

# Control de Densidad Relativa en Terraplenes Refulados

Miguel STANICHEVSKY S.<sup>a,1</sup> y Tatiana STANICHEVSKY O.<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>Geostan SRL, Asunción, Paraguay

**Resumen.** La determinación de la densidad relativa del relleno realizado por proceso refulado, en la profundidad del espesor del relleno, es de vital importancia para certificación de la calidad del relleno obtenido. Se entiende por refulado los rellenos hidráulicos. El ensayo de densidad de campo tradicional del cono de arena no es práctico para la certificación de los espesores y áreas de relleno por los procesos refulados. Los ensayos como el SPT y el CPTu o DPSH (Cono Dinámico Súper Pesado) permiten evaluar la densidad en la profundidad del relleno ejecutado. La ventaja del uso de los ensayos de penetración estática continua radica principalmente en la continuidad de la lectura dependiendo del tipo de cono utilizado. En el ensayo DPSH las lecturas son cada 20 cm y en el SPT los valores son obtenidos cada 45 cm. La correlación obtenida en este trabajo está basada en la relación de Lancellotta (1985), que utiliza el CPTu, pero ajustada a la curva granulométrica de los suelos arenosos finos del Río Paraguay en los rellenos de la Franja Costera de la Bahía de Asunción. Las arenas fueron ensayadas en laboratorio para la obtención de la densidad mínima y con mesa vibratoria para la obtención de la densidad máxima. Se sacan conclusiones y las precisiones de las mediciones referidas a los valores esperados de densidad del relleno.

**Palabras Clave.** SPT, CPT, CPTu, penetrómetro, mesa vibratoria, piezocono.

## 1. Introducción

Las especificaciones técnicas sobre rellenos refulados por lo general prescriben que uno de los parámetros a ser alcanzados en el control de calidad del mismo es la densidad relativa en un valor que debe ser superior, por lo general superior a 55%.

La densidad relativa se define a partir de la ecuación:

$$Dr (\%) = [(e_{max} - e_{nat}) / (e_{max} - e_{min})] \times 100 \quad (1)$$

Una variante para el cálculo es la utilización de los pesos específicos secos, máximos, mínimos y naturales con la ecuación:

$$Dr (\%) = [(Y_d - Y_{dmin}) / (Y_{dmax} - Y_{dmin})] \times (Y_{dmax} / Y_d) \quad (2)$$

La densidad mínima y máxima se deben obtener en el laboratorio siguiendo las recomendaciones del ASTM – D4253 y D4254 utilizando la mesa vibratoria para la obtención de la densidad máxima en suelos granulares. La densidad en el campo se puede

---

<sup>1</sup> Miguel Stanichevsky, Director, Geostan S.R.L, Sicilia 941 e/ Montevideo y Colón, Asunción, Paraguay;  
E-mail: geostan@pla.net.py

obtener con el método del ensayo de la botella de arena ASTM D1556 y calcular de esta forma la Densidad relativa para el punto estudiado. Esta determinación no es práctica y presenta muchas variaciones en función de la ubicación de ejecución del ensayo en el recinto del relleno. El control de la densidad a partir de ensayos de penetración, que pueden ser correlacionados con los valores reales medidos en laboratorio, presenta la ventaja de la facilidad de ejecución, que representa mayores cantidades de ensayos distribuidos en el área y en profundidad. Esto permite una mejor evaluación de la calidad del relleno.

Los ensayos de penetración pueden ser: el SPT (Ensayo de penetración Estándar), CPTu (ensayo de penetración estática con medición de presión de poros o piezocono) [4], DPSH (ensayos de penetración de cono pesado) o PDCL (ensayo de penetración dinámica de cono liviano).

Para la obtención de la densidad relativa en la profundidad, se pueden utilizar cualquiera de los ensayos de penetración indicados anteriormente atendiendo a que deben ser calibrados para la granulometría específica del relleno.

### 2. Ensayos y Determinación de la Densidad Relativa

En los trabajos de rellenos refulados en obras de la Bahía de Asunción, se ha podido utilizar y comparar los valores obtenidos con las mediciones realizadas con el ensayo CPTu, DPSH y SPT respectivamente. Las arenas fueron ensayadas en laboratorio con mesa vibratoria para la obtención de la densidad máxima.

A partir de la relación de la densidad relativa y valores de  $q_c$ , para ensayos de CPTu en diversos tipos de arenas publicados por otros investigadores [1,3], se ha procedido a ajustar la correlación para los ensayos realizados con CPTu en los suelos de la Bahía de Asunción. Esto se realizó tomando además los valores obtenidos de la densidad por el método del cono de arena en el campo y la determinación en laboratorio de la densidad máxima y mínima utilizando la mesa vibratoria. La expresión de la Densidad relativa en función de la resistencia de punta del CPTu y de la tensión efectiva [1,3] es:

$$Dr_L (\%) = -98 + 66 \text{Log}_{10} (q_c / \sigma'_{vo})^{0.5} \tag{3}$$

donde los valores de  $q_c$  están medidos en T/m<sup>2</sup>. La Figura 1 presenta el gráfico extraído de [1,3] donde se muestra el rango de variación de los resultados en el orden del +-20%. Al realizar ensayos sobre un mismo tipo de arena, esta precisión aumenta al rango de +-5% como se ha podido comprobar en los ensayos realizados en el sitio en estudio.

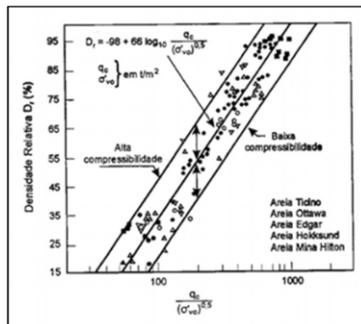


Figura 1. Densidad Relativa en función de Qc [1,3].

Una primera evaluación en dos puntos de ensayos con cono de arena y con CPTu (Tabla 1) mostró que los valores arrojados por la ecuación de Lancellota con el CPTu  $Dr_2$  se encontraban en un orden de 7% a 17% (%var) más alto que los obtenidos con el cono de arena  $Dr_1$ .

**Tabla 1.** Densidad Relativa de Campo a partir de Mediciones con Cono de Arena.

Ens.	Prof. (m)	$\gamma_{max}$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{min}$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{in situ}$ (ton/m <sup>3</sup> )	$Dr_1$ (%)	$q_c$ (ton/m <sup>2</sup> )	$Dr_L$ (%)	% var
1	0.50-0.70	1.828	1.477	1.691	65.9	454	77.17	+17%
2	0.90-1.10	1.828	1.477	1.747	80.5	814	86.59	+7%

La obtención de estos dos valores indicaba que la relación expresada en la Ec. (3) estaba arrojando valores superiores a los reales encontrados en el sitio. Es por ello que se procedió a la ejecución de mayores cantidades de ensayos buscando ajustar la expresión a una más acorde al tipo de arena de la Bahía, cuya granulometría típica se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Granulometría de las Arenas de la Bahía.

Tamiz Estándar	% Pasante
N° 3/8" (9,5 mm)	100
N° 4 (4,76 mm)	100
N° 8 (2,38 mm)	100
N° 16 (1,19 mm)	100
N° 40 (0,42 mm)	98-100
N° 50 (0,297 mm)	88-99
N° 100 (0,149 mm)	18-75
N° 200 (0,074 mm)	2-9

### 3. Mediciones y Valores Obtenidos

Con la ejecución de ensayos programados y comparando los resultados con los valores de densidad de campo medidos con el cono de arena, utilizando también los valores de la densidad mínima y máxima obtenidos con la mesa vibratoria, se ajustó la ecuación de la Densidad Relativa. En la Tabla 3 pueden verse los resultados para 13 casos considerando el ajuste indicado en la Ec. (4).

La ecuación propuesta ajustada es:

$$Dr_2(\%) = -112,5 + 66 \text{Log}_{10} (q_c / \sigma'_{vo})^{0.5} \quad (4)$$

**Tabla 3.** Ajuste del Parámetro de la Ecuación de Densidad Relativa con el CPTu.

Ens.	Prof.	$\gamma_{max}$	$\gamma_{min}$	$\gamma_{in situ}$	$Dr_1$ (%)	$q_c$ (ton/m <sup>2</sup> )	$Dr_2$ (%)	% var
W1	0.50-0.70	1.828	1.477	1.671	60.50	466.40	62.776	3.8%
W2	0.70-0.90	1.828	1.477	1.671	60.40	577.10	64.757	7.2%
W3	0.90-1,10	1.828	1.477	1.665	58.80	707.50	67.366	14.6%
W4	1,10-1,30	1.828	1.477	1.693	66.40	851.20	70.032	5.5%
W5	0.50-0.70	1.828	1.477	1.694	66.71	390.60	57.692	-14.0%
W6	0.70-0.90	1.828	1.477	1.698	67.78	317.80	47.657	-9.4%
W7	0.50-0.70	1.828	1.477	1.694	66.70	628.50	71.326	6.9%
W8	0.50-0.70	1.828	1.477	1.678	62.38	521.30	65.966	5.7%

**Tabla 3.** (continuación) Ajuste del Parámetro de la Ecuación de Densidad Relativa con el CPTU.

Ens.	Prof.	$\gamma_{max}$	$\gamma_{min}$	$\gamma_{in situ}$	$Dr_1$ (%)	$q_c$ ( $ton/m^2$ )	$Dr_2$ (%)	% var
W9	1.10-1.30	1.828	1.477	1.717	72.80	1277.90	84.313	15.8%
W10	0.50-0.70	1.828	1.477	1.669	60.00	549.90	67.497	12.5%
W11	1.10-1.30	1.828	1.477	1.626	47.80	432.90	53.286	11.5%
W12	0.50-0.70	1.828	1.477	1.691	65.90	454.00	62.004	-5.9%
W13	0.90-1.10	1.828	1.477	1.747	80.50	814.30	74.627	-7.3%

Al llevar estos datos al gráfico de la Figura 2, con los datos reproducidos por la Ec. (4) y la modificada para la Bahía de Asunción, se puede observar que los resultados caen en la franja denominada de baja compresibilidad.

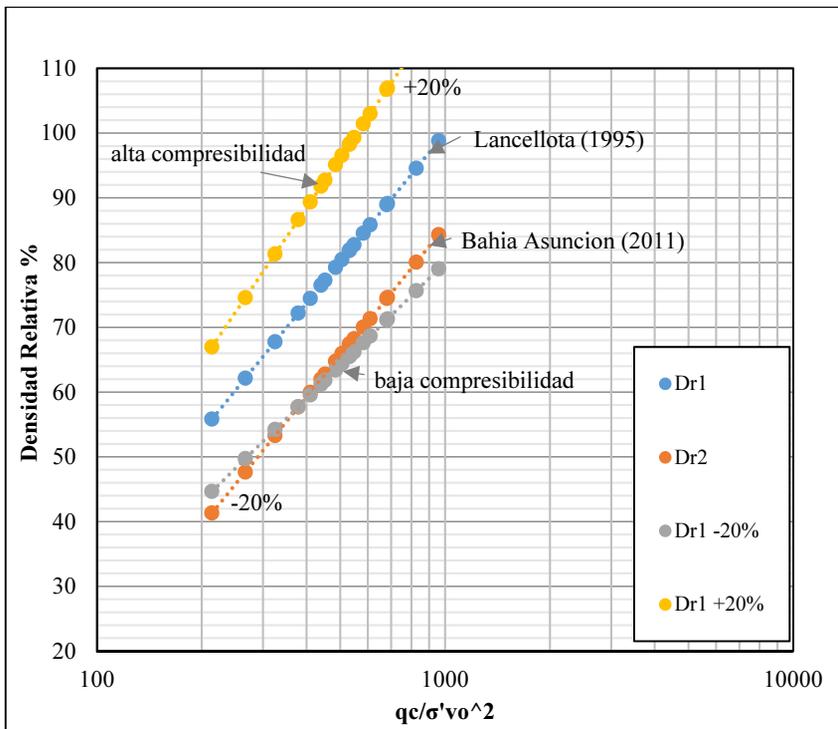
En este trabajo también se analizaron correlaciones con resultados de ensayos Nspt y DPSH. Las correlaciones utilizadas fueron las siguientes:

Para el SPT [5, 6, 7]:

$$Dr(\%)^2 = Nspt_{60}/55 \tag{5}$$

Para el DPSH [2]:

$$Nspt = 0.8 [DP_{20} + DP_{40} + DP_{60}] \tag{6}$$



**Figura 2.** Densidad Relativa en función de  $Q_c$  [2].

La Ec. (5) es la recomendada por su autor para arenas finas.

La Ec. (6) es la correlación obtenida entre el  $N_{spt}$  y el DPSH en los ensayos realizados en la Bahía. La densidad relativa utilizada es la obtenida a partir del valor  $N_{spt}$  arrojado por esta correlación.

El gráfico de la Figura 3 presenta los resultados arrojados para la serie de ensayos W2-W3-W4 en un sondeo, en donde se superponen valores de densidad relativa obtenidos a partir de ensayo de cono de arena en el campo, ensayo SPT, ensayo DPSH y ensayo CPTu.

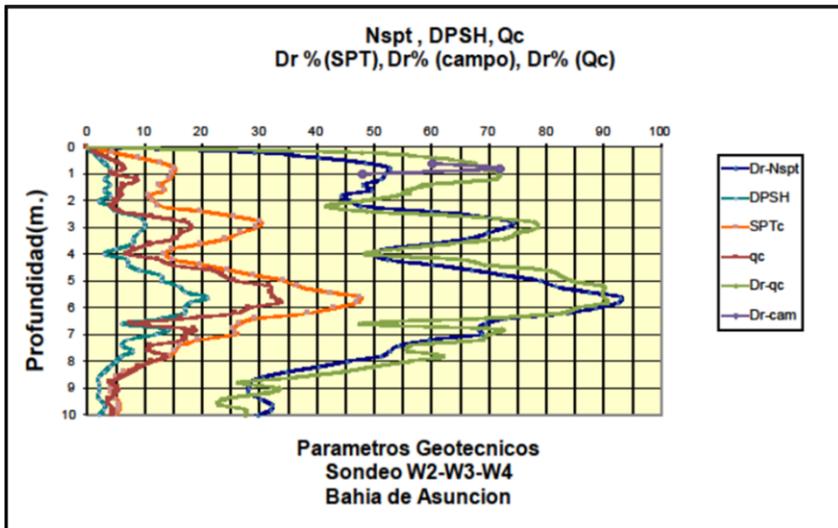


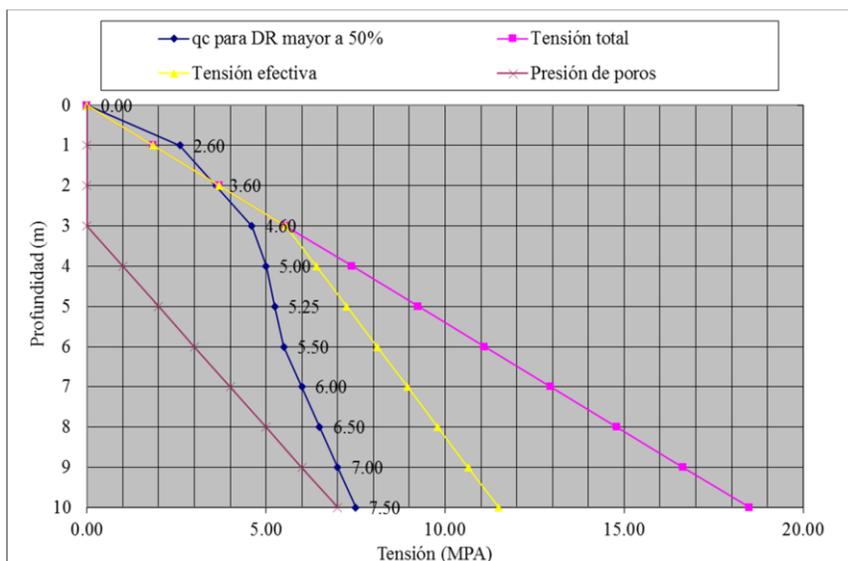
Figura 3. Resultados de Ensayos de Penetración y Densidad Relativa.

#### 4. Caso Práctico: Procedimiento de Aplicación del Control de Densidad

Con la aplicación de los resultados obtenidos en la investigación de valores de Densidad Relativa a partir de ensayos de penetración en trabajos de relleno en la Bahía de Asunción, se estableció un criterio práctico para el control de la densidad relativa consistente en los siguientes pasos:

- Ejecutar el ensayo de la densidad de campo con el cono de arena, a una profundidad de 50 cm desde la cota superficial y en dos niveles de 20 cm. El primero a los 4 días y el segundo a los 7 días de haber cesado el rellado en la pista.
- Llevar la muestra del material (mismo donde se realizó la densidad de campo) al Laboratorio para determinar el pasante en el tamiz N° 200 y clasificar al material en SP, SP-SM y SM.
- Con el valor del porcentaje de pasante en el tamiz 200 obtener los valores de densidades máximas y mínimas mediante tablas preparadas en laboratorio. Luego a través de la fórmula correspondiente (ASTM) determinar la Densidad Relativa (Dr).

- Cuando los valores de  $D_r$  obtenidos en el punto anterior son superiores al 55% entonces se concluye que la pista está conforme a las exigencias de las Especificaciones Técnicas (referido al valor de Densidad Relativa).
- Cuando los valores de  $D_r$  son iguales o inferiores a 55% entonces se procede a determinar densidad máxima y mínima específicamente para el material de pista objeto del ensayo. Con los valores así obtenidos se vuelve a determinar la  $D_r$  de la pista para definir la condición de la misma.
- Cuando se da el caso del punto anterior, para obtener la densidad máxima con la mesa vibratoria se utilizara una vibración con 80 ciclos y el tiempo de 8 minutos en el ensayo. Como alternativa se tiene la vibración “con doble amplitud” la cual se hace con 76 ciclos.
- Aplicar luego el control expeditivo que se realiza con el CPTU, en las secciones o puntos de control y en la profundidad requerida, aplicándose la ecuación de correlación obtenida en la investigación.
- Para el control en el campo se puede tomar como referencia el gráfico de la Figura 4 que muestra los valores de  $q_c$  que corresponden a una  $D_r=50\%$ . Se puede apreciar la influencia de la sobrepresión con la profundidad.



**Figura 4.** Valores de  $q_c$  medidos en Mpa que definen un valor de  $D_r > 50\%$  con la ecuación de  $D_r \%$  para las arenas de la Bahía.

## 5. Conclusiones

Gracias a la obtención de la granulometría y la densidad de las arenas finas de la Bahía de Asunción, mediante ensayos de laboratorio y de campo, se pudo posteriormente utilizar los resultados del ensayo CPTu para el control efectivo de la calidad del macizo del relleno refulado. Se comprobó que los ensayos SPT, CPT y DPSH permiten la obtención de la Densidad Relativa, que define la calidad del relleno. En el ensayo de CPTu o en el ensayo DPSH se reduce la variabilidad en los resultados que se puede dar

en el manejo manual del SPT, comúnmente utilizado en nuestros medios. La relación del DPSH con la Densidad Relativa es una opción que se puede utilizar en suelos muy densos, pero en el caso del terraplén refulado la confiabilidad es mayor en un ensayo CPTu. Las curvas granulométricas y rangos de pasantes de la caracterización granulométrica deben acompañar a los ensayos de penetración para su validación.

## **Referencias**

- [1] SCHNAID, F.; "Ensaio de Campo e suas aplicacoes a Engenharia de Fundacoes". Oficina de Textos, 2000. p. 68-70.
- [2] STANICHEVSKY, M.; "Evaluación de Proyecto Avda. Costanera Norte". 2010.
- [3] LANCELOT, R., "Geotechnical Engineering", 1995. A.A. Balkema. p: 242-244.
- [4] BALIGH, M.M., AZZOUZ, A.S., WISSA, Z.E., & MARTIN .R.T. "The Piezocone Penetrometer" Cone Penetration Testing and Experience, St. Louis, Missouri, 1981.
- [5] LADD, C.C., FOOT, R., ISHIHARA, K., SCHLODDRT, G. & POULOS, H.G. "Stress –Deformation and strength characteristics: State of the Art Report". 9th ICSMGE, 1977.
- [6] HACHICH, W., FALCONI, F.F, SAES, J.L., FROTA, R.G.Q, CARVALHO, C.S., NIYAMA, S. "Fundacoes Teoria e Practica" PINI, ABMS/ABEF, 1996. p.124.
- [7] SKEMPTON, A.W. "Standard Penetration Test Procedures and the effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation". Geotechnique 36, nº 3., 1986. p. 425-447.