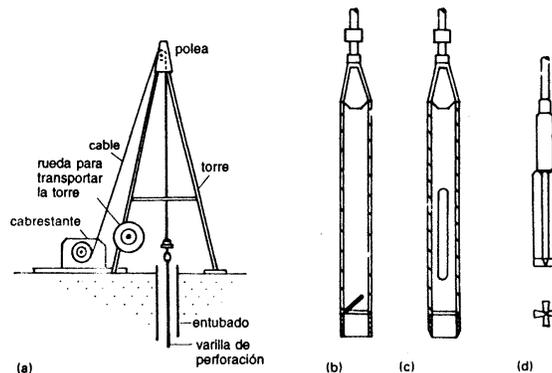
**1.1 Descripción del Ensayo**

El método de penetración estándar SPT (**S**tandard **P**enetration **T**est) es tal vez el más conocido y usado en la exploración de suelos, tal vez por su sencillez de ejecución y sobre él existe una literatura muy abundante.

El método ha sido estandarizado desde 1958, con varias revisiones (ASTM D-1586) y consiste (p.ej. Bowles,1988) en hincar un tomamuestras partido de 18" ( $\approx 45\text{cm}$ ) de largo (Figura 1a) colocado al extremo de una varilla AW, por medio de un peso (martillo) de 140lb ( $\approx 63.5\text{kg}$ ) que se deja caer "libremente" desde una altura de 30" ( $\approx 76\text{cm}$ ) (Figura 1b), anotando los golpes necesarios para penetrar cada 6" ( $\approx 15\text{cm}$ ).



**FIGURA 1a) - Cuchara partida**



**FIGURA 1b) Equipo de Perforación por Percusión**

El valor normalizado de penetración N es para 12" (1 pie ≈ 30cm), se expresa en golpes/pie y es la suma de los dos últimos valores registrados. El ensayo se dice que muestra "rechazo" si: (a) N es mayor de 50 golpes/15cm, (b) N es igual a 100 golpes/pie o (c) No hay avance luego de 10 golpes.

Aunque se denomina "estándar", el ensayo tiene muchas variantes y fuentes de diferencia, en especial a la energía que llega al tomamuestras, entre las cuales sobresalen (Bowles, 1988):

- 1) Equipos producidos por diferentes fabricantes
- 2) Diferentes configuraciones del martillo de hincia, de las cuales tres son las más comunes (Figura 2): (a) el antiguo de pesa con varilla de guía interna, (b) el martillo anular ("donut") y (c) el de seguridad
- 3) La forma de control de la altura de caída: (a) si es manual, cómo se controle la caída y (b) si es con la manila en la polea del equipo depende de: el diámetro y condición de la manila, el diámetro y condición de la polea, del número de vueltas de la manila en la polea y de la altura real de caída de la pesa.
- 4) Si hay o no revestimiento interno en el tomamuestras, el cual normalmente no se usa.
- 5) La cercanía del revestimiento externo al sitio de ensayo, el cual debe ser estar alejado.
- 6) La longitud de la varilla desde el sitio de golpe y el tomamuestras.
- 7) El diámetro de la perforación
- 8) La presión de confinamiento efectiva al tomamuestras, la cual depende del esfuerzo vertical efectivo en el sitio del ensayo.

Para casi todas estas variantes hay factores de corrección a la energía teórica de referencia  $E_r$  y el valor de N de campo debe corregirse de la siguiente forma (Bowles, 1988):

$$N_{crr} = N \times C_n \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 \quad (1)$$

En la cual

- $N_{crr}$  = valor de N corregido
- $N$  = valor de N de campo
- $C_n$  = factor de corrección por confinamiento efectivo
- $\eta_1$  = factor por energía del martillo ( $0.45 \leq \eta_1 \leq 1$ )
- $\eta_2$  = factor por longitud de la varilla ( $0.75 \leq \eta_2 \leq 1$ )
- $\eta_3$  = factor por revestimiento interno de tomamuestras ( $0.8 \leq \eta_3 \leq 1$ )
- $\eta_4$  = factor por diámetro de la perforación ( $> 1$  para  $D > 5''$ ,  $= 1.15$  para  $D=8''$ )

Para efectos de este artículo se considerará que  $\eta_2 = \eta_3 = \eta_4 = 1$  y solamente se tendrán en cuenta los factores  $\eta_1$  y  $C_n$ .

### 1.2 Corrección por Energía (h1)

Se considera que el valor de N es inversamente proporcional a la energía efectiva aplicada al martillo y entonces, para obtener un valor de  $N_{e1}$  a una energía dada "e1", sabiendo su valor  $N_{e2}$  a otra energía "e2" se aplica sencillamente la relación:

$$N_{e1} = N_{e2} \times (e_2/e_1) \quad (2)$$

### 1.3 Corrección por Confinamiento (Cn)

Este factor ha sido identificado desde hace tiempo (Gibbs y Holtz, 1957) y se hace por medio del factor  $C_n$  de forma tal que:

$$N_{corr} = N_1 = C_n \times N \quad (3)$$

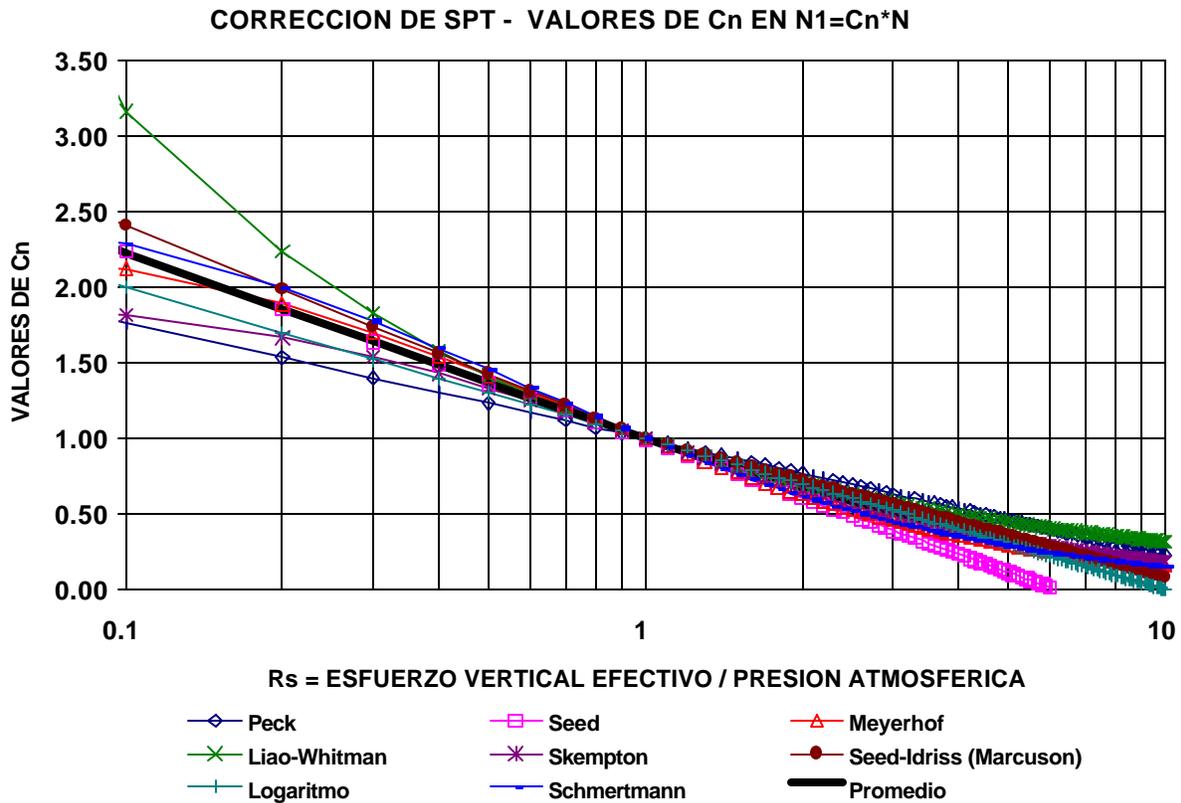
y se ha estandarizado a un esfuerzo vertical de referencia  $\sigma_{vr}' = 1 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ atmósfera} = p_a$ , como función del parámetro  $R_s$ , definido por:

$$R_s = \sigma_v' / p_a \quad (4)$$

Existen numerosas propuestas, entre las que se destacan las siguientes (Figura 2) :

Peck	$C_n = \log(20/R_s) / \log(20)$	(5a)
Seed	$C_n = 1 - 1.25 \log(R_s)$	(5b)
Meyerhof-Ishihara	$C_n = 1.7 / (0.7 + R_s)$	(5c)
Liao-Whitman	$C_n = (1/R_s)^{0.5}$	(5d)
Skempton	$C_n = 2 / (1 + R_s)$	(5e)
Seed-Idriss	$C_n = 1 - K \cdot \log R_s$	(5f)
(Marcuson)	( $K=1.41$ para $R_s < 1$ ; $K=0.92$ para $R_s \geq 1$ )	
González (Logaritmo)	$C_n = \log(10/R_s)$	(5g)
Schmertmann	$C_n = 32.5 / (10.2 + 20.3 R_s)$	(5h)

En general se recomienda que  $C_n \leq 2.0$ , por lo cual la formulación de Skempton es la única que cumple exactamente esta recomendación para  $R_s = 0$ .

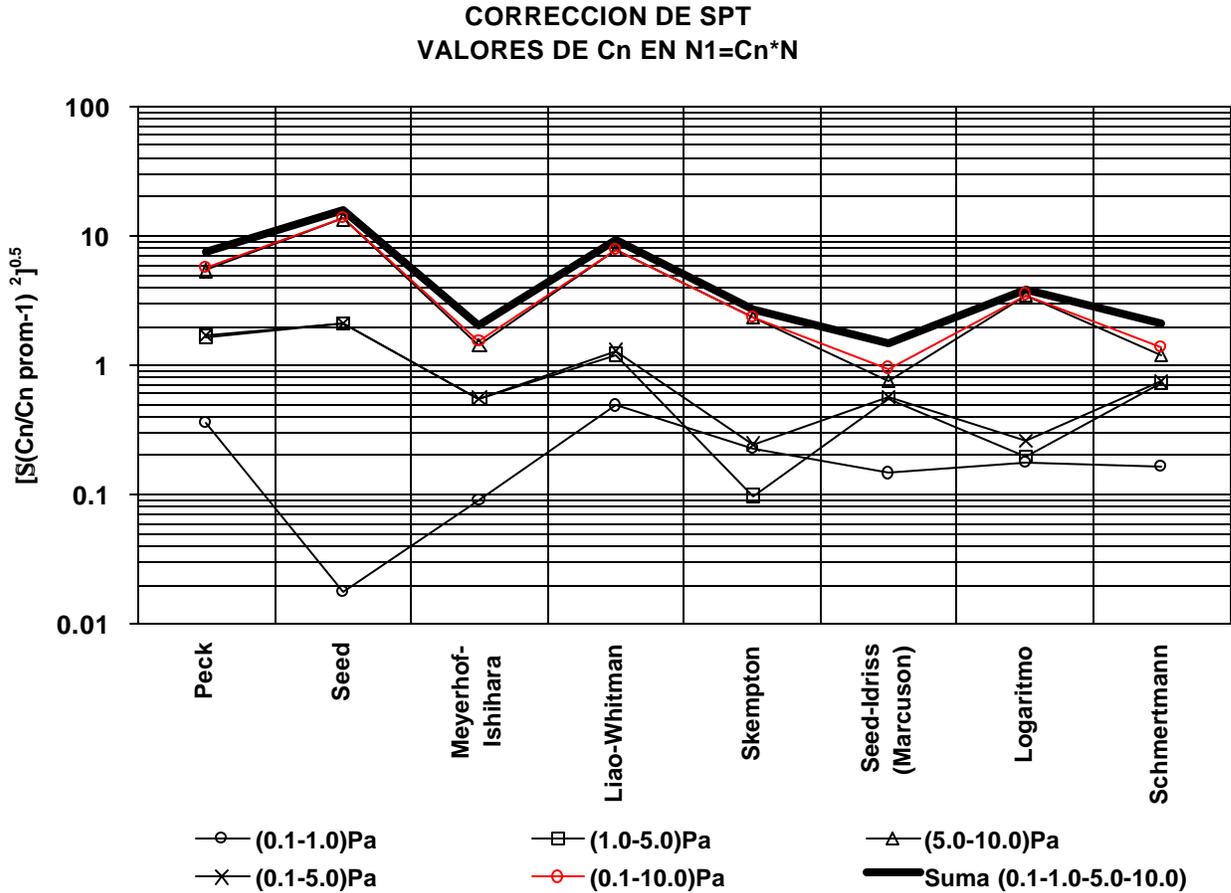


**Figura 2 - Valores de  $C_n$**

Observando la variación de las diferentes formulaciones de  $C_n$  con  $R_s$  en esta Figura 2 se encuentra que las variaciones respecto del promedio son grandes (Figura 3), siendo por exceso la mayor la de Liao-Whitman para  $R_s < 1$  y para  $5 < R_s < 10$  y la de Peck para  $1 < R_s < 5$ , mientras

que por defecto las que más se apartan son las de Peck para  $R_s < 1$  y la de Seed para  $R_s > 1$ . Además para algunas de ellas  $C_n$  puede llegar a  $C_n < 0$ , en especial para las siguientes:

Formulación	Valor de $R_s$ para $C_n=0$
Peck	$R_s > 20$
Seed	$R_s > 6.31$
Seed-Idriss	$R_s > 12.22$
González (logartimo)	$R_s > 10$



**Figura 3 - Desviaciones del Promedio para Diferentes Formulaciones de  $C_n$**

Observando la raíz del cuadrado de las desviaciones para todos los intervalos (Figura 3) se comprueba lo anterior y además se puede adicionar que las formulaciones que menos se apartan del promedio son, en su orden, las siguientes:

- a) Seed-Idriss (Marcuson)
- b) Meyerhof - Ishihara
- c) Schmertmann
- d) Skempton

Usualmente, combinando tanto las correcciones de energía como de confinamiento el valor de  $N$  se suele expresar como  $N1e$ . En forma inicial se considera que para martillo anular  $e = 45\%$  y para martillo de seguridad  $e = 70\%-100\%$ . En Estados Unidos es usual considerar que  $e = 60\%$  es un valor representativo mientras que para Japón el valor representativo puede ser  $e = 72\%$ . Para

Colombia y, salvo mediciones al respecto (p.ej. Villafañe et al, 1997), se debe tomar, conservativamente,  $e = 45\%$ .

## 2.0 CORRELACIONES ENTRE N Y RESISTENCIA EFECTIVA DE LOS SUELOS

Existen numerosas correlaciones entre  $N$  y  $\phi'$ , pero, antes de mencionar algunas de ellas, es conveniente discutir cual valor de  $\phi'$  es el que se está obteniendo.

Dado que la mayor parte de estas correlaciones fueron obtenidas con materiales granulares, para los cuales usualmente  $c' = 0$ , lo que realmente se obtiene es la relacion entre esfuerzos cortantes y esfuerzos normales efectivos, es decir (Figura 4):

$$\phi'_{SPT} = \phi'_{eq} = \arctan(\tau / \sigma') \quad (6)$$

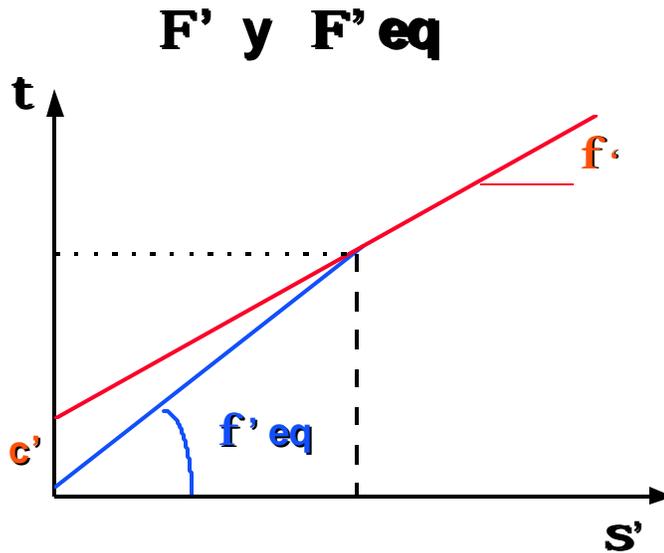


Figura 4 - Ángulo de fricción real ( $f'$ ) y equivalente ( $f'_{eq}$ )

Con lo anterior, algunas de las relaciones entre  $\phi'_{eq}$  y  $N_1$ , son las siguientes:

Peck  $\phi'_{eq} = 28.5 + 0.25 \times N_{145}$  (7a)

Peck, Hanson y Thornburn  $\phi'_{eq} = 26.25 \times (2 - \exp(-N_{145} / 62))$  (7b)

Kishida  $\phi'_{eq} = 15 + (20 \times N_{172})^{0.5}$  (7c)

Schmertmann  $\phi'_{eq} = \arctan[(N_{160} / 32.5)^{0.34}]$  (7d)

JNR  $\phi_{eq} = 27 + 0.30 \times N_{172}$  (7e)

JRB  $\phi_{eq} = 15 + (15 \times N_{172})^{0.5}$  (7f)

Estas relaciones, para su uso en Colombia, se deben transformar a una energía  $e = 45\%$  con el siguiente resultado:

Peck  $\phi'_{eq} = 28.5 + 0.25 \times N_{145}$  (7a)

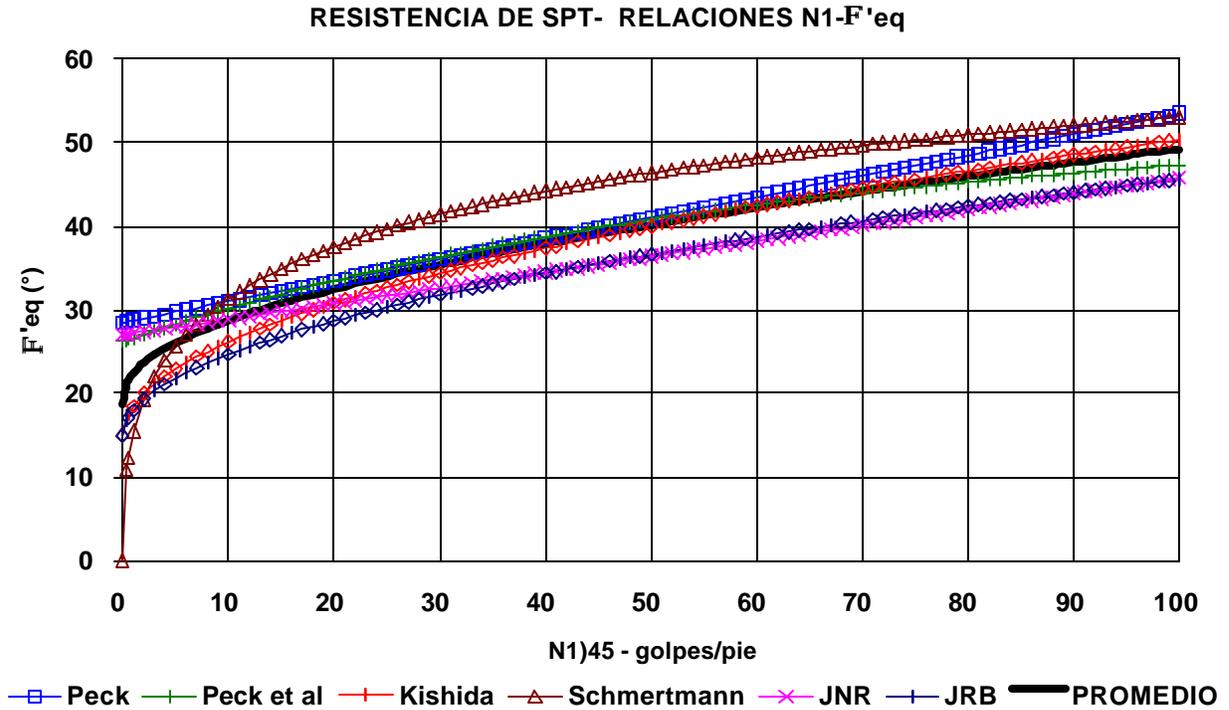
Peck, Hanson y Thornburn  $\phi'_{eq} = 26.25 \times (2 - \exp(-N_{145} / 62))$  (7b)

Kishida  $\phi'_{eq} = 15 + (12.5 \times N_{145})^{0.5}$  (8c)

Schmertmann  $\phi'_{eq} = \arctan[(N_{145} / 43.3)^{0.34}]$  (8d)

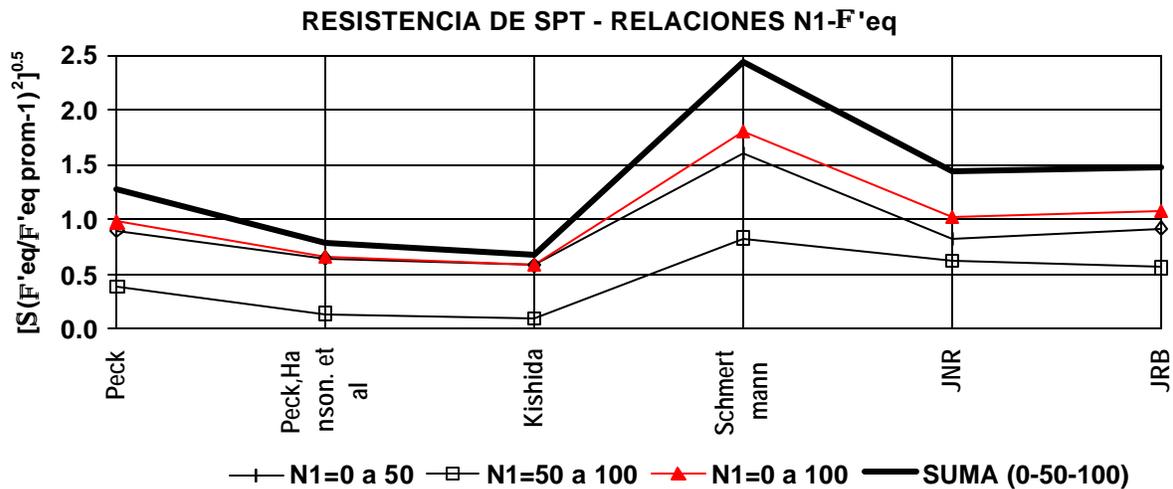
Japan National Railway (JNR)  $\phi_{eq'} = 27 + 0.1875 \times N_{145}$  (8e)

Japan Road Bureau (JRB)  $\phi_{eq'} = 15 + (9.375 \times N_{145})^{0.5}$  (8f)



**Figura 5 - Variacion de f'eq con N1**

La variación de  $\phi_{eq'}$  con  $N_{145}$  se presenta en la Figura 5, de la cual puede deducirse que la relación que más se aparta del promedio por exceso es la de Schmertmann, lo cual también se comprueba en la Figura 6, y por defecto la de JRB.



**Figura 6 - Desviaciones del Promedio para Diferentes Formulaciones de F'eq**



- 3) En materiales granulares pueden resultar valores de  $c'$  irreales que son aproximación a una posible envolvente curva (por ejemplo del tipo  $\tau = A \sigma'^b$ )
- 4) El resultado depende de los valores de  $\sigma'$ , por lo tanto una sobreestimación de los valores de  $\sigma'$  dará valores de  $c'$  y  $\tan\phi'$  inferiores y una subestimación de  $\sigma'$ , valores superiores. Esto involucra los valores usados de pesos unitarios, profundidades y presiones de poros.
- 5) Se ha asumido conservativamente que en Colombia la energía del SPT normalmente es 45%, pero si se hacen calibraciones del equipo usado (p.ej. Villafañe et al, 1997), se debe usar la energía calibrada.

### 3.3 Ejemplo

Se presenta un ejemplo de los valores obtenidos de 8 perforaciones realizadas en un tramo de la vía Anserma-Riosucio, en las cuales se presentaron 14 materiales, de los cuales se dedujeron parámetros efectivos aproximados para 11 de ellos con el siguiente resultado (Tabla 1):

**TABLA 1**  
**CARRETERA ANSERMA**  
**Ensayo de Penetración Estandar (SPT)**  
**Parámetros de Resistencia al Corte Deducidos**

SUELO		$\phi'$ prm (°)	$c'$ prm (t/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ mín (°)
1	Relleno heterogéneo	14.144	1.9236	26.373
2	Limo arcilloso amarillento	29.485	0.2172	34.454
3	Arena limosa amarillenta	29.234	0.1948	26.724
4	Arena limosa gris verdosa	38.866	0.0000	34.700
5	Limo arenoso carmelito	39.850	0.0000	34.551
6	Limo arenoso habano	28.066	0.1718	22.766
7	Limo arcilloso habano	28.634	0.9344	31.136
8	Arena fina algo limosa	42.014	0.0000	31.832
9	Arena con gravas	38.184	0.0000	34.369
10	Arcilla limosa habana	24.940	0.4592	28.328
14	Arena compacta habana	50.327	0.0000	48.943
Pr	Promedio suelos	34.317	0.3251	33.320

$\phi'$  prm: Angulo de fricción efectivo promedio.

$c'$  prm: Intercepto de cohesión efectivo promedio.

$\phi'$  mín: Angulo de fricción efectivo mínimo.

$c'$  mín: Intercepto de cohesión efectivo mínimo = 0.0

Como puede apreciarse, la tabla de resultados presenta valores relativamente lógicos para la descripción de los materiales y en la Figura 7 se aprecia que la relación entre  $c'$  y  $\tan\phi'$  es inversa y aproximadamente lineal. En las Figuras 8a a 8d se presentan los diagramas  $\tau$  vs  $\sigma'$  para 4 de los 11 materiales estudiados, en los cuales pueden apreciarse los datos y dispersiones típicas.

**CARRETERA ANSERMA - RESISTENCIA EFECTIVA DE SPT**

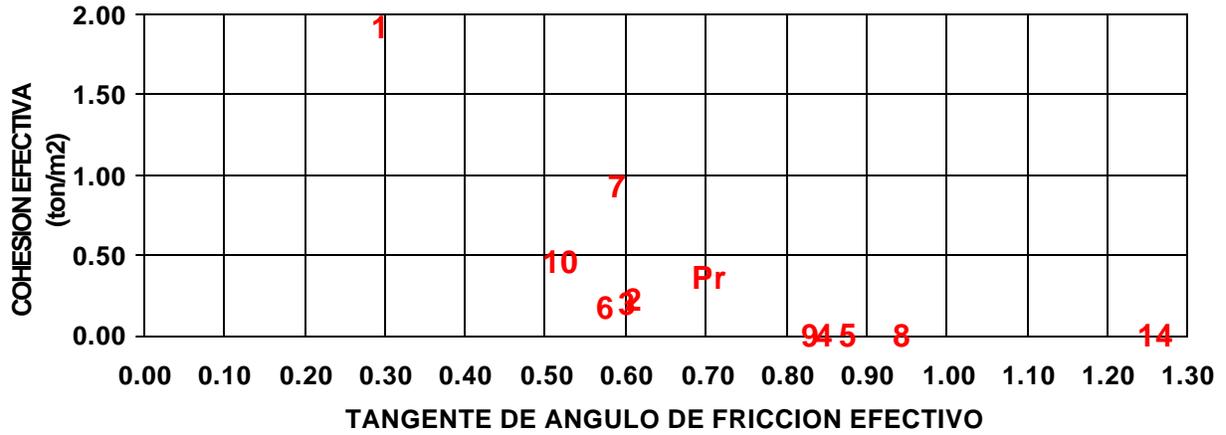


Figura 7 - Relación Típica  $c' - \tan f'$

**CARRETERA ANSERMA - SPT - RELLENO (1)**

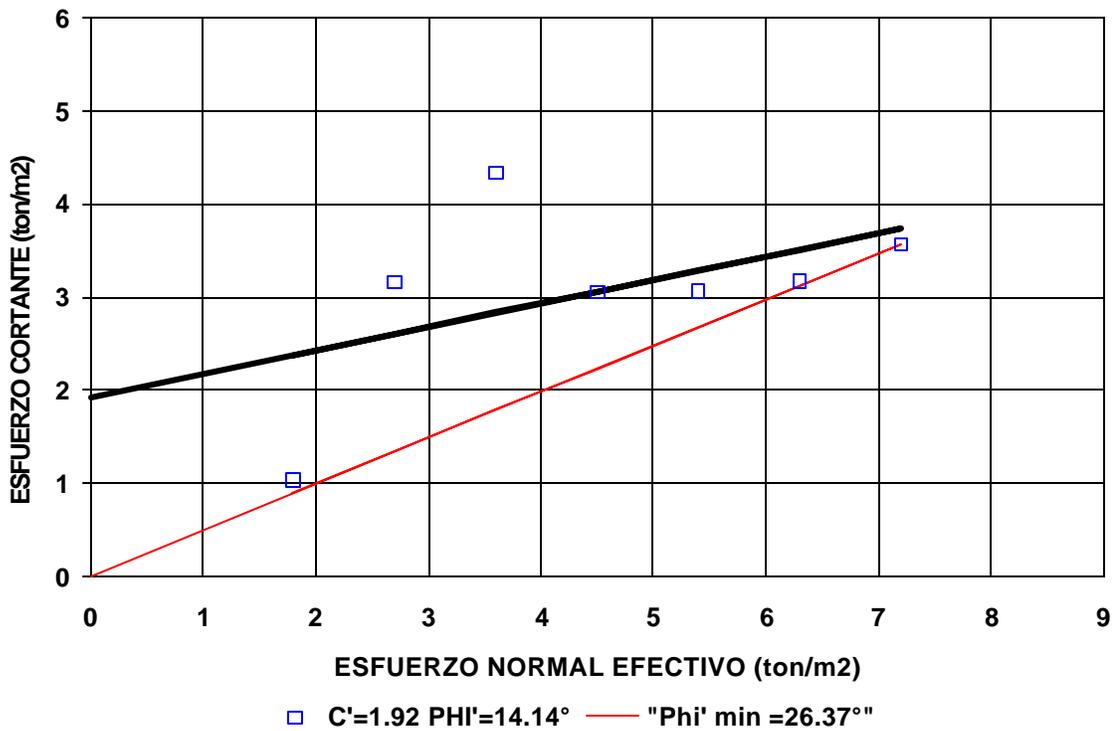
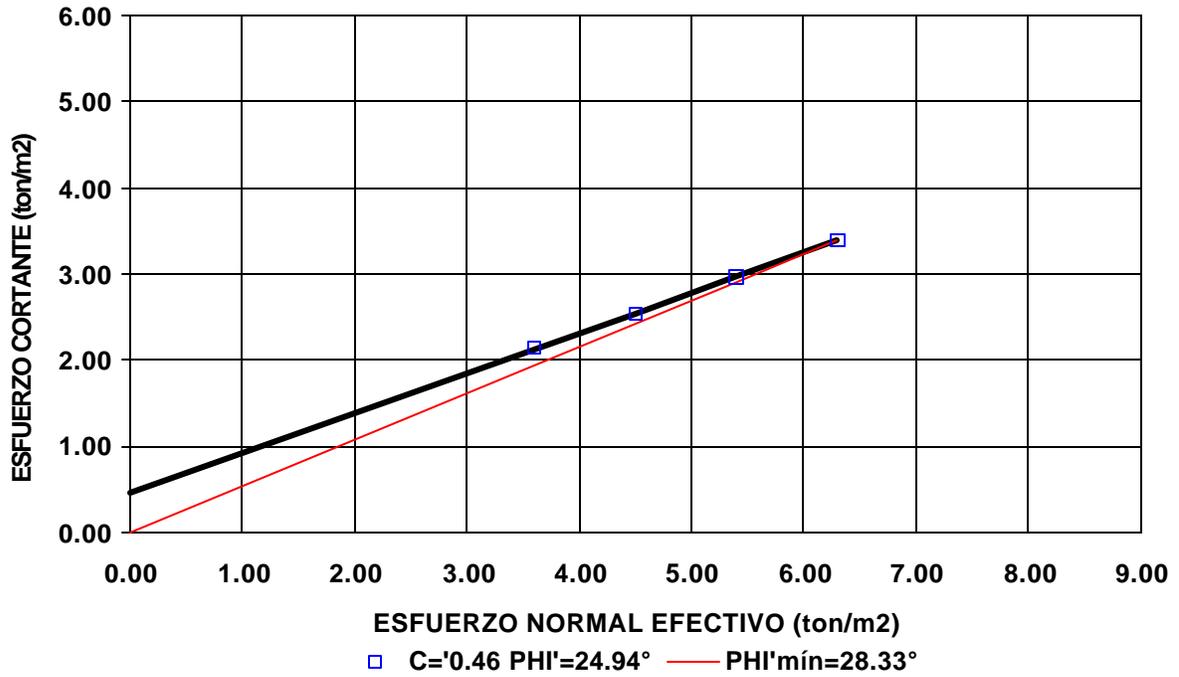


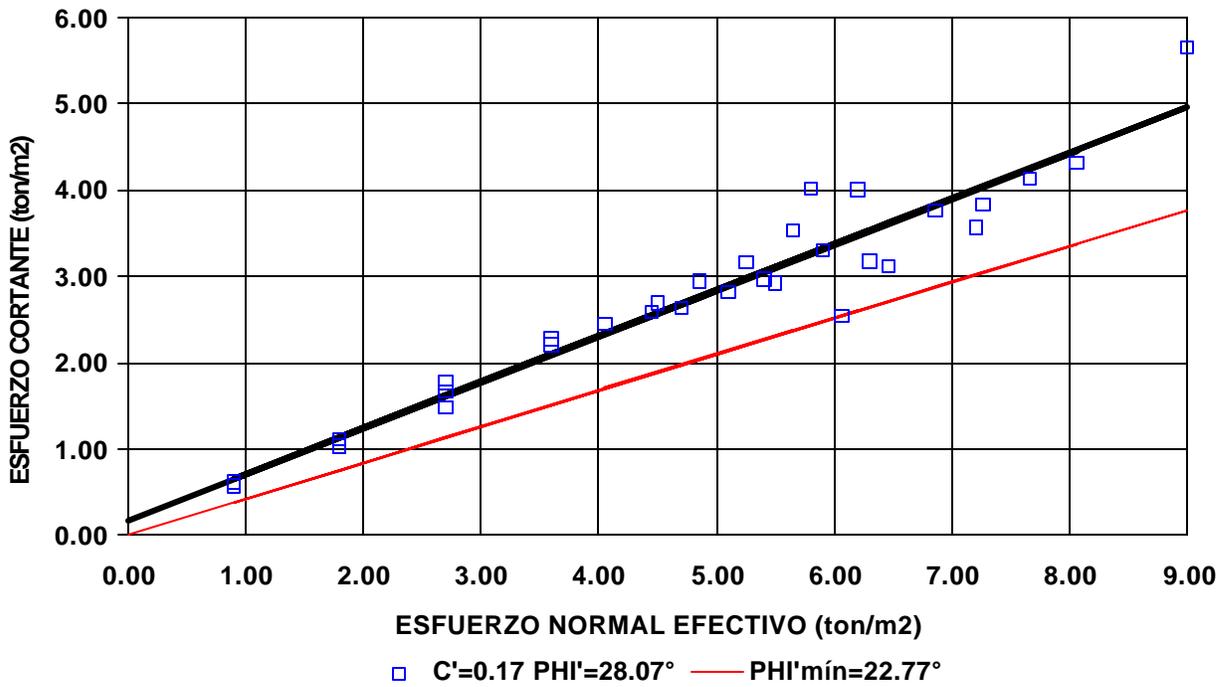
Figura 8a - Suelo 1 - Relleno

**CARRETERA ANSERMA - SPT - ARCILLA LIMOSA (10)**



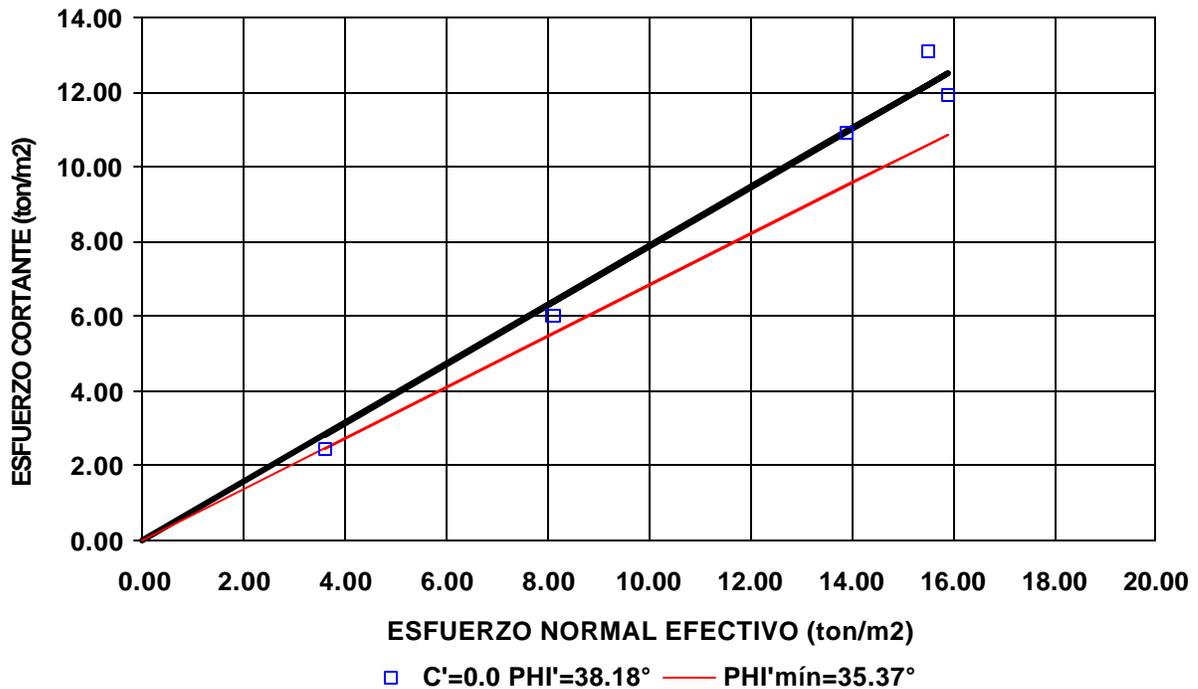
**Figura 8b - Suelo 10 - Arcilla limosa**

**CARRETERA ANSERMA -SPT - LIMO ARENOSO HABANO (6)**



**Figura 8c - Suelo 6 - Limo arenoso habano**

**CARRETERA ANSERMA -SPT - ARENA CON GRAVAS (9)**



**Figura 8d - Suelo 9 - Arena con Gravas**

**AGRADECIMIENTOS**

El Autor agradece al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Javeriana el permiso para publicar resultados del SPT.

**REFERENCIAS**

**BOWLES, J.E. (1988).**- Foundation Analysis and Design.- 4rd. Ed. - 1004 pp.- McGraw-Hill Book Co.

**GIBBS, H.J.; HOLTZ, W.G. (1957)** - Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing - Proc. IV ICSMFE - London - Vol 1. pp. 35-39

**ISHIHARA. K. (1989).**- Dinámica Aplicada a la Estabilidad de Taludes- 206 pp.- Sociedad Colombiana de Geotecnia - Univ. Nacional, Bogotá

**JSCE (1984).**- Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures in Japan - Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo

**LIAO, S.S.C; WHITMAN, R.V. (1986).**- Overburden Correction Factors for SPT in Sand - JGED - ASCE - Vol 112 No. 3, pp. 373-377.

**MEYERHOF, G.G. (1957).**- Discussion on Sand Density by Spoon Penetration - Proc. IV ICSMFE - London - Vol 3. p. 110

**PECK, R.B.; HANSON, W.E.; THORNBURN, (1953).**- Foundation Engineering - John Wiley

**POULOS, H.G.; DAVIS, E.H. (1980).**- Pile Foundation Analysis and Design - 397 pp.- John Wiley & Sons. Inc, NY

**SCHMERTMANN, J.H. (1975)** - Measurement of In-situ Shear Strength - Proc ASCE Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties - Raleigh- Vol. 2

**SEED, H.B.; IDRIS, I.M. (1970).**- Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses"- Report EERC 70-10- University of California- Berkeley.

**SKEMPTON, A.W. (1986).**- Standard Penetration Tests Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation- Geotechnique, Vol. 36, No.3 pp. 425-447

**TERZAGHI, K.; PECK, R.B. (1948).**- Soil Mechanics in Engineering Practice.- John Wiley and Sons

**TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. (1996).**- Soil Mechanics in Engineering Practice.- 3rd. Edition- John Wiley and Sons.

**VILLAFÁÑE, G. et AL (1997).**- IX Jornadas Geotécnicas - SCI