

PROPUESTA DE CORRELACIÓN ENTRE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE MATERIALES DE EDAD TRIÁSICA EN LAS CORDILLERAS BÉTICAS (ANDALUCÍA, ESPAÑA)

J. C. Hernández del Pozo

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos . Universidad de Granada

I. Ocete Ruiz

Ldo. Ciencias Geológicas.

Geotécnica del Sur S.A.

RESUMEN: Los materiales margosos yesíferos o suelos triásicos, de tonos abigarrados, son extremadamente típicos en Andalucía Oriental. Tradicionalmente estos suelos han sido considerados con evidentes reparos, según fundamentos de tipo geotécnico; el desarrollo vial que eclosiona en Andalucía hace necesario el uso de los suelos de la zona para la ejecución de terraplenes de dimensiones importantes, dado que la repercusión económica que implicaría el uso de materiales de préstamo sería a todas luces prohibitiva. En general, la inexistencia de tabulaciones que reglen las características geomecánicas de estos suelos hace necesario el desarrollo de trabajos que de alguna forma caractericen, de un formato global, e identifiquen claramente estos materiales. El trabajo que se propone, pretende ser una primera aproximación a lo referido, con una clara vocación de futuro, al conocimiento de estos suelos y más concretamente a la correlación existente entre los valores de índice C.B.R. y los S.P.T. obtenidos mediante sondeos mecánico-rotativos. Los valores obtenidos tanto de los ensayos S.P.T. como de extracción de inalteradas han permitido correlacionar sus resultados con los calculados en obra para los valores de C.B.R. Esta correlación matemática, una vez contempladas las diversas variantes existentes, permitirá, con una aproximación aceptable, determinar a partir de valores C.B.R. de obra la compacidad de los materiales margoso-yesíferos utilizados en terraplenes.

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales de edad triásica ocupan aproximadamente entre un 20 y un 25% del total de la superficie andaluza.

Tradicionalmente, estos suelos, han sido considerados desde un punto de vista geotécnico, como materiales muy desfavorables, induciendo su uso a fenómenos deslizantes y asentamientos de índole importante cuando se usan como terraplenes. La mayoría de las veces estas consideraciones no han sido avaladas por un conjunto de ensayos geotécnicos que definan estas características y cuantifique el grado de "peligrosidad" de los suelos.

El no considerar su uso implica, cuando menos, un grave perjuicio económico para la ejecución de cualquier obra que se desarrolle en su área de influencia; dado que en general, las zonas ocupadas por estos materiales no

suelen presentar suelos de mejores características; en cualquier caso esta búsqueda y localización lleva aparejado el consabido aumento pecuniario en cuanto a transporte, complicación técnica y mediambiental de la búsqueda y explotación de áreas de préstamo.

Hoy en día, cuando asistimos al *parto* del deseado hijo de la geotécnica vial "el P.G.4." es hora de desterrar viejos mitos. No podemos ni debemos tirar o usar con extremados reparos unos materiales que forman la cuarta parte del suelo andaluz, debiendo elegir por conocer su comportamiento geomecánico y discernir sus capacidades y cualidades para optar por su uso de un modo correcto y adecuado; de tal forma que releguemos aquel rancio concepto del miedo a los colores abigarrados de los suelos

triásicos que tapizan gran parte de nuestro relieve.

Este trabajo quiere venir a introducir una primera aproximación a su conocimiento; no obstante queremos iniciar el mismo apuntado que sería aventurado, cuando no arriesgado, definir y enmarcar unos suelos de transición que no se encuentren contrastados fehacientemente con un laborioso trabajo de muestreo y ensayo, considerado independientemente de los valores estadísticos obtenidos.

Este trabajo no pretende suplir los necesarios e inevitables seguimientos de control y desarrollo de los materiales usados en obra, si no más bien todo lo contrario, el implementar estos datos para englobarlos en un trabajo, cuando menos regional, que defina abanicos y tendencias geomecánicas de los mismo, tratando de eliminar a su mínimo exponente el parámetro de la casuística.

De este modo creemos oportuno, llegado este punto, el aportar los resultados obtenidos de un seguimiento de los mismos que se ha desarrollado a lo largo de los últimos 10 años del ***Corredor Triásico Andaluz*** y las conclusiones definidas a partir de los mismos.

En general, se realiza un primer intento sin parangón a lo largo del desarrollo histórico de la geotécnica nacional, consistente en relacionar las características geotécnicas de unos determinados suelos de una concreta edad geológica; asociando dicho periodo a unas particularidades ingenieriles determinadas dependientes de los condicionantes geológicos generales, al menos dentro de un entono regional como es Andalucía.

La primera aproximación que se realiza en este texto pretende relacionar la capacidad de carga de los materiales comparando los ensayos in situ realizados en perforaciones mediante

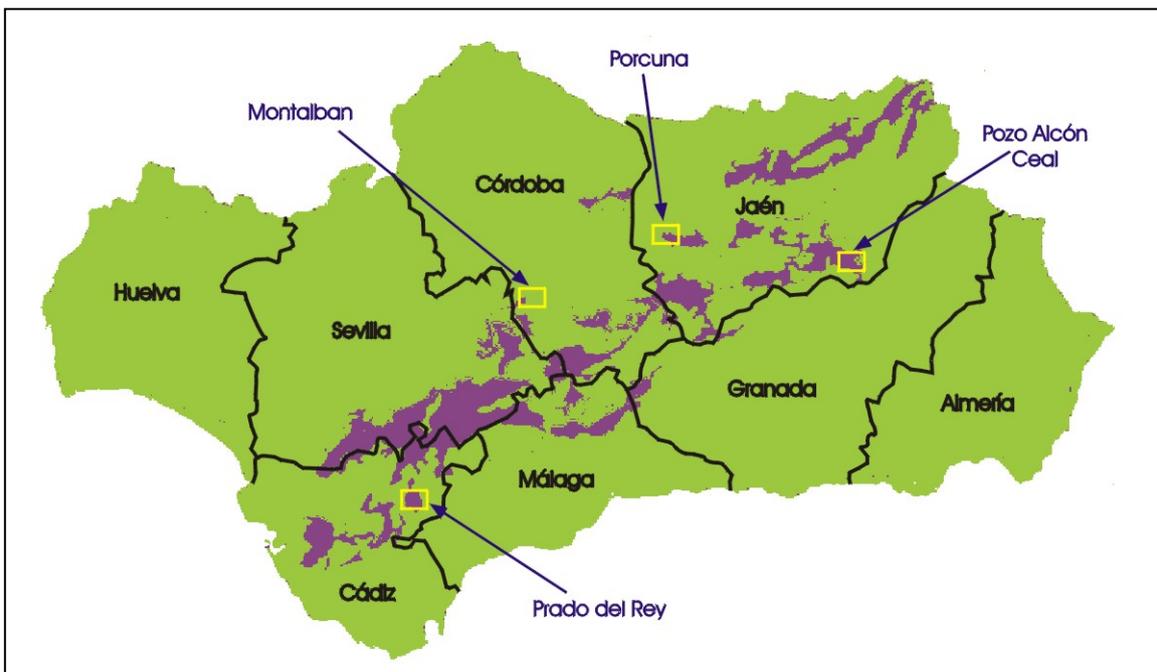


Fig.1 : Localización geológica del Triásico de las *Zonas Externas* andaluzas

S.P.T. (Standard Penetration Test) y el C.B.R. (Californian Bearing Ratio), considerando este último como un ensayo propio de obra a suelos, para su posterior compactación.

La aplicación de las conclusiones que se aportan y su más que probable amplitud a zonas más extensas solo podrá ser confirmada a lo largo del tiempo.

No pretendemos, con lo referido anteriormente, hacer una disquisición de tipo geológico sino aprovechar su conocimiento, haciendo un uso casi subversivo de sus datos, para llegar a conocer algo mejor la muestra de mano dentro del entorno de la ingeniería geotécnica.

Es lógico suponer que cualquier aproximación a la aquí planteada debe de iniciarse con la definición del entorno geológico, que pretendemos desarrollar a continuación y que enmarcará su ubicación, distribución y formación.

II.- MARGO GEOLÓGICO

Como se comento anteriormente los materiales triásicos tapizan aproximadamente 1/4 del total de la superficie andaluza, distribuyéndose sensiblemente en un corredor de dirección N35°W.

En general los suelos estudiados, de edad triásica, pertenecientes a las *Zonas Externas*, han sido los de facies Keuper formados por margas abigarradas con abundantes yesos. Las litofacies del Trías son propias del tipo "germano-andaluz"; gran desarrollo de arcillas, margas y evaporitas, y mucho menor de calizas y dolomías. Estas últimas se presentan en paquetes y bloques discontinuos, debido a la fragmentación de sus estratos entre la masa de materiales incompetentes.

En detalle, la estructura es muy complicada, por efecto de la dislaceración de los estratos incompetentes.

Como es habitual, en el triás de la zona, se encuentran numerosos asomos de rocas ofíticas.

III.- AMBITO DE ESTUDIO Y MUESTREO. RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO.

El ámbito de estudio está representado en cuatro afloramientos que engloban la alineación longitudinal del corredor triásico andaluz y definido en las siguientes poblaciones: Pozo Alcón – Ceal y Porcuna, en la provincia de Jaén, Montalbán en Córdoba y Prado del Rey en Cádiz (Fig.1).

Los suelos estudiados responden a un material eminentemente margoso, ocasionalmente con abundancia de yesos y carbonatos.

Como término medio las series comienzan en sus niveles más superficiales con un paquete de arcillas de tonalidades marrones, con cantos de margocalizas y de yesos, estos últimos en poca proporción. Bajo éste, se suelen detectar unas arcillas margosas de tonos verdosos, con cantos de naturaleza margocaliza y en menor proporción de yesos. Infrayacente a este conjunto pueden volver a aparecer suelos con idénticas características a los descritos en las cotas más superficiales. Una propiedad común para todos los niveles diferenciados, es la práctica ausencia de materia orgánica.

La caracterización geotécnica de los diferentes materiales reconocidos hace referencia a un total de 138 muestras distribuidas según la siguiente tabla:

Jaén		Córdoba	Cádiz
Pozo Alcón	Porcuna	Montalban	Prado del Rey
96	11	20	11

Tabla.1

En la mayoría de los casos estudiados los ensayos de S.P.T. se han desarrollado en terraplenes (Pozo Alcón, Porcuna y Prado del Rey), mientras que los ejecutados en Montalbán (Córdoba) se han ejecutado en terrenos naturales. Esta distinción entre datos nos debe definir la diferencia de comportamiento entre los suelos triásicos "in situ" y remoldeados, considerando estos últimos como los correspondientes a los terraplenes.

En el caso de Pozo Alcón (Jaén) y dado los trabajos que se están desarrollando para el Proyecto de Acondicionamiento con variante de la carretera C-323 de Huesa a Pozo Alcón, se ha ejecutado un terraplén definido como de "prueba". Se ha procurado hacer coincidir la construcción y desarrollo de este terraplén con unas condiciones atmosféricas constantes y estacionarias. La compactación de los materiales ha sido realizada, tanto en el total de la obra como en el terraplén de prueba, con maquinaria de alto rendimiento de modelos BOMAG de 19.000 kg de operación, un peso de 20.700 kg y una potencia de 197 Cv. El uso de esta maquinaria ha permitido obtener en la mayoría de los casos compactaciones superiores al 100 % del Proctor, generalizando una compactación económica. Esta situación ha permitido desarrollar terraplenes de alturas importantes con materiales relativamente marginales, de funcionamiento correcto y asientos totalmente asumibles.

Sobre éste se ha realizado un sondeo mecánico rotativo, ubicado sensiblemente en el eje del mismo, que desarrolla en este punto una altura de

10 m. Se ha reconocido y testeado todo el cuerpo del terraplén hasta detectar el suelo natural sobre el que se apoya.

Los valores obtenidos tanto de los ensayos de S.P.T. como de extracción de inalteradas deben permitir una correlación con los resultados tomados de los ensayos C.B.R. Esta correlación deberá permitir, al menos a priori, la determinación de la compacidad de cualquier parte del terraplén a partir de los índices C.B.R. obtenidos. En el caso del terraplén de prueba, definido anteriormente, la obtención de datos debe ser extremadamente clarificadora dado que el mismo se ha construido con suelos formados por arcillas y arcillas margosas donde se pueden diferenciar niveles con unas características determinadas o incluso repetitivas de un mismo material, formando una estructura en "sándwich".

Parecido tratamiento se ha desarrollado en los otros sectores referidos, donde la obtención de muestras inalteradas y los ensayos S.P.T. deberán permitir, a priori, su correlación con los ensayos de C.B.R. Esta correspondencia deberá admitir la determinación de la compacidad de cualquier sector de un terraplén a partir de los índices C.B.R. obtenidos.

Debe hacerse notar que en todos los casos los materiales de terraplenado que se consideran, se encuentran formados por los terrenos triásicos de las facies "Keuper", que se caracterizan por haberse formado en cuencas marinas con sucesivos movimientos tectónicos y sedimentarios.

El sistema de trabajo para el caso de Montalbán, en Córdoba, ha variado sensiblemente al definido anteriormente, debido a que los sondeos se han ejecutado en terrenos "in situ" o préstamo, y la obtención de muestras se pueden considerar como

inalterada, entendiéndose esta inalteración como referida a sus condicionantes geológicos de deposición y estructura, es decir exentas del remoldeo que producen los trabajos de terraplenado.

En definitiva se puede aceptar el siguiente esquema de actuación:

Ubicación	Material ensayado
Pozo Alcón (Jaén)	Remoldeado (Terraplén)
Porcuna (Jaén)	Remoldeado (Terraplén)
Montalban (Córdoba)	In situ (Préstamo)
Prado del Rey (Cádiz)	Remoldado (Terraplén)

Tabla.2

IV.- CRITERIOS DE TRABAJO

El *ensayo de penetración estándar* (S.P.T.) constituye el penetrometro dinámico abierto de uso más extendido. Se asemeja a un tomamuestras de tubo bipartido, pero de diámetro inferior. La resistencia del suelo a la penetración se mide por el número de golpes, N, necesarios para hincar el SPT 30 cm.

La maza que produce el golpeo pesa 63.6 kg, cayendo desde una altura de 76.2 cm. Se comienza a golpear hasta que se ha introducido 15 cm. A partir de este momento se comienzan a contar los golpes cada 15 cm hasta que se han introducido los 30 cm restantes. Se necesita dar más de 100 golpes para considerar rechazo y se suspende la prueba.

La correlación, más clásica, entre $N(spt)$ y N_i (inalterada) y la que se ha utilizado en este trabajo es la siguiente:

$N > 25$	$N_i = N / 2$
$N > 15$ y $N < 25$	$N_i = N / 1.5$
$N < 15$	$N_i = N$

Tabla.3

Se pretende hacer una correlación del siguiente tipo:

C.B.R.	\Rightarrow	Correlación	\Rightarrow	N Terraplén (Remoldeado)
				N Prestamo (In situ)

Tabla.4

En definitiva se pretende obtener la correlación que relacionaría el ensayo S.P.T. y el C.B.R., o lo que es lo mismo, el tratar de atisbar la reciprocidad existente entre un suelo en su estado inalterado o "in situ" y su estado remoldeado.

V.- LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Ha sido de gran importancia el poseer los datos de los ensayos Proctor y Índice C.B.R. a la hora de poder relacionar los valores de N con estos últimos, tratando de obtener una relación clara, y previsiblemente definitiva, al menos entre ambos parámetros.

En todos los casos se ha considerado el Índice C.B.R. al 100% del Proctor Normal.

Se nos ha facilitado los datos de cada una de las tongadas realizadas, referente a los valores de densidad Proctor, humedad óptima e índice C.B.R.

La primera limitación que puede alertarnos en este tipo de trabajo pasa por discernir el efecto del "Factor de Profundidad" o incremento de la compacidad de los materiales, con relación a la profundidad, por el aumento de la carga vertical que soporta, en el caso de terraplenes.

De la comparación entre los valores de N con respecto a la profundidad, en cada uno de los sondeos ejecutados, se desprende que no existen incrementos de carga importantes que

pueda influir en la modificación del estado de la compacidad; localizándose máximos y mínimos determinativos según una estructura de tipo sándwich.

Los datos observados indican claramente que la variabilidad de los valores de N vienen a estar condicionada por el tipo de material utilizado, en la tongada, y el grado de compactación de la misma.

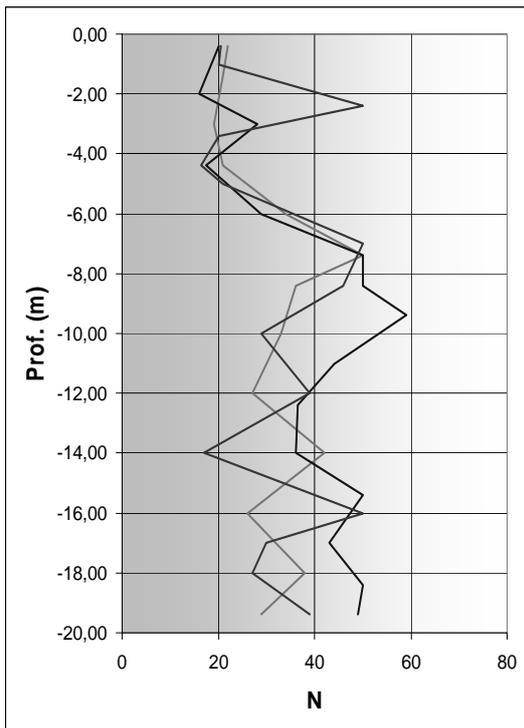


Fig.2.- Representación de N frente a la profundidad de tres de los sondeos realizados. No se detecta el factor de profundidad y sí una clara estructura en sándwich a favor de las diferentes tongadas de extendido.

VI.- CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN EL SISTEMA UNIFICADO

Este sistema de clasificación es una consecuencia del Sistema de Clasificación para Aeropistas desarrollado por Casagrande, como un método rápido para identificar y agrupar los suelos.

De forma genérica, los suelos estudiados responden a materiales eminentemente arcillosos,

ocasionalmente ricos en yesos y margocalizas. Obviamente esta aseveración debe considerarse con las oportunas reservas, dado que han sido detectados niveles ricos en cantos que definen unas arenas e incluso gravas, así como sectores ricos en limos.

La mayoría de las muestras ensayadas se clasifican como:

CL.- Arcillas inorgánicas de baja plasticidad.

CH.- Arcillas inorgánicas de alta plasticidad.

VII.- LÍMITES DE ATTERBERG

Los ensayos de Límites de Atterberg se han desarrollado según las normas NLT 105 y 106.

Los suelos estudiados presentan límites líquidos que oscilan mayoritariamente entre 24% y 60% y los índices de plasticidad entre 9% y 40% (Figura 3).

Inicialmente, es difícil definir los suelos ensayados en cuanto a su plasticidad dado que no se agrupan de un modo claro, pudiendo comentarse solo y exclusivamente que presentan una plasticidad que podríamos definir como media.

VIII.- RESISTENCIA AL CORTE SIN DRENAJE E ÍNDICE DE FLUIDEZ. HUMEDAD ÓPTIMA

Según todas las correlaciones efectuadas por los diferentes autores existe una clara relación entre la resistencia al corte sin drenaje de los suelos arcillosos amasados y el índice de fluidez.

Los valores obtenidos, para el índice de fluidez oscilan entre 0.4% y -4%, aunque la media se sitúa en -0.28%

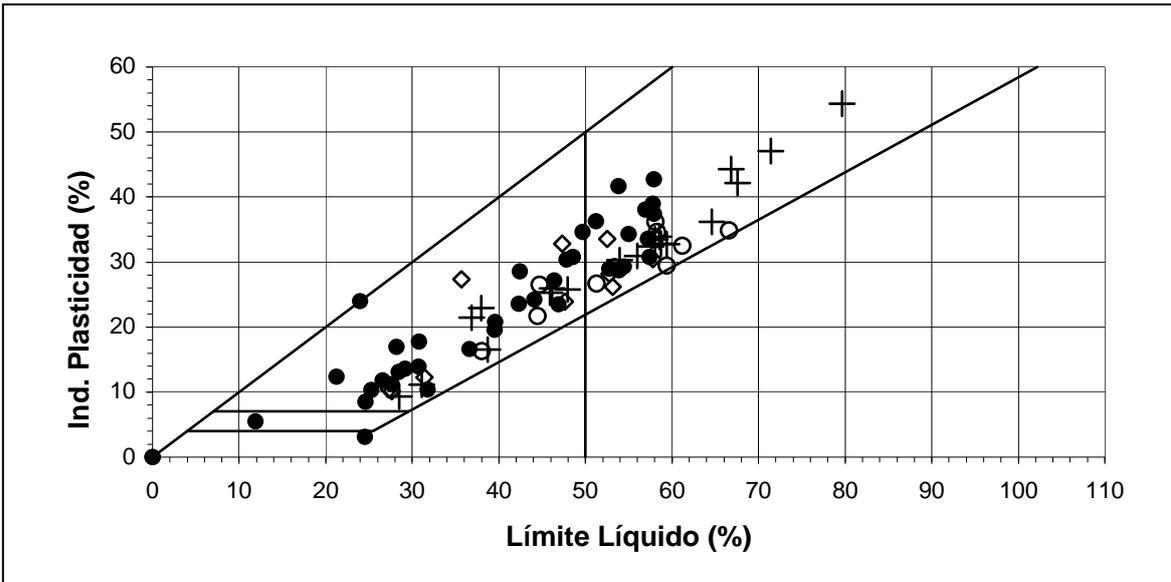


Fig.3: Esquema de plasticidad de Casagrande

claramente indicativo del estado desecado (Figura 4).

Este hecho parece lógico, si considerados que una vez realizados los correspondientes estudios comparativos se ha podido comprobar que la gran mayoría de las muestras ensayadas se localizan, ligeramente, en la rama seca del ensayo Proctor Normal.

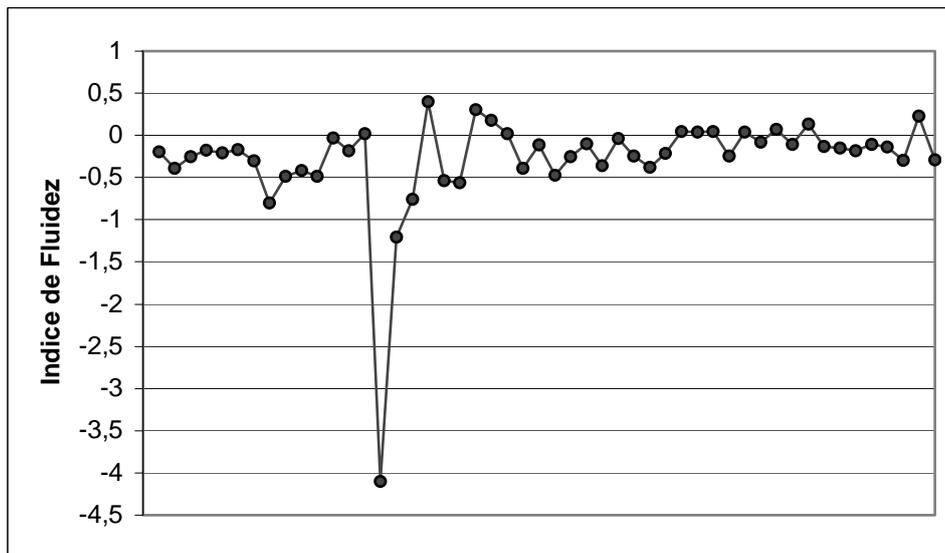


Fig.4: Variación del Índice de Fluidez

Esta afirmación parece estar en contraposición a la costumbre común, como aconsejan muchos autores, de situar la compactación del lado de la rama húmeda del ensayo Proctor.

No obstante, este hecho parece lógico si consideramos la peligrosidad que existe, durante el proceso de compactación, de alcanzar la rama húmeda en este ensayo y la caída brusca de la densidad en estas condiciones.

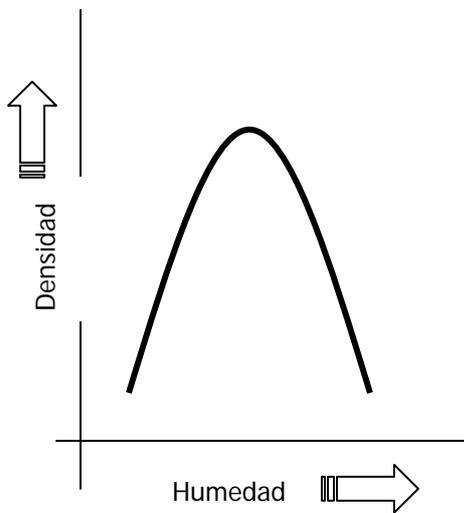


Fig.5: Esquema típico del Ensayo Proctor Normal, donde se define la importante pendiente tanto de la rama seca como de la húmeda.

Esta circunstancia no es una decisión técnica, sino avalada por la experiencia, sobre estos materiales y sus niveles de compactación, de los propios encargados de obra a la hora del riego en el extendido de las tongadas.

La relación obtenida a partir del índice de fluidez (IL)¹ y la resistencia al corte sin drenaje, según la consideración de suelos amasados (Figura 6), se adapta bastante bien a las correlaciones aportadas por Salas y Alpañez, 1975,

¹ IL = (w-LP) / IP

para valores de IL variables entre 1 y -1.

IX.- RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE FLUIDEZ Y N (SPT)

Siguiendo con los criterios de Salas y Alpañez que relaciona la resistencia al corte sin drenaje con el índice de fluidez, se ha pretendido correlacionar este último término con el golpeo obtenido mediante el ensayo S.P.T. dado que éste a de representar una medida directa de la resistencia al corte sin drenaje, en suelos remoldeados como son los terraplenes ensayados.

Con todos los datos, que obran en nuestro poder, se ha podido comprobar la existencia de una relación exponencial que enlaza el valor corregido de N dependiente del índice de fluidez y el índice de plasticidad.

Esta relación queda expresada como sigue:

$$N = 111 e^{-0.054 \times [(IL \times IP) + 2LP]} \quad (\text{Exp.1})$$

Siendo IL el índice de fluidez, IP el índice de plasticidad y LP el límite plástico.

Igualmente se cumple la relación si consideramos la humedad (w) y el límite plástico (LP):

$$N = 111 e^{-0.054 \times (W + LP)} \quad (\text{Exp.2})$$

Aplicando estos criterios sobre un total de 43 muestras a las cuales se les ha obtenido tanto el límite líquido, el límite plásticos, el índice de plasticidad, la humedad y el valor de N, se han obtenido los resultados que indican una desviación media de 7.45 golpes (Figura 7).

La correlación (Figura 8) es lo suficientemente correcta para aceptar

que el valor de N es claramente dependiente del índice de fluidez, del índice de plasticidad y del límite plástico, dado que dicho N puede ser considerado como un ensayo de corte sin drenaje "in situ" para suelos

remoldeados, como ya apuntaron en su momento *Bjerrum - Simons (1960)* y *Jiménez Salas - Justo Alpañés (1975)* pero partiendo del ensayo de compresión simple.

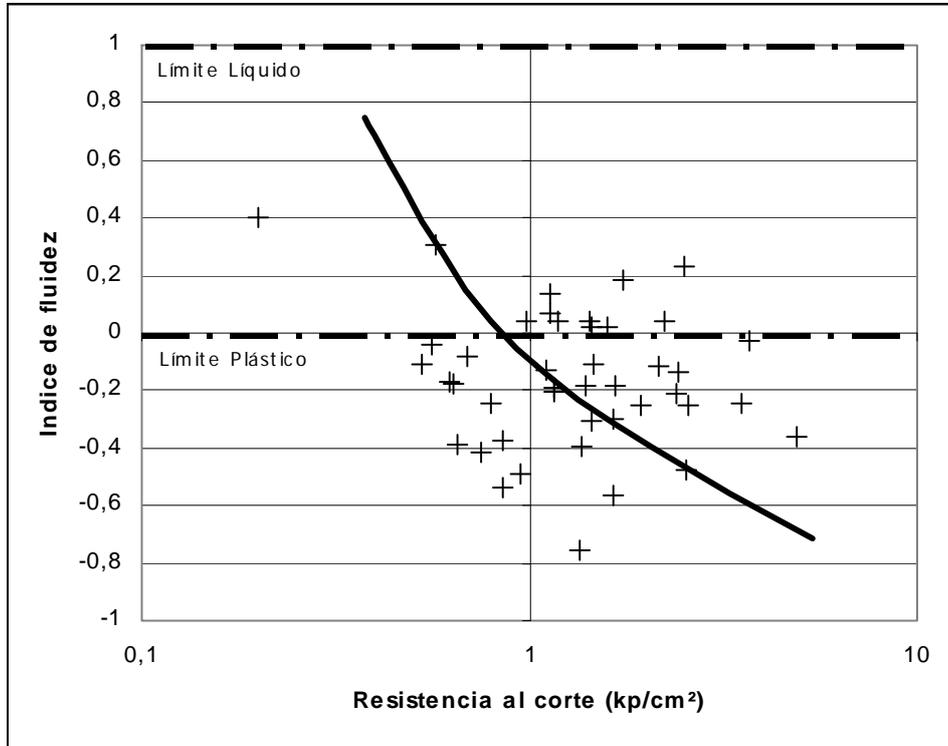


Fig.6: Relación entre la resistencia al corte sin drenaje y el índice de fluidez.

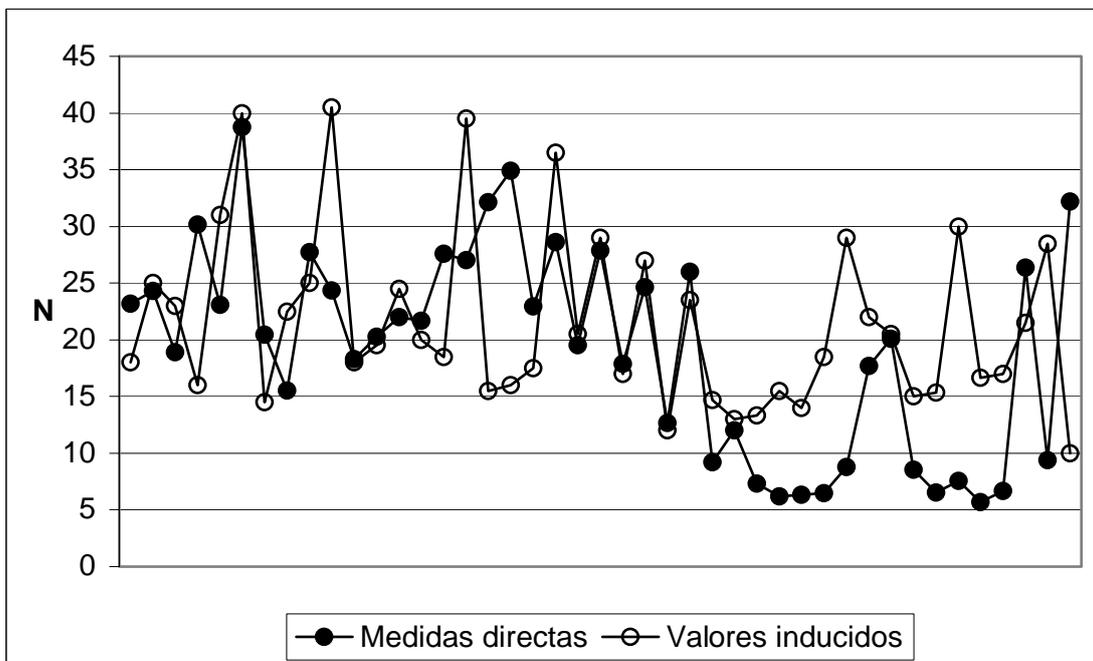


Fig.7: Relación entre los valores de N obtenidos en ensayos de campo y los valores alcanzados mediante la correlación entre el índice de fluidez y el índice de plasticidad. No se han considerado los valores obtenidos de rechazo.

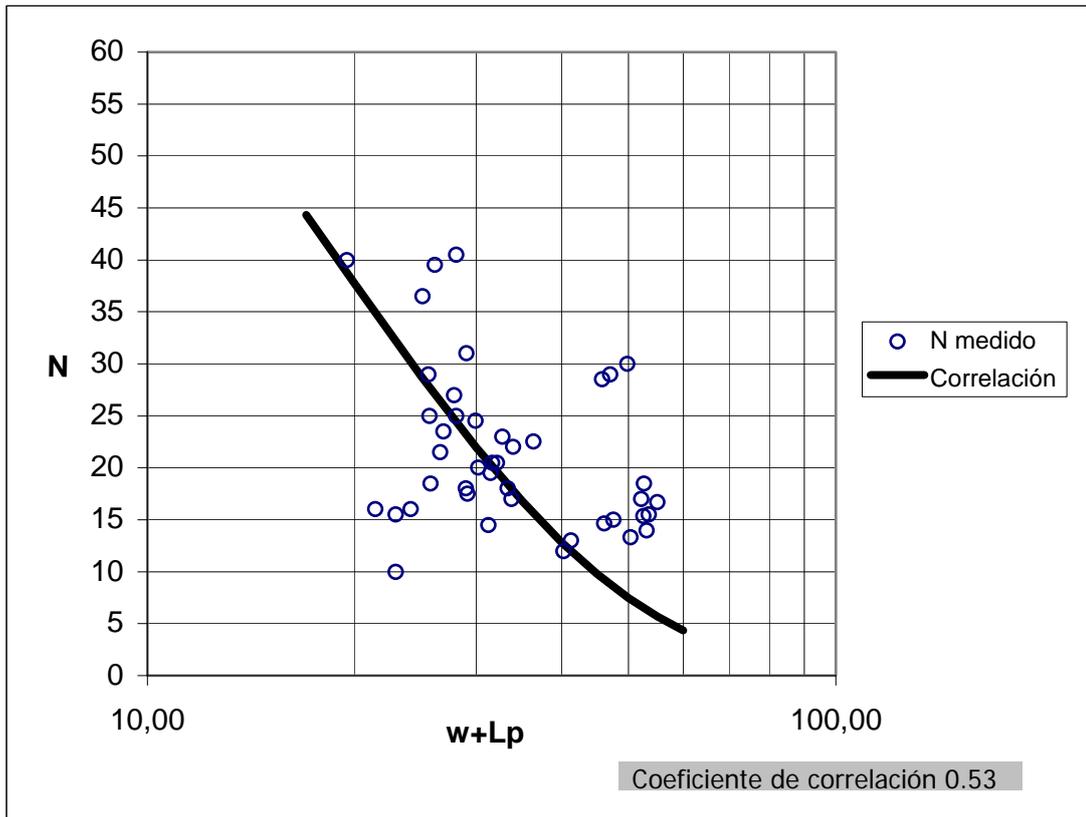


Fig.8: Relación entre los valores de N medidos en campo y la correlación propuesta para los suelos triásicos dependientes de la humedad y el límite plástico.

La consideración del ensayo de SPT o de extracción de inalterada, para obtener el valor de N, como una resistencia al corte sin drenaje, queda justificada entendiendo que el mismo se realiza en un tiempo lo suficientemente breve con relación a la permeabilidad del suelo, como para que las presiones intersticiales originadas no se hayan disipado. Lógicamente esta consideración tiene sentido sólo en materiales arcillosos.

En arcillas saturadas, cuando se ven sometidas a una sollicitación rápida, la tensión aplicada es soportada parcialmente por el esqueleto del suelo y el resto por el agua de los poros. Si se aumenta la presión de confinamiento, el diámetro de los círculos de Mohr que la representa no se incrementaría, dado que la presión intersticial soportaría todo el incremento de carga.

Por consiguiente, la resistencia al corte sin drenaje es independiente del aumento de la presión normal y, por lo tanto, el ángulo de rozamiento interno es nulo.

Hunt (1984) apunto la relación existente entre la resistencia a compresión simple (q_u) y N apoyándose en numerosos ensayos y en los trabajos de *Sowers, Terzaghi y Peck, y Navfac (1971)*, cuyos reflexiones confirman el criterio de considerar los ensayos penetrométricos como medidas directas de la resistencia al corte sin drenaje para suelos arcillosos remoldeados y, por consiguiente, como se ha demostrado dependientes directamente del índice de fluidez y la plasticidad.

Con lo expuesto hasta el momento se puede comprobar que el estado de compacidad de un suelo remoldeado o

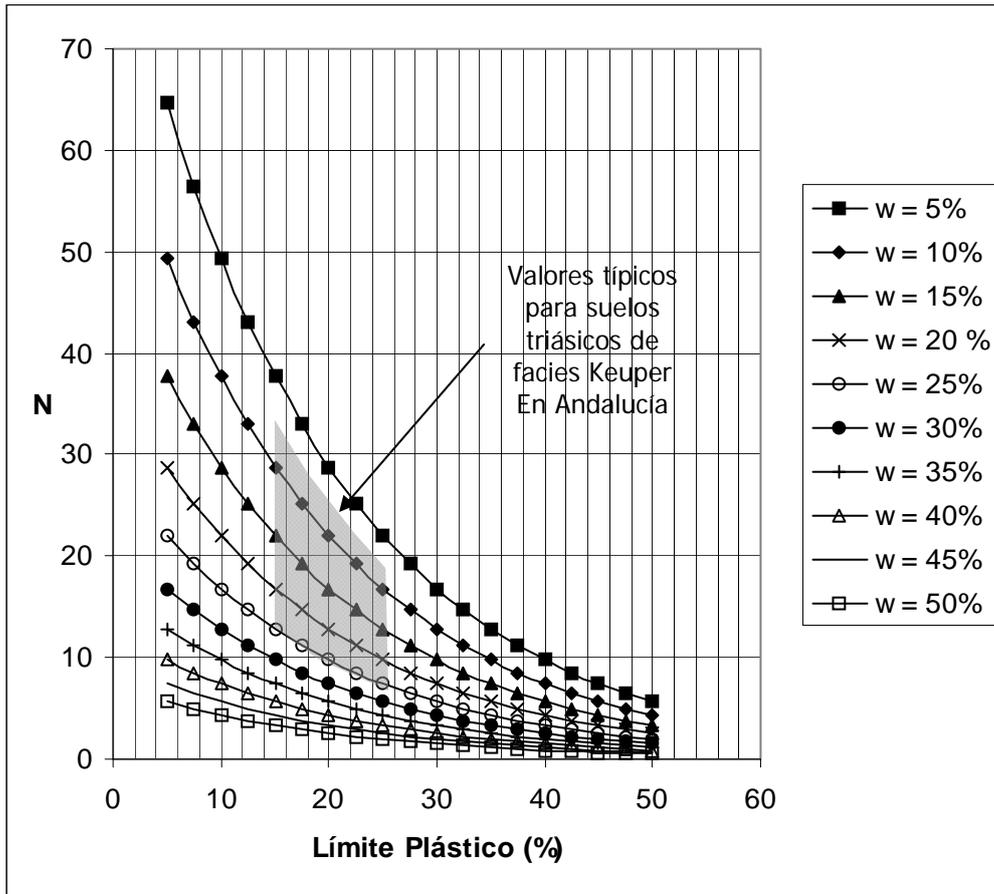


Fig.9

amasado está directamente relacionado con su resistencia al corte sin drenaje, la cual depende claramente de la humedad que presenta y el valor de humedad en el cual se produce el paso de un estado sólido o semisólido a un estado plástico.

En la figura 9 se ha representado el ábaco de valores estimados según la relación propuesta, donde se relacionan los valores de N y el límite plástico, fijados los rangos de humedad. Se ha comprobado que el 80% de las muestras consideradas del corredor estudiado presenta un rango de límite plástico oscilante entre el 15 y 25%. Por lo que respecta a la humedad, el rango presentado varía entre el 8 y el 25% para la gran mayoría de los ensayos realizados. Con estos valores se puede afirmar que los suelos triásicos de facies Keuper

remoldeados, como será el caso de terraplenes construidos con ellos, pueden presentar valores de N que oscilan entre 8 y 35, de un modo casi independiente de la humedad considerada; no son de esperar, como media, valores de compactación elevados, $N < 35$; en general no se localizarán consistencias blandas, muy blandas, o medias, $N > 8$.

Según los criterios de *Hunt, 1984*, los materiales definidos deben de responder al siguiente esquema:

N	Consistencia	Identificación
Entre 8 y 35	Rígida a muy rígida	Se marca con el pulgar o la uña

N	γ_{sat} (gr/cm ³)	q_u (kg/cm ²)
Entre 8 y 35	1.76 – 2.24	1.0 – 4.0

Tabla.5

Los valores obtenidos en cuanto a N y las correlaciones de *Hunt*, se cumplen de un modo bastante aceptable (Figura 10 y 11).

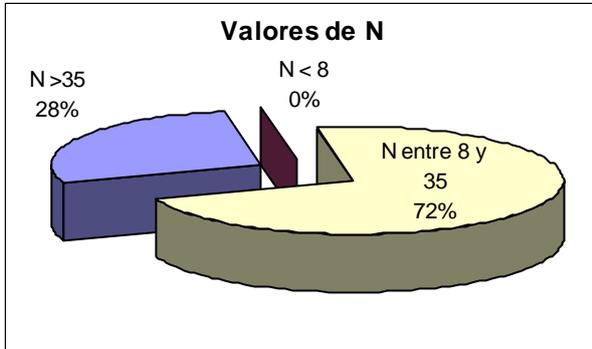


Fig.10: Porcentaje de valores de N obtenidos. No se han considerado aquellas muestras cuyo paso por el tamiz N°200 sea inferior al 60%.

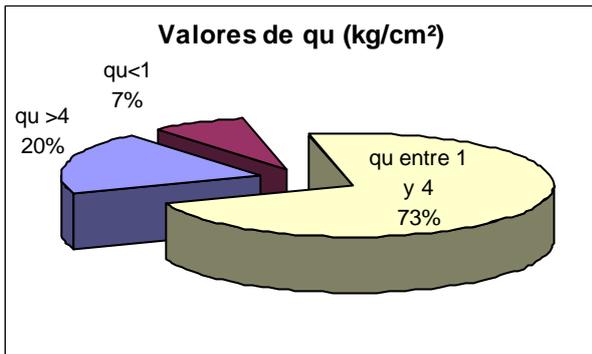


Fig.11: Porcentaje de valores de q_u obtenidos.

Las muestras referidas corresponden con las netamente arcillosas, siendo por ende las más propensas a la reducción de la compacidad con respecto a un incremento de humedad.

La relación conseguida se adapta muy bien a los parámetros obtenidos, debiéndose tener en cuenta la "susceptibilidad" de los materiales implicados con respecto a los incrementos de humedad. Diferente lectura habrán de tener aquellos otros suelos donde gran parte de su fracción tiene tamaño arena o tamaño grava, siendo poco o medianamente susceptibles a los cambios de humedad,

y sólo inducida por su componente arcillosa.

X.- RELACIÓN $N_{(SPT)}$ Y EL ÍNDICE C.B.R.

Por lo que respecta a los valores del terraplén, tomados en obra, se nos ha facilitado los datos de cada una de las tongadas realizadas: valores de densidad Proctor, humedad óptima e índice C.B.R., de cada uno de los extendidos.

Los ensayos de C.B.R. y Proctor Normal, están ejecutados a muestras pertenecientes a préstamos mientras que el resto se refieren a ensayos sobre los propios terraplenes, construidos con esos suelos de préstamo, siempre referido a materiales triásicos.

Los índices de C.B.R. están referidos al 100% del Proctor Normal.

No existe en la bibliografía consultada una correlación clara entre el valor de $N_{(SPT)}$ y el índice C.B.R. en materiales cohesivos. La única referencia se ha encontrado en la *Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, O.C. 1/99 Dirección General de Carreteras. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

En este documento, se relaciona el índice C.B.R. referido al 95% según sea del Proctor Normal o Modificado con el ensayo S.P.T. en condiciones meteorológicas muy concretas. A pesar de que no se hace referencia, se entiende que los ensayos de S.P.T. se refieren a trabajos ejecutados en los préstamos de los materiales. La correlación C.B.R. – S.P.T. que se aporta es la siguiente:

CBR	N _{SPT}	
	Material granular	Material cohesivo
0.2	< 5	< 2
2	10	5
3	12	7
5	15	10
10	20	15
20	25	17
30	30	20

Tabla.6

Dada nuestra situación, los suelos estudiados deben de corresponder con materiales de transición, con una clara componente cohesiva.

En la figura 12 se ha representado la relación obtenida entre el CBR-N (SPT) para los materiales estudiados. Se han aceptado aquellas muestras que cumplan alguna de estas dos condiciones, de un modo no excluyente, al objeto de asegurar que las muestras corresponden a los materiales triásicos definidos:

- o Paso Tamiz N°200 > 60 %
- o 40 % < Límite Líquido < 60%

Igualmente se han desechado los ensayos S.P.T. que denotan valores de rechazo y aquellos que no corresponden con los materiales definidos (se ha comprobado que en la mayoría de la muestras ensayadas los valores de índice CBR superior a 8 no corresponden con los materiales triásicos en estudio).

Los valores estadísticos obtenidos de la estadística de la regresión efectuada es la siguiente:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,57
Coeficiente de determinación R ²	0,32
R ² ajustado	0,31
Error típico	0,997

Tabla.7

La ecuación obtenida, considerando la relación entre el índice C.B.R. y el valor de N es:

$$\text{Ind. C.B.R.} = 0.0739 N (\text{S.P.T.}) + 2.386$$

(Exp.3)

La correlación obtenida se puede definir según la siguiente tabla:

CBR	N _{SPT}
< 3	7
3	8
4	22
5	35
6	49
7	> 60

Tabla.8

Dada nuestra situación, los suelos estudiados deben de corresponder con materiales de transición, con una clara componente cohesiva.

La primera conclusión que se puede extraer de esta correlación es que los materiales ensayados no se ajustan a la relación aportada por la *Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía*, al menos en el margen de valores representados, estando claramente infravalorados los valores de N facilitados, a índices CBR constantes, con la realidad, aun considerando que en esta última los índices establecidos están referidos al 95% del Proctor.

Esta correlación que a priori podría parecer desorbitada para unos materiales cohesivos debe estudiarse a la luz de la altísima componente margosa de las arcillas y la fase yesífera que presenta. Esta fase genera unos golpes para índices de compactación elevados totalmente inusuales en materiales puramente cohesivos, pudiendo verse incrementados en fases secas, generando de este modo compacidades muy elevadas.

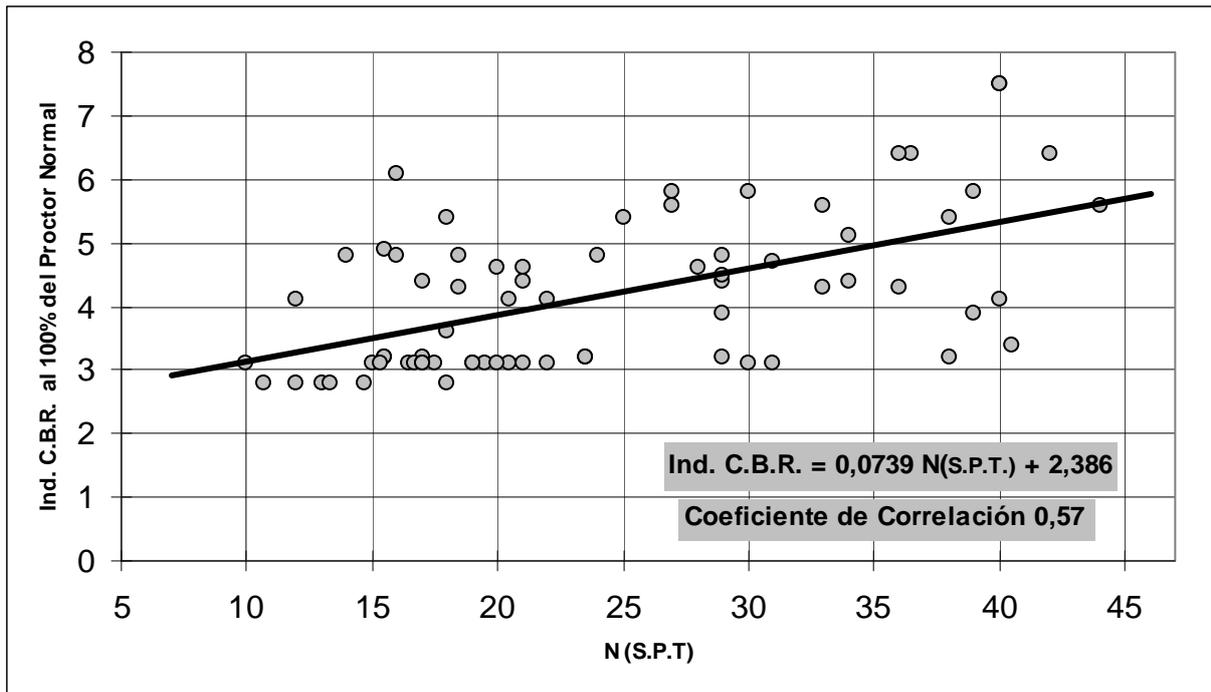


Fig. 12: Relación entre N_{SPT} y el índice C.B.R. considerado el 100% del Proctor Normal.

No debemos de acusar a probables fenómenos de saturación de los materiales implicados la diferencia o dispersión entre los valores de N de campo y los N facilitados por la instrucción, dado que de producirse esta situación debe quedar reflejado en el propio ensayo S.P.T. o de extracción de inalterada.

La siguiente apreciación que se deduce de estos datos es la tendencias sensiblemente lineal de distribuciones de N , al menos para el rango de valores entre 2 y 6 de índice CBR, lo cual no implica que en extensiones mayores presente una tendencia polinómica, como es lógico suponer.

XI.- CONCLUSIONES

El factor clave para conocer el comportamiento geotécnico de un determinado tipo de suelo radica en la necesidad de un elevado número de medidas basadas en los ensayos que se estimen necesarios. Combinando adecuadamente los resultados obtenidos se obtiene una herramienta de trabajo de vital importancia.

La aplicación de este sistema, en el caso de los suelos de edad triásica en el suelo andaluz, nos permite definir las constantes geotécnicas de estos materiales, para su conocimiento y aplicación.

Estas conclusiones son, por tanto, únicamente aplicables a la citada formación, cosa que a nuestro entender ya presenta suficiente interés, puesto que en la misma formación se van a acometer a corto plazo obras lineales importantes.

En general las características clasificatorias de índole geotécnica de los suelos estudiados hace referencia al siguiente esquema:

Parámetro	Oscilación
Clasificación de suelos (S.U.)	CL y CH
Límite Líquido (%)	24 a 60
Ind.Plasticidad (%)	9 a 40
Ind. Fluidez (%)	-4 - 0.4

Tabla.9

La mayoría de los valores obtenidos en los ensayos están referidos a muestras de terraplenes.

Se ha comprobado que el valor de N_{SPT} es claramente dependiente del índice de fluidez, el índice de plasticidad y el límite plástico, dado que dicho N puede ser considerado como un ensayo de corte sin drenaje "in situ" para suelos remoldeados, mediante las expresiones:

$$N = 111 e^{-0.054 \times [(IL \times IP) + 2LP]} \quad (\text{Exp.1})$$

$$N = 111 e^{-0.054 \times (W + LP)} \quad (\text{Exp.2})$$

La correlación obtenida es lo suficientemente correcta para aceptar que el valor de N es dependiente de las constantes definidas, dado que dicho N puede ser considerado como un ensayo de corte sin drenaje "in situ" para suelos remoldeados (*Bjerrum - Simons (1960)* y *Jiménez Salas - Justo Alpañés (1975)*).

Se presenta tentativamente la correlación que permite pasar del índice C.B.R. considerado al 100% del Proctor Normal al N_{SPT} en el caso de terraplenes.

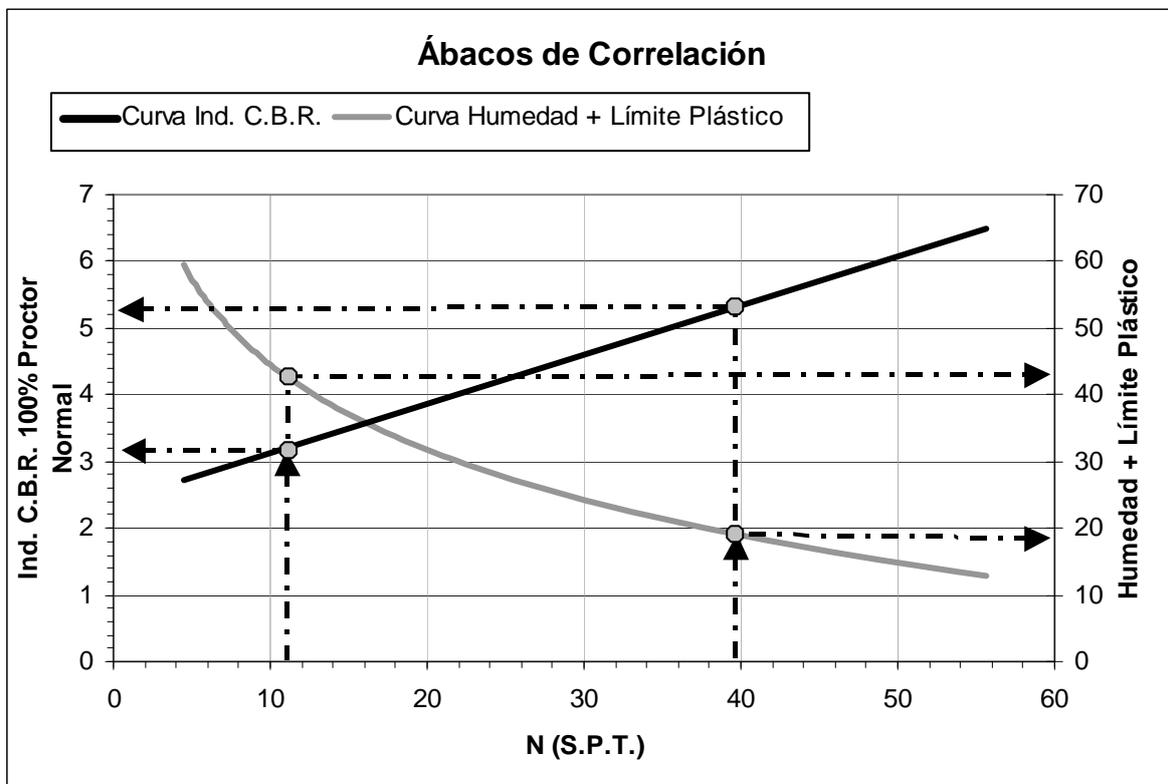


Fig.13: Gráfico de triple entrada que permite relacionar, para los materiales Estudiados, el valor de N con el índice C.B.R. y la adición entre la humedad y el límite plástico.

La correlación obtenida se puede definir según la siguiente tabla:

CBR	N _{SPT}
< 3	7
3	8
4	22
5	35
6	49
7	> 60

Tabla.10

Como primera consideración se puede establecer que la relación obtenida no se ajusta a las referidas en la bibliografía existente.

En la Tabla 9 se presenta la correlación que permite pasar de un índice C.B.R. al valor de N, para este tipo de suelo. Esta metodología podría ser aplicada a otros casos si bien más investigaciones serían necesarias para generalizar estos resultados.

Lógicamente, una mayor población de datos redundaría en una mayor bondad de las medidas.

Finalmente se ha generado un gráfico de triple entrada, en la figura 13, donde se han relacionado los dos parámetros estudiados con el valor de N S.P.T.

Este ábaco es de gran importancia; de tal modo que permite, conociendo alguno de los siguientes parámetros:

- N S.P.T.
- Índice C.B.R. (100% Proctor Normal)
- Humedad natural + Límite Plástico

cuantificar los valores restantes, con un grado de fiabilidad bastante elevado.

La primera aproximación que se obtiene de la representación efectuada es el lógico aumento del índice C.B.R. con la compacidad e inversamente, la

disminución de la suma de la humedad y el límite plástico.

En general para estos suelos triásicos, para los valores lógicos de N (entre 8 y 50), los índices C.B.R. oscilan entre: próximos a 3 y cercanos a 6.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Geotécnica del Sur S.A. su agilidad y disposición para facilitarnos los datos que se aportan en esta publicación, sin los cuales cualquier tipo de consideración habría estado sujeta a las leyes de la hipótesis.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM D-2573-72. (1978). **Standard Method for Field Vane Shear Strength in Cohesive Soil.**
- AYALA, F.J. (1991). **Manual de Ingeniería de taludes.** Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales.
- BAENA, J.M. FERNÁNDEZ, A. GONZALEZ, B. Y RUIZ, A. (1999). **Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, O.C. 1/99** Dirección General de Carreteras. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.
- BAGUELIN, F. Y JEZEQUEL, J. (1972). **Expansion de sondes cylindriques dans les sols coherents.** Bull.Lab.Ponts et Chaussées n°61.
- JIMÉNEZ SALAS J.A. Y DE JUSTO ALPAÑEZ, J.L. (1975). **Geotécnica y Cimientos.** Ed. Rueda. Madrid.
- MARCU, A. Y SOTOICA, R. (1998). **Particularities of geotechnical investigation in loessial soils.** Proc.First Int. Conf. On Site Charact. ISC'98, V.1. Atlanta, GA.
- PUPPALA, A.J., SEMIH, A., TUMAY, M.T. Y ACAR, Y.B. (1998). **Characterization of collapsible soils with combined geophysical and penetration testing.** Proc.First Int. Conf. On Site Charact. ISC'98, V.1. Atlanta, GA.
- SANGLERAT, (1967). **El penetrómetro y el reconocimiento de los suelos.**
- VIGEYVERGIYA V.N. Y GHAZZALY D.I. (1973). **Prediction of swelling potential for natural clays.** Proc., 3° international Conference on Expensive Soils, Haifa.