

# EL CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN Y SU APLICACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE SUELOS

Fabiana Viscarra Agreda<sup>1</sup>

## Resumen

*La presente investigación incursiona en la aplicación de una herramienta, cuyo estudio y aplicación se viene desarrollando desde 1959. El Cono Dinámico de Penetración, DCP, se ha constituido en un instrumento de uso práctico y económico para la evaluación de terraplenes conformados y paquetes estructurales existentes. Durante el presente trabajo, se desarrolló una metodología para realizar ensayos de DCP en laboratorio, utilizando diferentes tipos de suelos locales representativos para la conformación de terraplenes. Las variables del estudio son los valores de CBR, DCP, contenido de humedad y peso específico seco; estos dos últimos presentaron gran influencia durante el desarrollo de pruebas DCP.*

*Finalmente se ratifica la gran variabilidad que presenta el ensayo de CBR y la dificultad en el momento de interpretar sus resultados. Estas patologías desembocan en una serie de dudas, hasta llegar a cuestionarse acerca del grado de confiabilidad de este tipo de ensayo, cuyo valor recae directamente en el dimensionamiento de espesores en pavimentos.*

**Palabras-clave:** *Cono Dinámico de Penetración (DCP); Valor de Soporte California (CBR); correlación.*

---

<sup>1</sup> MSc. Licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad Privada Boliviana, fviscarra@gmail.com

## **1 INTRODUCCIÓN**

La determinación del Valor de Soporte California, CBR, parámetro aplicado en el diseño de pavimentos flexibles, en general es considerada como un proceso complejo que adicionalmente requiere de bastante tiempo para su obtención.

Como respuesta a estas dificultades surgen diferentes dispositivos como el DCP (Cono Dinámico de Penetración) que facilitan y proporcionan mayor practicidad a los ensayos convencionales. El DCP es una herramienta útil, multifuncional, su uso trae una gama de beneficios. Sin embargo, es necesaria una buena interpretación para determinar parámetros de diseño finales más confiables, optimizando tiempo, dinero, recursos humanos y mecánicos.

## **2 EL CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN**

El DCP fue desarrollado en 1956 por Scala; estudios realizados en campo por Livneh y Ishali (1987) y Kleyn (1975) han sido básicos para la evaluación de pavimentos. Posteriormente se ha difundido su uso en Inglaterra, Australia, Canadá, Nueva Zelanda y Estados Unidos.

Este instrumento es utilizado esencialmente para evaluar la resistencia de suelos tanto no disturbados como compactados y estimar un valor de CBR en campo. A diferencia de este último, el DCP presenta ventajas como su simplicidad y economía de uso. Implícitamente, el DCP estima la capacidad estructural de las diferentes capas que conforman a un pavimento, detecta simultáneamente el grado de heterogeneidad que puede encontrarse en una sección y la uniformidad de compactación del material, de una manera rápida, continua y bastante precisa.

### **2.1 Especificaciones Geométricas del DCP**

Recientemente la ASTM publicó una metodología estándar para el uso y aplicación del DCP en pavimentos, con la designación: D 6951-03. Este ensayo utiliza un DCP basado en el dimensionamiento de Sowers, con un martinete de 8 kg el cual tiene una caída libre de 575 mm y un cono intercambiable en la punta con un ángulo de 60° y un diámetro de 20 mm.

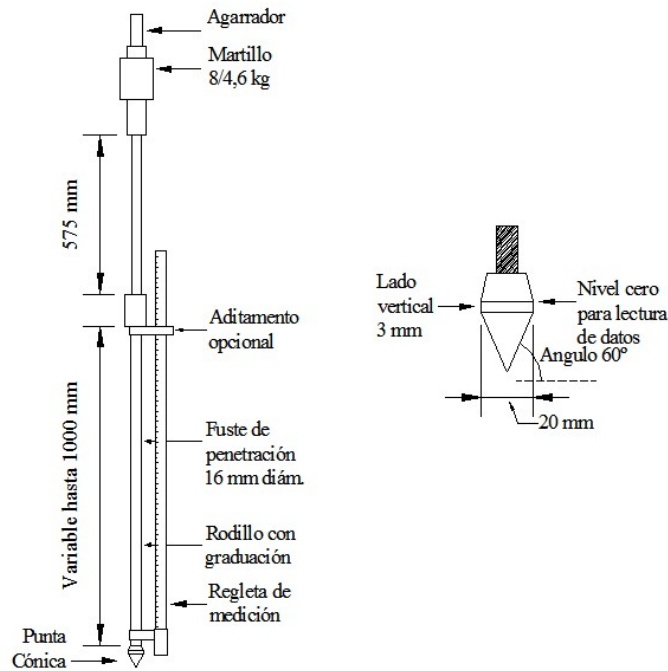


Figura 1 - Esquema del Equipo DCP (ASTM D-6951-03).

## 2.2 Curva DCP

Gráfica que representa la penetración acumulada en función del número de golpes acumulados para los respectivos datos. En este tipo de curvas, como se muestra en la Fig. 2 se puede visibilizar el número de capas existentes representadas por rectas de diferentes pendientes, también se puede determinar el espesor de dichas capas.

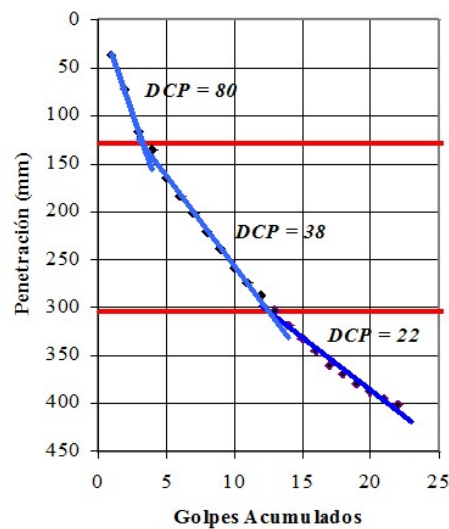


Figura 2 - Curva DCP para una serie de valores, se observan tres capas diferentes.

### 2.3 Número DCP

Este número representa la penetración obtenida por golpe y se expresa en mm/golpe; es el valor de la pendiente de la curva DCP para la capa en estudio, mientras más vertical sea la gradiente, menor será la resistencia del suelo.

Asimismo, esta medida de penetración describe la resistencia promedio de un suelo a través de cierta profundidad alcanzada, la cual se determina como el trabajo realizado por el suelo para detener el cono de penetración, dividido entre la distancia de penetración.

### 2.4 Diagrama Estructural

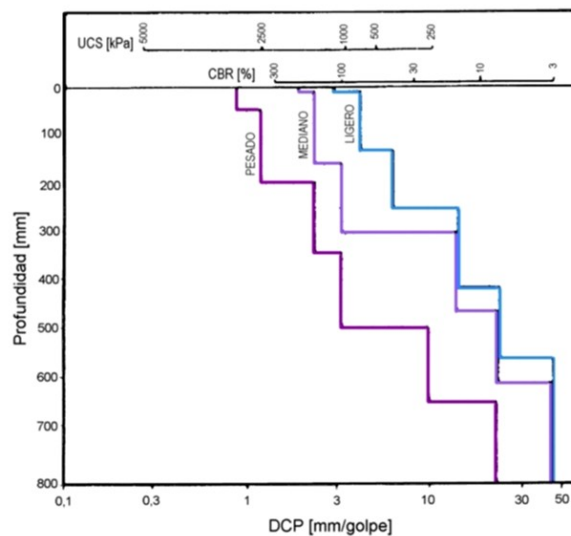


Figura 3 - Curvas estructurales DCPs, para tráfico liviano, mediano y pesado (Transvaal Roads Department-TPA, 1978).

Con posibles propósitos de aplicación al diseño de pavimentos, Transvaal Roads Department-TPA (1978) desarrolló un conjunto de curvas directrices que indican la capacidad de soporte de pavimentos sometidos a condiciones de tráfico ligeras, medianas y severas, como se muestra en la Fig.3. Por lo tanto, se puede comparar cualquier sondeo de DCP con las directrices mencionadas para estimar la profundidad a la cual el material natural actúa como un elemento estructural en el pavimento.

### 2.5 Correlaciones existentes para el DCP

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes investigaciones para correlacionar el valor DCP con otras características físico-mecánicas de los suelos; la selección apropiada de este tipo de correlaciones está relacionada con el juicio del profesional en el área y las especificaciones del equipo DCP. La Tabla 1 resume las expresiones más trascendentales obtenidas con el uso del DCP (equipo normado según ASTM).

Tabla 1 - Resumen de expresiones para correlacionar el número DCP con otros valores.

<b>Relación entre DCP(mm/golpe) y:</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Autor/Autores</b>	<b>Observaciones</b>
Límite Líquido (%)	$LL = 0,62 \cdot \text{Log}(DCP) + 1,14$	Gabr, M. et al. (2001)	Suelo con alto contenido de finos (60%).
Grado de Saturación (%)	$S = 1 - e^{-0,065 \cdot DCP}$	Gabr, M. et al. (2001)	Suelo con alto contenido de finos (60%).
Valor de Soporte California (CBR %)	$\text{Log}(CBR) = 2,465 - 1,12 \cdot \text{Log}(DCP)$ o expresada también: $CBR = \frac{292}{DCP^{1,12}}$	Van Vuren (1968), Kleyn (1975), Livneh e Ishai (1987), Webster (1992) y Siekmeier (1999).	Apta para todo tipo de suelos (granulares y cohesivos).
Valor de Soporte California (%)	$\text{Log}(CBR) = 2,317 - 0,858 \text{Log}(DCP)$	Transport Road Research TRRL (1986).	Apta para todo tipo de suelos.
Valor de Soporte California (%)	$CBR = \frac{1}{0,002871 \cdot DCP}$	Webster S.L. et al. (1994).	Para suelos CH.
Valor de Soporte California (%)	$CBR = \frac{1}{(0,017019 \cdot DCP)^2}$	Webster S.L. et al. (1994).	Para suelos CL con CBR < 10 %.
Módulo Resiliente (Mpa)	$MR = 537,76 \cdot DCP^{-0,6645}$	Chen D. et al. (2005).	Estudio realizado en bases y sub-bases de diferentes autopistas de Estados Unidos.

<b>Relación entre DCP(mm/golpe) y:</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Autor/Autores</b>	<b>Observaciones</b>
Módulo Resiliente (Mpa)	$MR = 532,1 \cdot DCP^{-0,492}$	George y Uddin (2000).	Suelos finos.
Módulo Resiliente (Mpa)	$MR = 235,3 \cdot DCP^{-0,475}$	George y Uddin (2000).	Suelos gruesos.
Compresión No Confinada (kPa)	$\text{Log}(UCS) = 3,29 - 0,809 \text{Log}(DCP)$	McElvaney y Djatnika (1991).	Suelos con limos.

### 3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología empleada se sub-dividió en cinco etapas: 1. La preparación de las muestras bajo estudio, 2. La elaboración de ensayos generales para la determinación de las propiedades físicas de los suelos (caracterización, determinación de la humedad óptima, determinación del peso unitario seco máximo, determinación de gravedad específica de los sólidos, etc.), 3. La elaboración de ensayos específicos del estudio (determinación de valores CBR y DCP en laboratorio) y 4. El proceso de resultados y análisis estadístico.

La Tabla 2 resume las características y parámetros físicos de las muestras bajo estudio.

Tabla 2 - Clasificación y parámetros de las muestras empleadas.

Muestra	Clasificación (AASHTO)	Clasificación (Sistema Unificado)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Gs (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>opt</sub> (%)
M1	A-1-a	Grava limosa con arena (GM)	22,3	22,1	1,2	2,72	22.4	6.0
M2	A-2-4	GM	23,1	21,9	1,2	2,71	21.7	5.7
M3	A-1-b	GM	22,0	20,9	1,2	2,71	22.2	6.3

#### 3.1 Ensayos específicos

##### Ensayos DCP

Los ensayos de DCP se realizaron en laboratorio con el uso de un molde cilíndrico de 25 cm de diámetro y 43 cm de altura, la energía de compactación utilizada fue de 2700 kNm/m<sup>3</sup>. Realizar el ensayo DCP en laboratorio permitió tener mejor control sobre las condiciones más influyentes en el resultado de un CBR, como lo son la densidad, contenido de humedad y uniformidad de compactación.

Una vez con los anillos de carga (249 kg/m<sup>2</sup>), el ensayo de penetración se llevaba a cabo como se muestra en la Fig. 4, la profundidad era registrada al milímetro más cercano y el número de golpes se determinaba según la resistencia que ofrecía dicho material.



Figura 4- Ensayo DCP llevado a cabo en laboratorio.

### Ensayos CBR

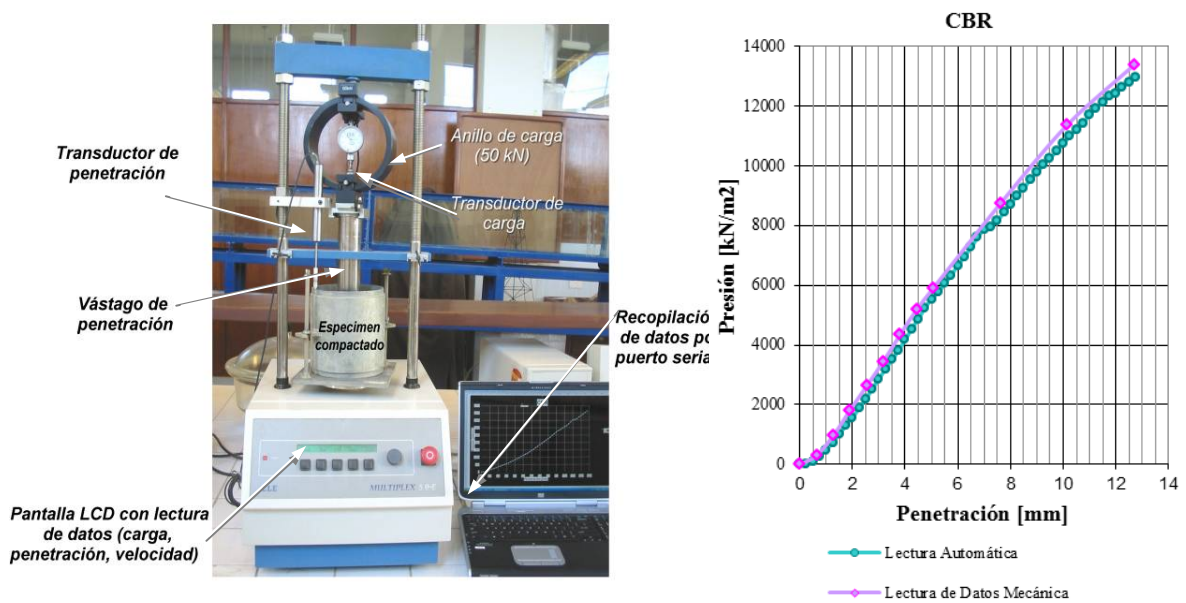


Figura 5 - Gráfica presión resistente versus penetración, para la determinación del valor CBR Ensayo DCP llevado a cabo en laboratorio. En la figura de la izquierda, se tiene la configuración del equipo para el ensayo de CBR automático.

Una ventaja en el proceso de realización de ensayos CBR, consistió en la captura automática de datos de carga y deformación que se obtuvo del equipo ELE Multiplex E-50 disponible en el Laboratorio de Suelos UPB, como se muestra en la Fig. 5.

## 4 RESULTADOS

En la búsqueda del modelo de regresión que mejor se adecúe a los datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico exhaustivo, se empleó una norma guía (NB 502-89), para la verificación de los supuestos de regresión y algunos criterios como el coeficiente de determinación  $R^2$ , el coeficiente de determinación ajustado  $R^2_{aj}$ , coeficiente de correlación múltiple, análisis de varianza, suma de cuadrados SC. Finalmente se realizaron pruebas complementarias de multicolinealidad, homocedasticidad y autocorrelación, esta última mediante la prueba de Durbin Watson que diagnostica la presencia de correlación entre residuos consecutivos.

### 4.1 Relación entre el Contenido de Humedad y el valor DCP

Se percibió una gran influencia del contenido de humedad  $w$  (%) en la determinación del valor  $DCP$  (mm/golpe). De esta forma se obtuvo la siguiente correlación para relacionar Humedad vs. DCP:

$$w = 5,099 + 0,897 \cdot \ln(DCP) \quad (1)$$

Se obtuvo un  $R^2 = 0,778$  para los 45 datos evaluados. Los límites de validez para la ecuación son:  $2 < DCP < 92$ .

### 4.2 Relación entre el Peso Específico Seco y DCP

No se encontró ninguna relación directa entre el peso específico seco ( $\gamma_d$ ) y DCP. Sin embargo luego de establecer la Ec.1, se determinó una correlación muy significativa entre  $\gamma_d$  y DCP tomando en cuenta efectos del contenido de humedad. Finalmente se obtuvo la Ec.2, que relaciona el peso específico seco  $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) con el valor  $DCP$  (mm/golpe) y contenido de humedad  $w$  (%).

$$\gamma_d = 21,694 + 0,2075 \cdot w - 0,5964 \cdot \ln(DCP) \quad (2)$$

Con  $R^2 = 50.0 \%$  y  $R^2_{aj} = 36.53 \%$ .

### 4.3 Relación entre el Peso Específico Seco - Máximo y DCP

Generalizando la expresión 2, se obtuvo la siguiente ecuación que describe la relación encontrada entre el Peso Específico Seco ( $\gamma_d$ ), Peso Específico Seco Máximo ( $\gamma_{d \max}$ ) y DCP.

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}} = 1,07235 - 0,03885 \cdot DCP \left(\frac{1}{w}\right) + 0,00594 \cdot w \quad (3)$$

donde:  $\gamma_d$  es el peso específico seco [kN/m<sup>3</sup>].



$\gamma_{d \max}$  es el peso específico seco máximo [kN/m<sup>3</sup>].

DCP es la tasa de penetración [mm/golpe]. Sus límites:  $2 < \text{DCP} < 92$ .

w es en contenido de humedad [%]. Sus límites:  $1,3 < w < 10$ .

La Ec. 3 presenta una mejor aplicabilidad respecto a todas las ecuaciones anteriormente desarrolladas. Por ello se realizó un análisis estadístico más detallado:

#### a) Significancia de las variables independientes

Se tiene como hipótesis nula que los coeficientes de las variables son iguales a cero ( $b_1=b_2=0$ ), si se verifica que el valor de  $t$  de Student calculado para cada variable  $|t_{\text{cal}}|$  es mayor a  $t_{(\alpha; n-k-1)}$  para un nivel de significancia del 5 % ( $\alpha=0,05$ ), la hipótesis nula deberá ser rechazada, concluyéndose que todas las variables son importantes en el modelo.

Se tiene  $t_{(0,05; 12)} = 1,7823$ , con  $n-k-1 = 12$  grados de libertad para los 15 grupos de datos estudiados, este valor es verificado con los resultados de la Tabla 3.

Tabla 3 - Significancia de las variables de la expresión 3

Variable	Coefficiente	t Calculado
DCP <sup>1/w</sup>	b1	-6,3735
w	b2	-4,9254

#### b) Análisis de Varianza

La ecuación 3 presento un  $R^2$  de 0,808 y un  $R^2_{aj} = 0,776$ . Con el uso de la tabla de distribución  $F$  de “Snedecor” (Tabla 5) se determina  $F$  considerando un nivel de tolerancia ( $\alpha = 0,01$ ) para una evaluación de nivel riguroso especial, según NB – 502/89. Si  $F_{\text{calc}} > F_{(\alpha; k; n-k-1)} = 6,93$  (con 12 grados de libertad), se rechaza la hipótesis que indica la no existencia de correlación alguna. La Tabla 4 presenta los resultados del análisis ANOVA.

Tabla 4 - Análisis ANOVA para datos de  $\gamma_d / \gamma_{d \max}$ , DCP<sup>1/w</sup> y w.

Parámetro	Coef.	Error Estándar (SE)	T	Fuente	DF	Suma de Cuadrados(SS)	MS	F
Ctte.	1,07235	0,0136187	78,74	Modelo	2	0,0092084	0,00460	25,31
(DCP) <sup>1/w</sup>	0,388505	0,00609563	-6,37	Residual	12	0,0021834	0,00018	
w	0,005941	0,00120617	-4,93	Total	14	0,0113918		

#### c) Mínimo número de datos

La teoría de regresión indica que el número de datos a evaluar debe ser mayor al número de variables  $k$ . Para la evaluación a un nivel riguroso especial, NB – 502/89 exige cierto número de datos definidos por:  $n \geq 2k + 5$  y  $n \geq 3k$ .

con:  $n =$  número de datos muestrales = 15

$k =$  número de variables independientes más dependiente = 3

Se tiene:  $15 \geq 2(3) + 5$  y  $15 \geq 3(3)$ .

**d) Outliers**

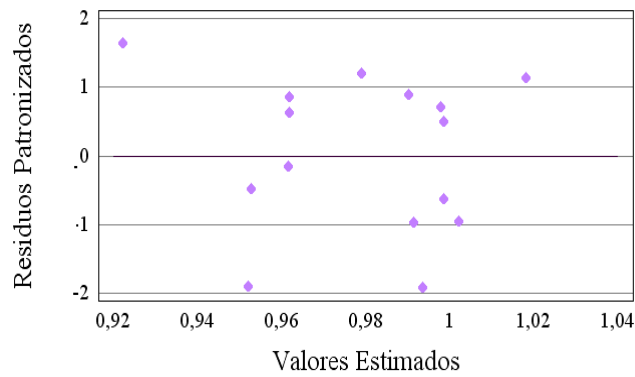


Figura 6 - Gráfico de valores esperados para  $\gamma d / \gamma d \max$  versus residuos estandarizados.

Estos puntos atípicos son generados por la gran desviación de los residuos respecto a una desviación patrón (rango aceptable  $\pm 2,0$ ). En la Fig. 6 se verifica la no existencia de outliers irregulares en el modelo.

**e) Multicolinearidad**

Se verifica inexistencia de multicolinearidad entre variables, con el análisis de los gráficos de residuos versus variables independientes, o por la matriz de correlaciones parciales. Evidentemente existe multicolinearidad entre las variables dependientes DCP y  $w$ , esta influencia es la causa principal de la eficacia del modelo obtenido.

	<i>Ctte.</i>	$DCP^{1/w}$	$w$
<i>Ctte.</i>	1	-0,8602	-0,6787
$DCP^{1/w}$	-0,8602	1	0,2997
$w$	-0,6787	0,2997	1

**f) Homocedasticidad**

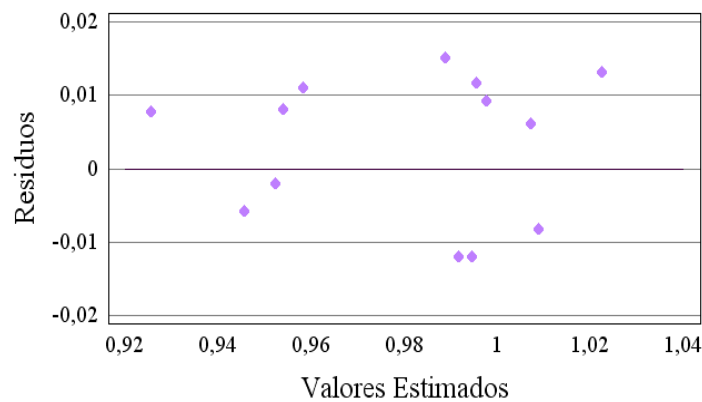


Figura 7 - Gráfico de homocedasticidad (determinación de aleatoriedad y varianza constante).

El modelo será considerado como homocedástico si sus residuos poseen una varianza constante. En la Fig. 7 se observa que los residuos se distribuyen aleatoriamente sin vestigio de tendencia alguna, considerando finalmente al modelo propuesto como homocedástico.

### g) Normalidad de Residuos y Autocorrelación

La presencia de una línea recta en la gráfica de probabilidad acumulada *versus* residuos, es buen indicador de una distribución normal. Así también, la varianza constante de residuos indica que se tiene una muestra normal.

El fenómeno de la autocorrelación entre residuos consecutivos, se determina con la prueba de Durbin Watson; se obtuvo el valor de  $P = 0,3632$  esto significa que bajo la hipótesis nula y a un cierto nivel de tolerancia ( $\alpha=0,05$ ), con  $P > \alpha$  no se rechaza dicha hipótesis. Consecuentemente los datos observados presentan las propiedades de aleatoriedad y varianza constante.

El uso de este modelo puede aplicarse fácilmente a la evaluación del nivel de compactación y control de calidad de un relleno o terraplén en ejecución. El valor de  $\gamma_{d \max}$  puede estimarse de la Fig. 8 derivada de la expresión 3.

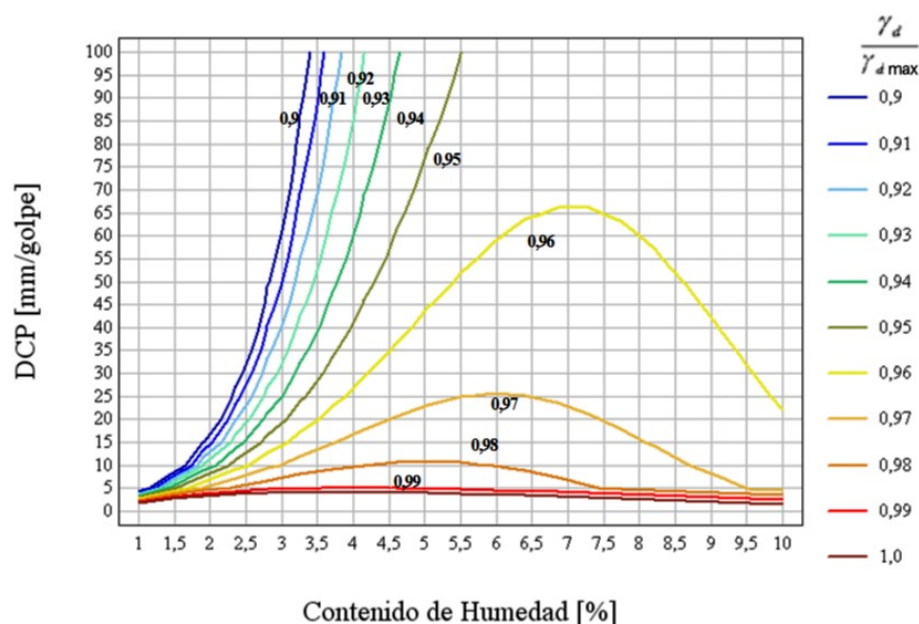


Figura 8- Gráfica bidimensional para la obtención de  $\gamma_d / \gamma_{d \max}$  en función de  $w$  y DCP.

### 4.4 Relación entre el Contenido de Humedad, Humedad Óptima y DCP

Se encontró una excelente correlación entre las variables de DCP, contenido de humedad ( $w$ ) y contenido de humedad óptimo ( $w_{opt}$ ). Con  $1,3 < w < 10$  y  $2 < DCP < 92$ .

$$\frac{w_{opt}}{w} = 1,6292 + 0,8708 \cdot DCP \cdot \frac{1}{w} - 0,2682 \cdot w \quad (4)$$

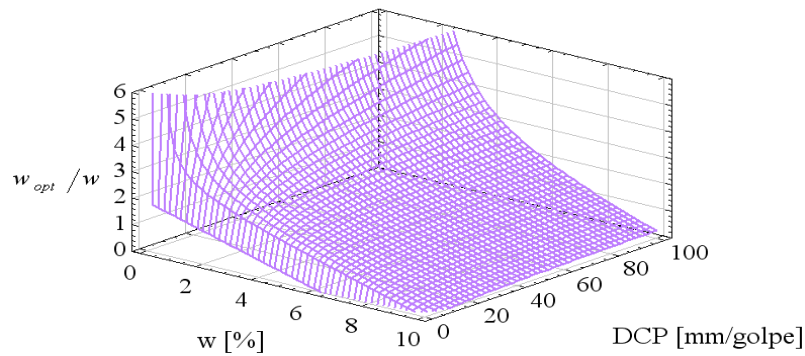


Figura 9 - Variación de  $w_{opt}/w$ ,  $DCP$  y contenido de humedad.

En las figuras 9 y 10 se distingue la variación de las variables presentadas en la Ec. 4. Para dicha ecuación, se obtuvo un coeficiente de determinación:  $R^2 = 0,965$  y un  $R^2_{aj} = 0,96$ . El número de conjuntos de datos fue de 15, cumpliéndose de esta manera con el mínimo número de datos requeridos para el análisis regresional. El valor de Student fue  $t_{(0,05;12)} = 1,7823$  y  $F_{(0,01;2;12)} = 6,93$ . El valor de Durbin Watson fue  $P=0,084$  que se encuentra por encima del nivel de significancia. Finalmente, se alega que se cumplieron correctamente todos los supuestos de una regresión múltiple.

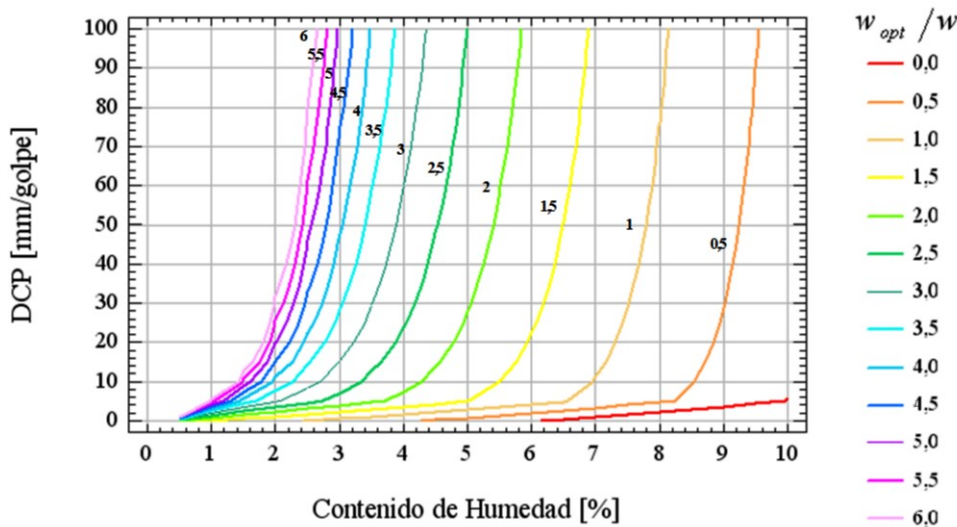


Figura 10 - Gráfica para la obtención de  $w_{opt}/w$  en función del  $DCP$  y  $w$ .

#### 4.5 Relación entre el CBR y $DCP$

Se percibió una fuerte relación entre dichos valores, tanto en condiciones normales de preparación como en condiciones de saturación. Ambos grupos de resultados se analizaron por separado, las ecuaciones obtenidas presentaron valores de  $R^2$  de 0,972 y 0,942, respectivamente. Esta relación se expresa mediante las ecuaciones 5a y 5b.

$$\text{Log}(CBR) = 2,38393 - 0,975 \cdot \text{Log}(DCP) \quad (5a)$$

Expresada de otra forma:

$$CBR = \frac{242}{DCP^{0,975}} \quad (5b)$$

dónde: CBR es el Valor de Soporte California.

DCP está expresado en mm/golpe. Sus límites:  $2 < DCP < 92$  [mm/golpe].

Los resultados del análisis ANOVA para 30 datos analizados, se presentan en la Tabla 5. El valor de  $R^2$  es de 0,962 con un error estándar  $0,107=(0,011395)^{1/2}$ .

Tabla 5 - Análisis ANOVA con datos de Log(CBR) y Log(DCP).

Parámetro	Coef.	Error Estándar (SE)	T	Fuente	DF	Suma de Cuadrados(SS)	MS	F
Cte.	2,38393	0,040509	58,8499	Modelo	1	8,02085	8,02085	703,88
Log(DCP)	-0,974806	0,036712	-26,531	Residual	28	0,319067	0,011395	
				Total	29	8,33992		

En la Fig. 11, la línea recta de la probabilidad *versus* los residuos indica una distribución normal en el modelo. El *valor-P* del análisis Durbin Watson fue de 0,3784; esto significa que la  $H_0$  a un nivel de tolerancia ( $> 0,05$ ), no fue rechazada y por lo tanto no existe indicación de autocorrelación en los residuos.

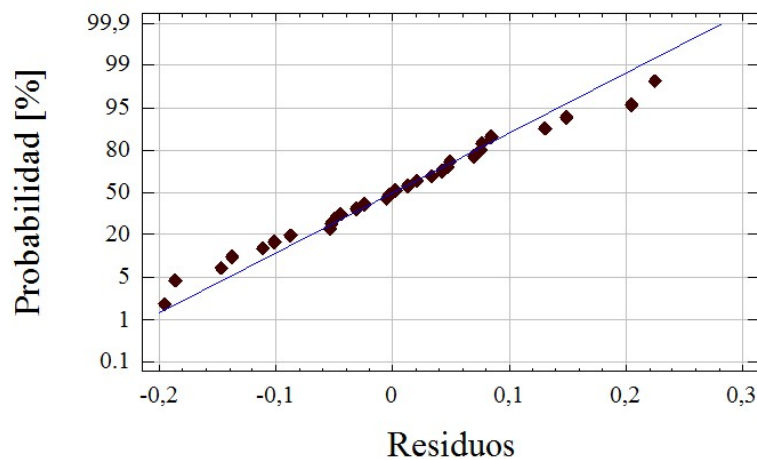


Figura 11 - Determinación de la normalidad en la distribución.

#### 4.6 Relación entre el CBR Saturado y DCP

Se encontró una relación significativa entre el DCP y el cociente del CBR no saturado ( $CBR_{NS}$ ) - CBR saturado ( $CBR_S$ ) para valores de DCP entre 2 y 92 mm/golpe.

$$\frac{CBR_{NS}}{CBR_S} = 1,72961 - 0,8008 \cdot \text{Log}(DCP) \quad (6)$$

Se obtuvo un  $R^2 = 0,707$  y un error estándar  $MSE = 0,129$  para los 13 datos evaluados. Considerando los efectos del contenido de humedad  $w$  (%), se determinó la Ec. 7, para contenidos de humedad entre 0,5 y 10%.

$$\frac{CBR_{NS}}{CBR_S} = 2,28828 - 0,0418141 \cdot DCP^{\frac{1}{w}} - 0,218015 \cdot w \quad (7)$$

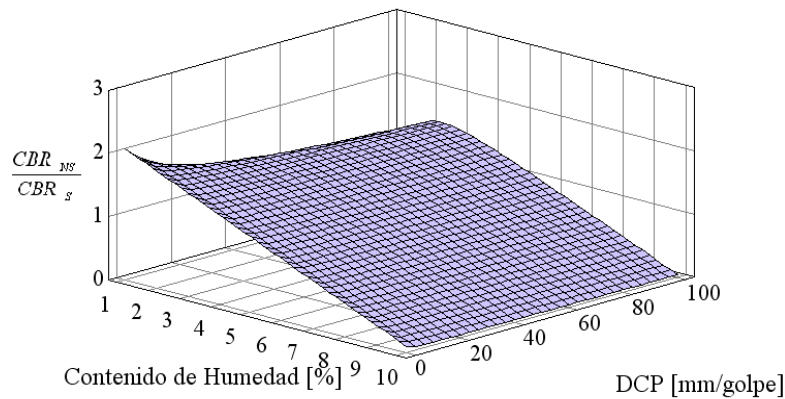


Figura 12 - Superficie de respuesta del modelo de regresión que explica la variación de  $CBR_{NS}/CBR_S$  con DCP y  $w$ .

Se determinó que las variables  $DCP$  y  $w$  de la Ec. 7, son independientes y tienen gran habilidad para explicar el modelo de regresión (Fig. 12) considerado como homocedástico, sin indicios de autocorrelación entre residuos; ratificándose los supuestos de normalidad fundamentales para un análisis de regresión múltiple.

#### 4.7 Comparación entre DCP y la consistencia del suelo

Tabla 6 - Relaciones para valores obtenidos con el equipo DCP normado por ASTM.

<b>Materiales Arenosos</b>			
<i>Descripción</i>	<i>Densidad Relativa de Burmister (%)</i>	<i>SPT saturado N (golpes/300mm)</i>	<i>DCP (mm/golpe)</i>
Muy suelta	-	< 4	> 76
Suelta	0 - 40	4 - 10	31 - 76
Medianamente densa	40 - 70	10 - 30	13 - 31
Densa	70 - 90	30 - 50	5 - 13
Muy densa	90 - 100	> 50	2 - 5
<b>Materiales Arcillosos</b>			
<i>Descripción</i>	<i>Cohesión (kPa)</i>	<i>SPT saturado N (golpes/300mm)</i>	<i>DCP (mm/golpe)</i>
Muy suave	< 18	< 2	> 112
Suave	18 - 36	2 - 4	56 - 112
Firme	36 - 72	4 - 8	31 - 56
Consistente	72 - 144	8 - 15	15 - 31
Muy consistente	> 144	15 - 30	7 - 15

La Tabla 6 relaciona el número DCP con la consistencia del suelo, densidad relativa y SPT, basada en resultados presentados por Brink *et al.* (1982). A diferencia de estos resultados obtenidos para el equipo sudafricano; la tabla se obtuvo luego de una corrección de la energía cinética del equipo Sudafricano y el equipo normado por la ASTM.

## 5 CONCLUSIONES

Se estableció la existencia de una correlación significativa entre el valor de CBR y el número DCP mediante un análisis regresional. Asimismo se determinó una expresión que relaciona el valor de soporte CBR obtenido en laboratorio y el número DCP.

Se ha demostrado a través de los estudios, la gran sensibilidad que este instrumento presenta y la confiabilidad de sus resultados. Haciendo del DCP, un instrumento ideal para evaluar el grado de compactación y la homogeneidad del material en estudio; localizando con gran facilidad puntos débiles en el paquete estructural y por ende la justificación a posibles fallas de un pavimento o un mal relleno compactado en zanjas, terraplenes, etc.

Se distinguió la influencia de ciertas características inherentes al estudio, como el contenido de humedad y el peso específico seco, determinándose expresiones para predecir el contenido de humedad óptimo y el peso específico máximo de un suelo. Los resultados se presentaron en forma de ecuaciones, tablas y gráficos de fácil aplicación.

El trabajo presentado no pretende reemplazar el estudio tradicional en campo o los ensayos CBR. No obstante, es una contribución que afirma la consideración del DCP como un ensayo complementario para verificar las condiciones reales de un suelo. Por ello, durante la obtención del CBR de diseño para una sub-rasante natural, valor primordial en el que recae la determinación de espesores de un pavimento flexible, la utilización del instrumento DCP puede servir de guía en la interpretación de curvas de CBR.

## 6 REFERENCIAS

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS **ASTMD-6951**, Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications, D-6951, 2003, 7p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO DE IMÓVEIS URBANOS, AVALIAÇÃO DE IMÓVEIS RURAIS, **ABNT NB 502-89**, 1985-1989.

BRINK, A. B. et al. (1982). **Soil survey for Engineering**. London: Ed. British L., 378 p.

CHEN, D. H. et al. (2005). A Correlation Between Dynamic Cone Penetrometer Values and Pavement Layer Moduli. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 28, No. 1, January, p. 42-49.

GABR, M. A. et al. (2001). A Potential Model for Compaction Evaluation of Piedmont Soils Using Dynamic Cone Penetrometer. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 24, No. 3, September, p. 308-313.

GEORGE, K. P., and UDDIN, W. (2000) Subgrade Characterization for Highway Pavement Design,. Final Report, **Mississippi Department of Transportation**, Jackson, MS.



KLEYN, E. G. (1975). The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP), Report 2/74, **Transvaal Roads Department**, Pretoria, South Africa, July, p. 35.

LIVNEH, M., and ISHAI, I. (1987). **Pavement and Material Evaluation by a Dynamic Cone Penetrometer**, Proc. In: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENT, Vol. 1, Ann Arbor, Michigan, p. 665-674.

McELVANEY, J., and DJATNIKA, I. (1991). Strength Evaluation of Lime-Stabilized Pavement Foundations Using the Dynamic Cone Penetrometer, **Australian Rd. Res.**, Volume 21, No. 1, p. 40-52.

SCALA, A. J. (1956). **Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers**. In: PROCEEDINGS OF THE SECOND AUSTRALIAN SOIL MECHANICS CONFERENCE, New Zealand, New Zealand Engineer, Vol 11, No.2, pp. 34-44.

Transvaal Provincial Administration, (1978). **Pavement and Materials Design Manual**, TRANSVAAL ROADS DEPARTMENT, L1/78.

TRRL - Information note (1986): **Operating Instruction for the TRL Dynamic Cone Penetrometer**, Overseas Center TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY, Crowthorne, UK.

VAN VUUREN, D. J. (1968). Rapid Determination of CBR With the Portable Dynamic Cone Penetrometer, **The Rhodesian Engineer**, Vol 7, Number 5, Salisbury, Rhodesia, September, p. 852-854.

WEBSTER, S. L. et al. (1992). **Description and Application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer**, Report GL-92-3, DEPARTMENT OF THE ARMY, Washington DC, May, p.19.

WEBSTER, S. L. et al. (1994). **Force Projection Site Evaluation Using the Electric Cone Penetrometer (ECP) and the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)**, Technical Report No. GL-94-17, AIR FORCE CIVIL ENGINEERING SUPPORT AGENCY, U.S. Air Force, Tyndall Air Force Base, FL, April.