

PROCESO DE SATURACIÓN DE ENSAYOS TRIAXIALES

Saturation process in triaxial tests

Nelly Vieira Faria*

António Viana da Fonseca**

Cristiana Ferreira***

RESUMEN – En el ámbito del estudio del comportamiento de jabres graníticos de Oporto para su uso en explanadas de pavimentos, fueron realizados ensayos triaxiales isotrópicamente consolidados y drenados en muestras compactadas. Parte importante de este proceso consiste en obtener la completa saturación de la muestra del suelo antes de la realización de los ensayos, ya que los mismos deben ser ejecutados de forma a simular las condiciones más adversas en que el pavimento se situará durante su vida útil, o sea, con la total saturación del terraplén. A esto debe sumarse el importante hecho de querer asegurar que el análisis de las tensiones se realice garantizando un total control de las dos componentes: neutra y efectiva, y que la primera no esté condicionada por valores no cuantificables de succión. Como consecuencia de este estudio, durante la realización de este trabajo y porque no está clara, en la basta bibliografía (y normativa) internacional consultada, la forma mejor de asegurar una real saturación, se utilizaron varios procesos para la saturación de las muestras con el propósito de encontrar el más adecuado para este caso en particular. Seguidamente, se describe con detalle este asunto.

SYNOPSIS – Within the scope of study of the behaviour of granite residual soils of Porto for their use as capping layer for pavements, triaxial tests under drained isotropic consolidation were carried out over compacted samples. An important part of this process consisted of obtaining the complete saturation of the soil sample, prior to the loading test stages, in order to simulate the most adverse conditions to which the pavement will be subjected to in operation, that is, with the full saturation of the embankment. Another important fact must be added, which is the need to ensure that the stress analysis is made with guaranteed full control of the two components: pore pressure and effective stress, and that the former is not actually affected by unaccountable suction values. As a result of this study, during the course of this work and because of the vagueness in the vast international literature (inclusive in testing standards) on this issue of effectively ensuring full saturation, several sample saturation processes were used in order to find the most suitable method for this particular case. In what follows, these subjects are described in detail.

1 – INTRODUÇÃO

La realización de ensayos triaxiales en corte drenado o no drenado, sin el recurso específico de equipos de medición o control de succión, sólo garantiza los registros correctos de tensiones efectivas si las muestras se encuentran garantizadamente saturadas. Los procesos de saturación de muestras para ensayos triaxiales no son nuevos; sin embargo, existen métodos más recientes de

* Aluna de Maestrado de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica de la Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; e-mail: nelly@fe.up.pt

** Doctor em Engenharia Civil, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; e-mail: viana@fe.up.pt

*** Doctoranda em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; e-mail: cristiana@fe.up.pt

acuerdo con el tipo de suelo y condiciones de ensayo. Comúnmente, el grado de saturación es controlado a través de la revisión del parámetro de presión de Skempton B, asumiendo la simplificación de la expresión general en condiciones de consolidación isotrópica:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \tag{1}$$

en que $\Delta \sigma$ es el incremento de presión isotrópica (kPa) y Δu el correspondiente incremento de la presión intersticial.

Cuando este valor es igual a 1, implica 100% de saturación de la muestra; sin embargo, en la práctica, dependiendo del tipo de suelo, el valor de B puede variar entre 0,92-0,99, significando una medida de total saturación. Durante este trabajo, además de realizar la medición del parámetro B, se utilizó conjuntamente la técnica de lectura de velocidad de ondas P (ondas sísmicas de compresión), con recurso a los bender/extender elements, durante los procesos de saturación. Estos dispositivos, descritos detalladamente en Viana da Fonseca y Ferreira (2002), que fueron desarrollados inicialmente en la Universidad de Bristol, están implementados con suceso en el LabGeo de la FEUP y permiten de forma práctica y simple, medir casi simultáneamente dos tipos de ondas: Transversales (de corte, ‘S’) y longitudinales (de compresión ‘P’). La Figura 1 muestra este sistema. En todos los casos se verificó (teniendo como referencia el trabajo de Ferreira, 2003) que, de acuerdo con las ondas P, la saturación era alcanzada mucho antes de alcanzar un valor próximo a $B = 0,95$.

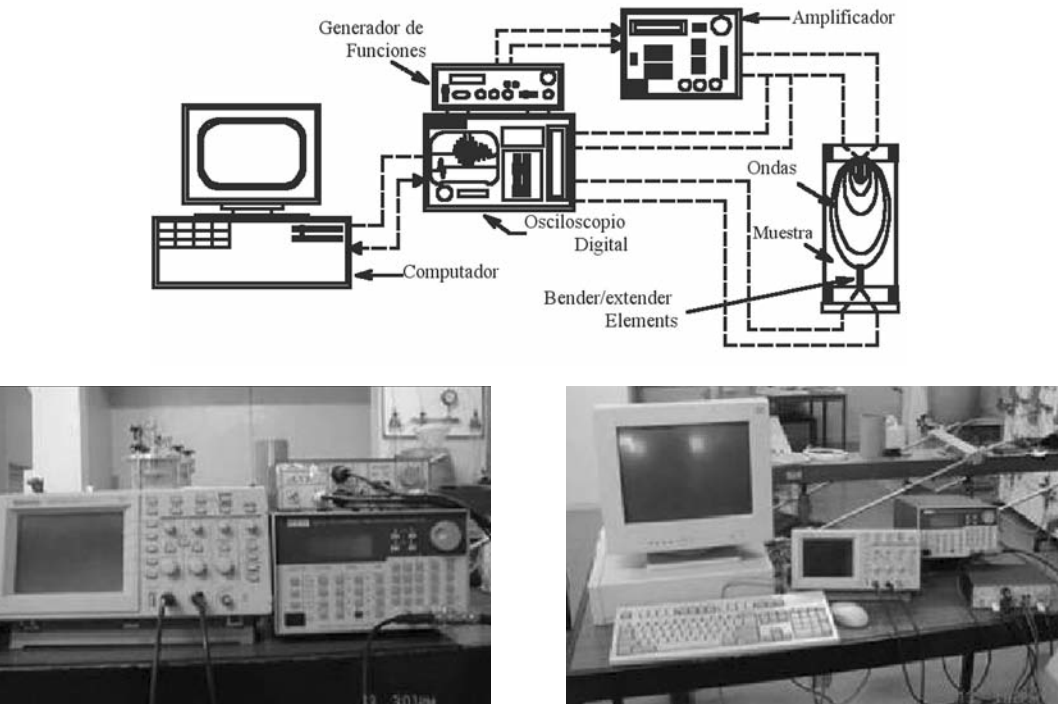


Fig. 1 – Esquema y fotografías del sistema de monitorización de ondas

Como explica Ferreira (2003), la relación teórica entre los valores de las velocidades de las ondas P y los parámetros de saturación fue deducida por Ishihara et al. (2001) y Yang (2002), teniendo como resultado la expresión siguiente:

$$V_p = \left[\frac{\frac{4G}{3} + \frac{K_b}{(1-B)}}{\rho} \right]^{1/2} \quad (2)$$

en que G es el módulo de rigidez transversal del suelo; B es el parámetro de presión intersticial de Skempton; ρ traduce densidad del suelo; y K_b representa el módulo de compresibilidad del esqueleto sólido del suelo, definido por:

$$K_b = \frac{2G \cdot (1+\nu)}{3(1-2\nu)} \quad (3)$$

en que ν es el coeficiente de Poisson (nuevamente, del esqueleto sólido del suelo).

Este parámetro, ν , no puede ser determinado directamente, por lo tanto, son estimados de forma fundamentada algunos de los valores.

Las curvas teóricas de la relación $V_p - B$ fueron determinadas para los valores del coeficiente de Poisson presentados en la Figura 2.

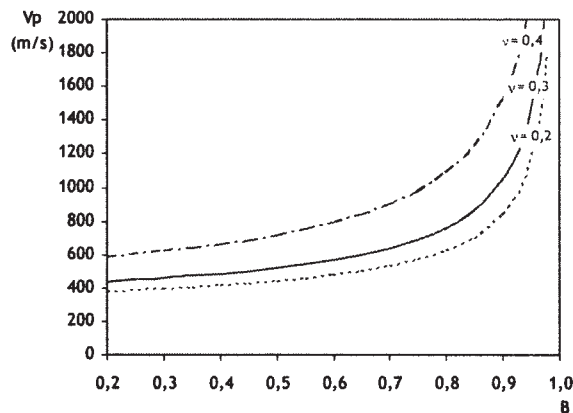


Fig. 2 – Curvas teóricas de la relación entre la velocidad de la onda de compresión V_p y el parámetro B, para suelos residuales de granito (Yang, 2002)

2 – ESTUDIO PARA LA OBTENCIÓN DE UN SISTEMA DE SATURACIÓN ADECUADO

2.1 – Descripción del suelo y ensayos realizados

En primer lugar, antes de comenzar los trabajos laborales, se realizó una pesquisa de los documentos y normativa existentes, en los cuales se hiciese referencia a la saturación de muestras en ensayos triaxiales, como los trabajos de Bishop y Henkel (1962), Lacasse y Berre (1988), los de Rad y Clough (1984) citados por Baldi et al. (1988) y la norma japonesa Standards of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test (The Japanese Geotechnical Society, 1999).

La muestra de suelo en estudio es de granulometría extensa, teniendo como dimensión máxima el tamiz n° 4 (4,76mm) con un porcentaje de retenidos de aproximadamente 4%, como se puede

observar en la curva granulométrica de la Figura 3. Los resultados de los ensayos de rutina de clasificación del suelo en laboratorio están expuestos en la Tabla 1. Luego de realizar la clasificación física y mecánica del jabre granítico, se realizó la clasificación del suelo según la ASTM y AASHTO. En la Tabla 2 se muestran los resultados de las mismas.

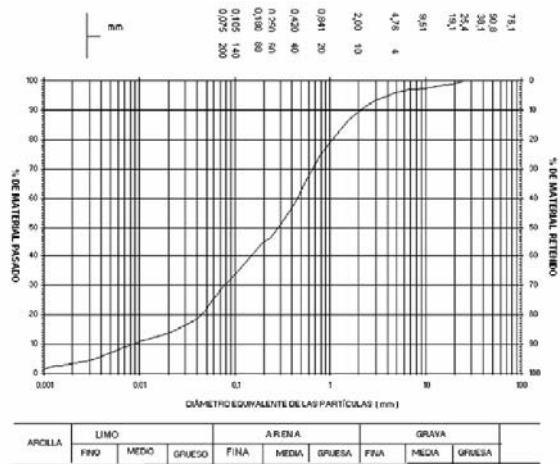


Fig. 3 – Curva granulométrica del suelo en estudio.

Tabla 1 – Resultados obtenidos en la clasificación del suelo.

Característica	Resultado Obtenido
D _{máx}	¾"
Porcentaje de material pasado en el tamiz n° 200 ASTM	29,7%
Limite líquido, máximo	NP
Índice de plasticidad	NP
Equivalente de arena	27%
Valor de azul de metileno	0,25
CBR a 95% compactación relativa y w _{opm} (PM)	22%
Porcentaje de materia orgánica	0,1%
Expansibilidad ensayo CBR	0,38%
IPI	28%

Tabla 2 – Clasificación del suelo según las diferentes normas.

Norma	Clasificación
IEP (ASTM)	SM
Rodoviaria AASHTO	A-2-4 (0)

El programa de ensayos incluyó probetas compactadas a las humedades óptima Proctor Modificado más 2% (w_{opm} +2%) y óptima Proctor modificado menos 4% (w_{opm} -4%), y con la

densidad seca (γ_d) correspondiente al 97% del Proctor Modificado, valor también utilizados en la construcción de carreteras; y finalmente a las humedades $w_{optm} - 2\%$ y $w_{optm} + 1\%$ y γ_d correspondiente al 99% PM), además de las probetas compactadas a w_{optm} .

2.2 – Estudio para la obtención de un sistema de saturación adecuado

En un primer momento (primera probeta ensayada, w_{optm}) se utilizó el método de saturación propuesto por Bishop y Henkel (1962), que consiste en el aumento de la llamada ‘back-pressure’ o contrapresión, manteniendo un cierto confinamiento efectivo de valor moderado. En nuestro caso particular, este proceso demostró ser muy demorado (3 semanas y media), además de precisar la aplicación de presiones muy altas en la cámara triaxial (700kPa); consecuencias estas, de la utilización de muestras compactadas y de la consolidación seca para la probeta de 100kPa de consolidación en la cámara triaxial (por el hecho de necesitar que la tensión efectiva no sea muy baja para evitar la expansión de la muestra), lo que dificulta el paso de agua por el interior de la probeta y en consecuencia la saturación de la misma (Figura 4).

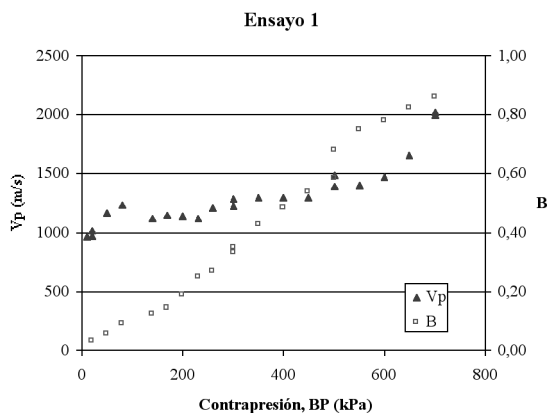


Fig. 4 – Variación de B y V_p con la contrapresión, mediante el primer proceso.

Así, fueron utilizados y combinados varios métodos de saturación encontrados en la bibliografía, a fin de conseguir el más eficaz y adecuado para este fin.

Los procesos de saturación considerados en este trabajo son seguidamente enumerados, según el orden en que fueron realizados y que son aquí descritos:

1. Método clásico de contrapresión.
2. Método con aplicación de CO_2 por la base inferior de la probeta.
3. Método con aplicación de vacuo por la base seguida de aplicación de CO_2 por la misma base.
4. Método de aplicación de vacuo en ambas bases de la probeta seguido de aplicación de CO_2 por la base inferior.
5. Método de aplicación de vacuo en ambas bases sin aplicación de CO_2 .
6. Método de aplicación de vacuo durante 2hrs.
7. Método de aplicación de vacuo durante 5,5hrs.

En la segunda probeta ensayada (la cual fue compactada con el mismo porcentaje de agua de la primera, w_{optm} , para poder hacer comparaciones entre los métodos y sus resultados), se introdujo una variación que consistió en dejar pasar dióxido de carbono (CO_2) antes de pasar el agua desaireada dentro de la probeta. Según la literatura encontrada (Lacasse y Berre, 1988) la utilización del

CO₂ en este tipo de suelos puede beneficiar la saturación de probetas. Sin embargo, el CO₂ en este proceso no mejoró en casi nada la utilización de altas contrapresiones, ni el tiempo del proceso (Figura 5).

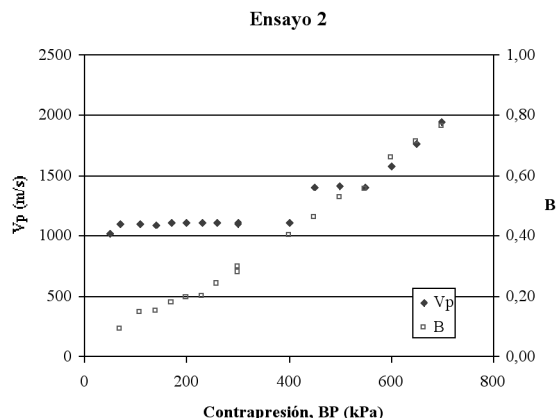


Fig. 5 – Variación de B y V_p con la contrapresión, mediante el segundo proceso.

Seguidamente, en la tercera probeta con w_{opm} , y con base en los trabajos de Rad y Clough (1984), citados por Baldi et al. (1988) y la norma japonesa Standards of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear Test (1999), se decidió utilizar vacuo en conjunto con el dióxido de carbono. Esto quiere decir, que luego de colocar la probeta en consolidación a 100kPa y antes de hacer pasar el CO₂ por la base inferior de la probeta, se aplicó vacuo (presión negativa con relación a la atmósfera) de -90kPa, según recomienda la norma japonesa, durante 4 horas (este tiempo no es especificado en la bibliografía; sin embargo, se utilizó por referencia de experiencia en otros estudios) y luego se hizo pasar el CO₂, para finalmente hacer pasar el agua - naturalmente desaireada proveniente de un tanque de vacuo - dentro de la probeta. Este proceso fue realizado de forma gradual y sistemática, teniendo en consideración que al aplicar el vacuo de -90kPa dentro de la probeta se aplicó externamente una presión tal, que garantizase la consolidación de 100kPa. No obstante, la presión negativa dentro de la probeta se disipaba, por lo que la consolidación de la misma a 100kPa fue garantizada ajustando las presiones exteriores y no permitiendo la variación de volumen de la probeta, el cual fue controlado mediante la verificación de la variación de volumen de la cámara y la variación de los LDTs, instrumentos de precisión aplicados directamente en la probeta (el control no podía ser realizado con la variación de volumen interna de la probeta, por ésta no estar saturada). El esquema de aplicación de vacuo se muestra en la Figura 6.

Se constató que efectivamente la combinación de vacuo y CO₂ disminuyó notablemente las presiones necesarias para la saturación y el tiempo necesario para la misma. Esta aplicación de vacuo se realizaba únicamente por la base inferior de la probeta (ver Figura 7).

A continuación, en la siguiente probeta (cuarta probeta con w_{opm}), se experimentó aplicar el vacuo en ambas bases de la probeta (superior e inferior), con la intención de que el mismo fuese aplicado más uniformemente en toda la muestra, y de esta forma garantizar que no existiesen ‘deformaciones desiguales’ a lo largo de la probeta, debido a la succión generada por el vacuo. Seguidamente, de igual forma, se retiró el vacuo de la parte inferior, se cerró la llave del vacuo de la parte superior y se aplicó el CO₂ por la parte inferior y luego se dejó pasar el agua. Mientras se dejaba pasar el agua y la llave del vacuo se mantenía cerrada, la presión interna de la probeta se disipaba y por lo tanto era controlada y asegurada la no variación de la consolidación de la probeta, mediante la verificación de la variación de volumen de la cámara y la variación de los LDTs

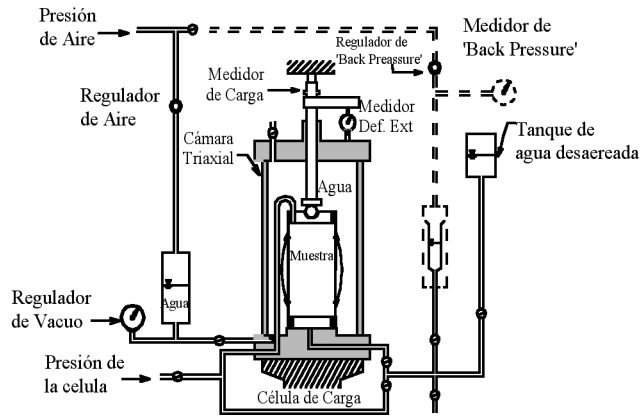


Fig. 6 – Esquema de aplicación de vacuo

Ensayo 3

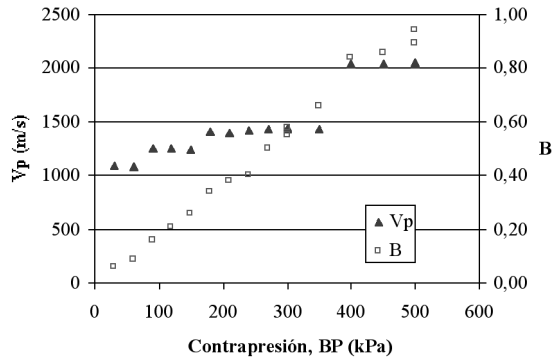


Fig. 7 – Variación de B y V_p con la contrapresión, mediante el tercer proceso.

colocados en la probeta. El proceso de saturación se agilizó con este procedimiento. Con todo, se decidió realizar las siguientes saturaciones de las probetas (5 y 6) aplicando vacío por arriba y por debajo de la probeta sin aplicación de CO_2 , para verificar si la utilización del mismo, en conjunto con el vacío, traía beneficios relevantes en este nuevo proceso (ver Figura 8).

Se comprobó que la utilización del CO_2 con este último método no es realmente significativa (Figura 9), por lo que se decidió eliminar el mismo para los siguientes ensayos, quedando como método de saturación para las demás muestras del estudio este último proceso descrito. En resumen, el proceso consistió en la consolidación en seco de la probeta, aplicación del vacío en ambas bases durante 4 horas, luego eliminando el vacío de la parte inferior y cerrando la llave de la parte superior del vacío, dejando pasar el agua por la base inferior manteniendo cerrada la llave superior (del vacío). Simultáneamente, se controló la aplicación de una consolidación constante de 100kPa en la probeta, a través del ajuste de las presiones exteriores hasta no tener variación de volumen de la cámara ni variación de los LDTs en la probeta. Luego de la estabilización de las presiones dentro de la probeta, se continuó con la contrapresión hasta conseguir la saturación, siendo ésta verificada como se explicó anteriormente, mediante el control del parámetro B de Skempton o la velocidad de ondas 'P'.

Ensayo 4

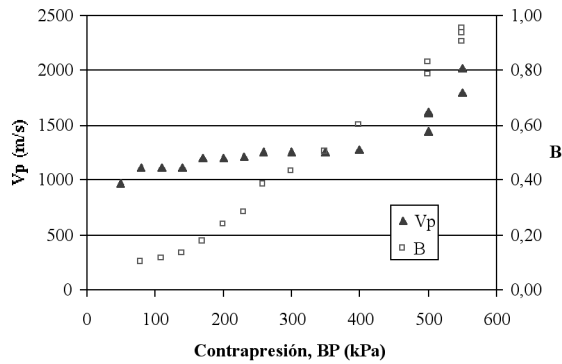


Fig. 8 – Variación de B y V_p con la contrapresión mediante el cuarto proceso.

Ensayo 6

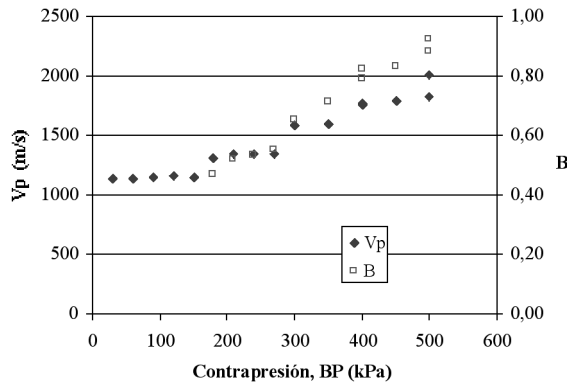


Fig. 9 – Variación de B y V_p con la contrapresión, mediante el quinto proceso.

2.3 – Consideraciones subsecuentes al proceso de saturación

En las probetas compactadas con porcentaje de agua superior al óptimo, se encontró que casi inmediatamente después de la aplicación del vacuo, salía agua por el conducto de salida del vacuo, debido a la succión que éste generaba. Este hecho llevó a pensar que tal vez, en estos casos, no sería conveniente la aplicación de vacuo, ya que se estaba a retirar agua de una probeta que luego debería ser saturada. Por tanto, en la octava probeta a ensayar con porcentaje de agua $w_{\text{opt}} + 1\%$ (ya se tenía referencia del proceso con la primera probeta de $w_{\text{opt}} + 1\%$, realizada anteriormente) se retiró el vacuo en cuanto comenzó a salir agua por el conducto de salida del vacuo. El resultado fue un proceso de saturación mucho más lento y con necesidad de utilizar presiones en la cámara más altas (650kPa) como en la primera probeta ensayada sin vacuo. Como consecuencia, para todas las condiciones de compactación se utilizó el vacuo de igual forma, quedando así revelada la importancia de este factor en el proceso de saturación.

Por otra parte, se decidió experimentar la influencia del tiempo de aplicación del vacuo en el proceso de saturación. Teniendo como referencia que el porcentaje de agua de la compactación no influía substancialmente en el tiempo y presiones necesarias para la saturación, en el ensayo N° 10

($w_{\text{optm}} + 2\%$) se decidió aplicar el vacuo por tan sólo 2 horas, y en el N° 11 ($w_{\text{optm}} - 2\%$) el vacuo se mantuvo por 5,5 horas. Se observó que la probeta N° 10 necesitó más tiempo (3 semanas) y mayores presiones (500kPa) para alcanzar la saturación que los ensayos anteriores. Sin embargo, el ensayo N° 11 necesitó menos tiempo (una semana) y menores presiones (300kPa) que los ensayos en que se aplicó el vacuo durante 4 horas. Así, también se reconoce que el tiempo de aplicación del vacuo es relevante para este fin. Los resultados de estos ensayos se muestran en las Figuras 10 y 11.

La Tabla 3 muestra un resumen de los métodos aplicados y el ensayo en que fue realizado (no se presentan los resultados de todas las probetas ensayas por no aportar diferencias relevantes en lo que al proceso de saturación se refiere).

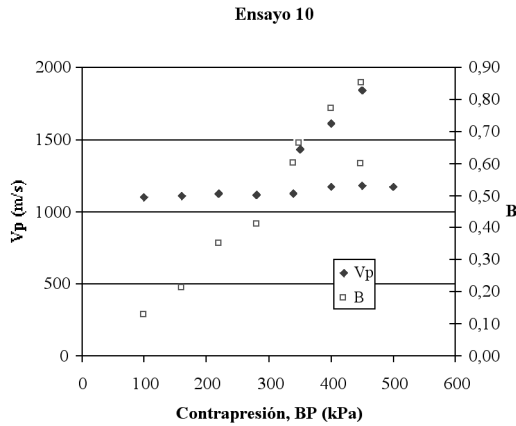


Fig. 10 – Variación de B y V_p con la contrapresión, mediante el sexto proceso.

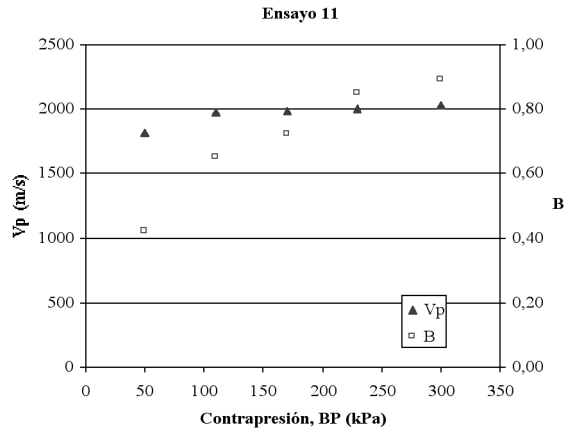


Fig. 11 – Variación de B y V_p con la contrapresión, mediante el séptimo proceso.

Tabla 3 – Resumen de características y métodos aplicados en cada probeta.

Proceso	Ensayo	% w	Método de saturación
1	1	óptimo	Clásico
2	2	óptimo	+ CO ₂
3	3	óptimo	+ vacuo por una base + CO ₂
4	4	óptimo	+ vacuo ambas bases + CO ₂
5	8	+ 1%	+ vacuo ambas bases
6	10	+ 2%	+ vacuo ambas bases por 2hrs
7	11	- 2%	+ vacuo ambas bases por 5,5hrs

2.3.1 – Verificación de V_p vs. B

Por otra parte, durante el proceso de saturación de las probetas, en las cuales se verificó la misma mediante el control del valor de B y la lectura de la velocidad de ondas de compresión V_p , se encontró que los valores máximos de V_p encontrados durante este estudio son superiores a 1500m/s, que es la velocidad de propagación de onda del agua (Viana da Fonseca y Ferreira, 2002), llegando a alcanzar valores próximos a los 2000m/s; constatándose, además, que cuando la velocidad de onda P alcanzó los 1500m/s, el valor de B que se obtuvo no sobrepasaba los 0,80. En la Tabla 4 se muestran algunos de los valores de B cuando el valor de V_p alcanza valores cercanos al valor de referencia (1500m/s). En la Tabla 5 se muestran algunos de los valores finales de V_p cuando fue alcanzada la saturación según B para las muestras compactadas a la humedad w_{opm} .

La Figura 12 muestra los resultados V_p vs. B para las muestras compactadas a la humedad w_{opm} en comparación con las curvas teóricas de Yang (2002) para los valores del coeficiente de Poisson que se muestran en la figura y un valor de $G = 100\text{MPa}$.

Tabla 4 – Valores de B para valores cercanos a $V_p=1500\text{m/s}$

Ensayo	V_p (m/s)	B
1	1465	0,78
2	1573	0,66
3	1437	0,55
4	1612	0,42

Tabla 5 – Valores de V_p para saturación según B .

Ensayo	V_p (m/s)	B
1	2021	0,93
2	2007	0,96
3	2054	0,94
4	1797	0,93

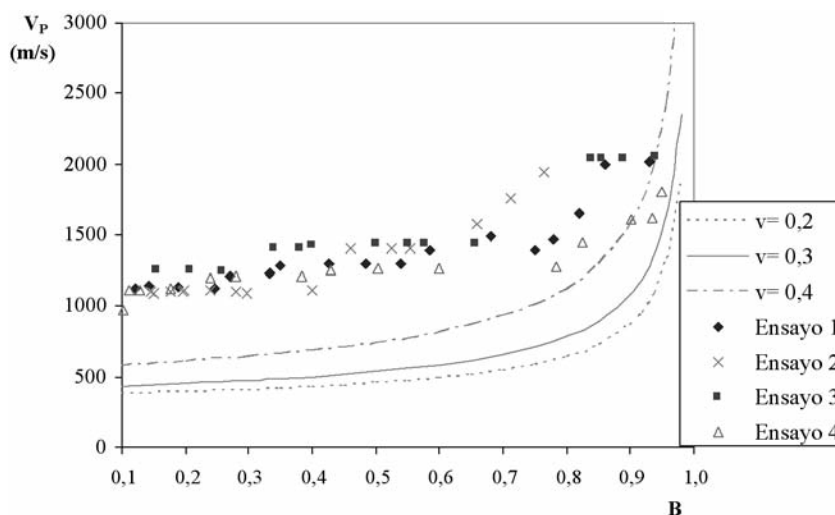


Fig. 12 – Curvas de V_p vs. B para las muestras compactadas a la w_{opt} en comparación con las curvas teóricas de Yang (2002).

3 – CONSIDERACIONES CONCLUSIVAS

Con esta nota técnica, los autores pretenden resaltar las ventajas del uso del vacuo preliminarmente a la percolación de agua desaireada para obtener niveles de saturación elevados y, así, asegurar una eficiente garantía de la aplicación del principio de tensiones efectivas en ensayos triaxiales drenados y no drenados.

Paralelamente, se propone la adopción del registro (monitorización) de las velocidades de ondas sísmicas de compresión (ondas 'P') como método complementario de verificación de la saturación global en suelos muy rígidos, en los cuales el control a través del parámetro B de Skempton se torna muy difícil.

4 – REFERENCIAS

- AASHTO (1998). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing- Part I & Part II. American Association of State Highway and Transportation Officials, 19th edition.
- ASTM D 2487-93 (1997). Standard Classification of Soils for Engineering Purpose (Unified Soil Classification System), Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.
- Baldi, G., Hight, D. W. y Thomas, G. E. (1988). A Reevaluation of Conventional Triaxial Test Methods. Advanced Triaxial Testing of Soils and Rocks, ASTM STP 977. Robert T., Donaghe Ronald C., Chaney and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 219-263.
- Bishop A. W. y Henkel, D. J. (1962). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, London.
- Ferreira, C. (2003). Implementação e Aplicação de Transdutores Piezoelétricos na Determinação de Velocidades de Ondas Sísmicas em Provetes. Avaliação da Qualidade de Amostragem em Solos Residuais. Dissertação apresentada na Universidade de Porto para obtenção do grau de Mestre, FEUP, Porto.

- Ishihara, K., Tsuchiya H., Huang, Y. y Kamada K. (2001). Recent Studies on Liquefaction Resistance of Sand- Effect of Saturation (Keynote Lecture). Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil dynamics, San Diego, California.
- Lacasse, S. y Berre, T. (1988). Triaxial Testing of Soils and Rocks, ASTM STP 977, Robert T., Donaghe Ronald C., Chaney and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 219-263.
- Rad, S. N. y Clough, G.W. (1984). New procedure for saturating sand specimens. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 110, No. 9, pp. 1205-1218.
- The Japanese Geotechnical Society (1999). Standards of Japanese Geotechnical Society for Laboratory Shear test, English Version, pp 3-7.
- Viana da Fonseca, A. y Ferreira, C. (2002). Bender Elements como Técnicas Laboratoriais Excelentes para Avaliação de Parâmetros Geotécnicos Referenciais, 8º Congresso Nacional de Geotecnia, LNEC, Lisboa, Vol. I, pp. 353-365.
- Viana da Fonseca, A. y Ferreira, C. (2003) Aplicação da Técnica de Bender Elements para Avaliação da Qualidade de Amostragem em Solos Residuais, XII COBRAMSEG, São Paulo, Brasil, pp.187-199.
- Yang, J. (2002). Liquefaction Resistance of Sand in Relation to P-wave Velocity, Géotechnique, Vol. 52, N° 4, pp. 295-298.