PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS CARBONATADOS E GIPSÍFEROS*

Carbonate and gypsum soils properties and classification

por
JOSÉ CARLOS DE O. S. HORTA**

RESUMO — Os solos carbonatados resultantes do desenvolvimento de crostas calcárias (calcretos) em climas sub-húmidos e semiáridos e os solos gipsíferos resultantes do desenvolvimento de crostas gipsíferas (gipcretos) em meios desérticos apresentam propriedades específicas e comportamentos geotécnicos particulares que estão relacionados com o teor de finos carbonatados e gipsíferos. Os ensaios de identificação convencionais encontram sérias restrições e falham quando são aplicados a solos carbonatados e gipsíferos.

Neste artigo relatam-se brevemente as propriedades dos solos carbonatados e gipsíferos e propõe-se que os teores em carbonetos e sulfatos sejam considerados como propriedades fundamentais para identificação, caracterização e classificação eficientes destes solos.

SYNOPSIS — Carbonate soils resulting from calcrete development under subhumid to semi-arid climates and gypsum soils resulting from gypcrete development in desert environments exhibit particular properties and engineering behaviours related to the amount of carbonate and gypsum fines. Conventional index properties fail to characterize the engineering behaviour of calcrete and gypcrete soils. The conventional index tests encounter serious restrictions and shortcomings when applied to calcrete and gypsum soils.

This paper briefly reports the properties of calcrete and gypcrete soils and suggests that the calcium carbonate and the gypsum equivalent should be considered as the fundamental index properties for effective characterization and classification of these soils.

1 — INTRODUÇÃO

A maior parte dos solos carbonatados e gipsíferos provém de jazidas incipientes ou bem desenvolvidas de crostas calcárias (calcretos) e gipsíferas (gipcretos).

O calcreto resulta da precipitação de carboneto de cálcio em perfis pedológicos, rochas em vias de meteorização, assim como aluviões e outros sedimentos clásticos da zona vadosa. As condições favoráveis para acumulação de carboneto de cálcio e desenvolvimento de jazidas de calcreto ficam reunidas quando e onde a evapotranspiração ultrapassa as precipitações, ou seja em climas sub-húmidos e semiáridos. De acordo com estimativas de Yaalon (1981), os solos carbonatados cobrem cerca de 13% da superfície total das terras emersas. A área ocupada por calcretos nas regiões sub-húmidas e semiáridas é obviamente maior. Na Argélia setentrional foi avaliada em 25%.

---

* Versão em português de uma comunicação apresentada na 12.ª Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, Agosto de 1989

** Louis Berger International, Inc.

O gipcreto resulta da acumulação de gesso na zona vadosa em climas áridos. Os solos gipsíferos não têm tão grande extensão como os carbonatados e estão confinados em algumas regiões dos desertos.

Situados muito longe das zonas tradicionais de desenvolvimento da mecânica de solos, os solos carbonatados e gipsíferos raramente têm atraído a atenção dos engenheiros geotécnicos. Têm sido contudo usados como materiais de construção de estradas desde há muito tempo e em várias partes do mundo, nomeadamente na África Austral (Netterberg, 1971) e do Norte (Horta, 1978 e 1980).

2 — PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS CARBONATADOS

No processo de formação de calcreto, o material hospedeiro passa por diferentes estágios de transformação com crescente teor em carbonetos. Nas fases iniciais, as acumulações de carboneto apresentam-se sob a forma de cristais microscópicos de calcite disseminados e as propriedades do material hospedeiro permanecem praticamente inalteradas. Para teores crescentes de carboneto, aparecem manchas brancas formando flocos ou nódulos moles em materiais hospedeiros argilosos e nódulos duros em materiais arenosos. Nas fases mais avançadas de desenvolvimento, a calcite substitui gradualmente os minerais do material hospedeiro incluídas as argilas e formam-se as estruturas típicas dos calcretos, por ordem de teor crescente em carbonetos: nódulos de dureza variável e dimensões milimétricas e centimétricas, crostas friáveis maciças e foliadas e, finalmente, crostas compactas com espessuras compreendidas entre alguns centímetros e 20 a 30 cm.

O solos provenientes de jazidas de calcreto representam uma mistura de elementos de vários tamanhos e tipos com pesos específicos variáveis e durezas muito diferentes, compreendendo calhaus de crosta compacta muito duros, fragmentos moles e porosos de crosta, nódulos finos de calcreto formados por cristais de calcite e por agregados de argila e silte cimentados por calcite e vários tipos de elementos herdados do material hospedeiro, tais como calhaus rolados, areia eólica, silte e argila. As jazidas de calcreto bem desenvolvido dão origem a areias e seixos com granulometrias muito variáveis. A maior parte das granulometrias dos calcretos é mal graduada com uma descontinuidade correspondente à fracção arenosa grosseira e média e um excesso de areia fina. Os solos grosseiros carbonatados apresentam teores elevados de finos acima de 10 a 15%.

A análise granulométrica por peneiração de solos carbonatados pode resultar em modificações erráticas de dimensões das partículas friáveis por atrição. Em consequência de o peso específico ser variável com a dimensão das partículas, as curvas granulométricas dão uma imagem distorcida do arranjo espacial das partículas (Netterberg, 1971).

Os finos de calcreto caracterizam-se por uma fracção siltosa calcária e siliciosa, finíssimos cristais de calcite e uma fracção argilosa. A fracção argilosa pode ser herdada do material hospedeiro e/ou neoformada durante o processo de calcretização. A neoformação do mineral argiloso acicular actapulgite é muito característica. A actapulgite apresenta elevada plasticidade

mas em contrapartida fraca expansibilidade. As argilas herdadas podem compreender praticamente todos os outros minerais argilosos, tais como a caulinite, a ilite e a montmorilonite altamente expansiva.

O finos carbonatados ou calcíticos não são plásticos e são ligeiramente solúveis na água à temperatura ordinária. A dissolução de finos carbonatados pela água intersticial liberta iões de cálcio que saturam as argilas fazendo diminuir a plasticidade do solo. A calcite dissolvida pode também agir como cimento criando ligações rígidas entre as partículas de solo.

A representação de calcretos na carta de plasticidade compreende pontos de ambos os lados da recta de Casagrande e indica uma tendência destes solos para ter limites de liquidez mais elevados que os solos habituais (Netterberg, 1971). Os limites de retracção dos calcretos apresentam valores próximos e até superiores aos dos respectivos limites de plasticidade.

A Fig. 1 é um diagrama dos índices de plasticidade em função dos teores em carboneto expressos em carboneto de cálcio equivalente de amostras de calcreto da Argélia. Também está traçada uma curva experimental de variação do índice de plasticidade de misturas duma certa argila com finos de calcário friável. Este diagrama indica que o índice de plasticidade dos calcretos depende, além do equivalente de $CaCO_3$, de factores como a mineralogia da fracção

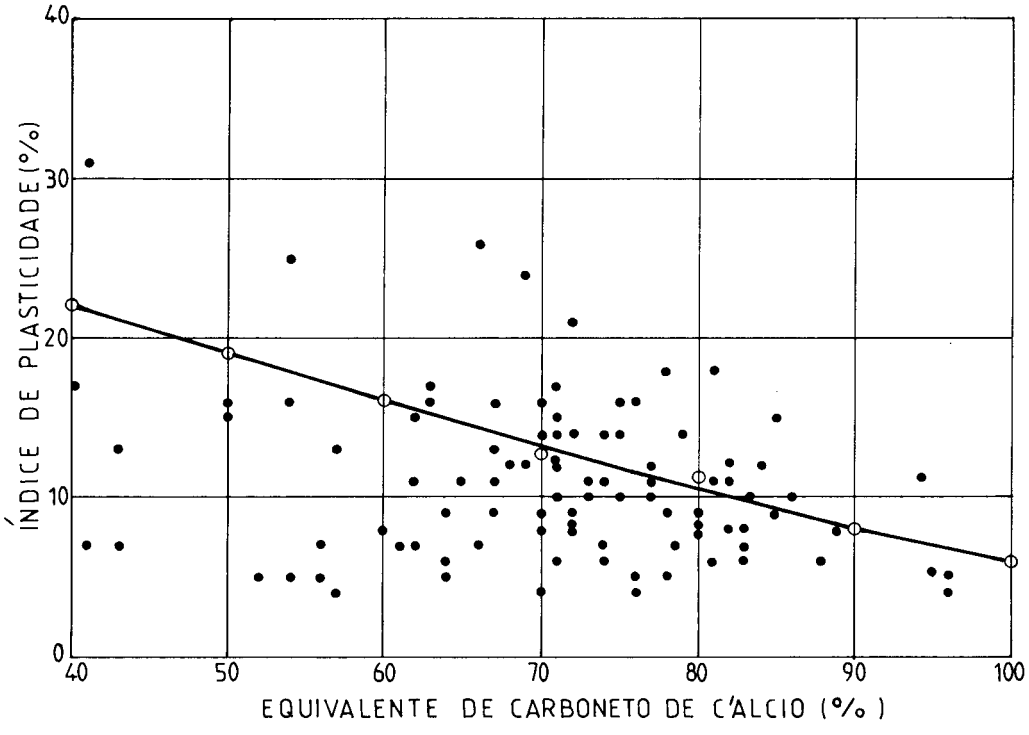

Fig. 1 — Diagrama do índice de plasticidade de calcretos da Argélia em função do equivalente de $CaCO_3$. A curva representa a variação do índice de plasticidade duma mistura de argila com finos de calcário friável.

argilosa e a presença de areia e silte quartzosos. Para valores baixos do teor de carbonetos expresso em carboneto de cálcio, o índice de plasticidade não é necessariamente elevado e, para um dado valor do teor de carbonetos, varia dentro de amplo intervalo. Porém este intervalo de variação diminui quando o equivalente de $CaCO_3$ aumenta e para valores elevados deste o índice de plasticidade não ultrapassa geralmente certos valores relativamente baixos. O diagrama da Fig. 1 mostra uma boa correlação entre o teor de carbonetos e o limite superior do índice de plasticidade dos calcretos.

A maioria das amostras apresentadas na Fig. 1 representa seixos de calcreto que foram utilizados com êxito nas bases de estradas asfaltadas da Argélia. As especificações usualmente admitidas rejeitariam materiais de base com índice de plasticidade superior ou igual a 6%, ou seja, cerca de 95% das amostras da Fig. 1. Alguns autores como Gilette (1934) e autoridades como a Federal Aviation Authority nos Estados Unidos propuseram limites superiores mais realistas para os índices de plasticidade de seixos de calcreto (caliche) a utilizar em bases de pavimentos, cujos valores estão compreendidos entre 10 e 15%. A Fig. 1 mostra que estes valores não são ultrapassados pela maioria das amostras tendo um equivalente de $CaCO_3$ mínimo de cerca de 60 a 80%.

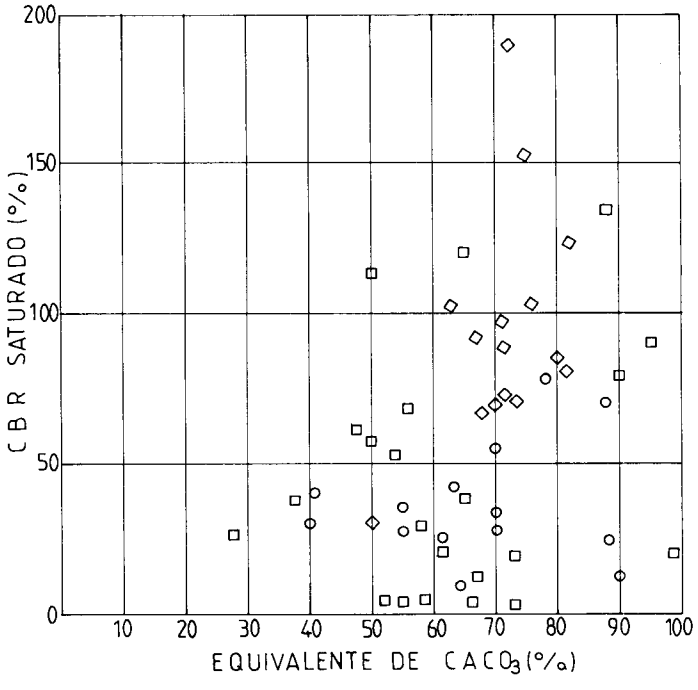

Fig. 2— Representação gráfica do CBR de solos carbonatados da África do Norte em função do equivalente de carboneto de cálcio. O CBR saturado foi determinado em provetes moldados ao peso específico seco máximo do Proctor modificado. As amostras de Marrocos (Legroun, 1987) foram representadas por quadrados e as amostras da Argélia (Perelle, 1964 e 1972) por losangos. As amostras da Tunísia (Hamrouni, 1974) representadas por círculos são na maior parte dos casos alcários friáveis sedimentares

A Fig. 2 é uma representação gráfica do CBR de amostras de calcretos da Argélia e de Marrocos, assim como calcários friáveis sedimentares quaternários da Tunísia em função do equivalente de carboneto de cálcio. Esta figura mostra que um teor em carbonetos elevado é uma condição necessária mas não suficiente de resistência elevada. A resistência aumenta com o teor em carbonetos mas também depende de outros factores como a granulometria, o teor em finos, as dimensões das partículas finas, a forma e a dureza das partículas grosseiras.

Na Fig. 3 o teor em finos da maior parte das amostras da Fig. 2 foi representado em função do teor em carbonetos e o valor do CBR foi indicado ao lado de cada ponto. Exceptuando duas amostras de calcreto de Marrocos com valores do CBR próximos de 60% e 50 a 60% de finos, valores elevados do CBR só aparecem abaixo da linha horizontal correspondendo a 35% de finos. Esta linha e a vertical equivalente de $CaCO_3$ = 70% delimitam uma área em que todos os pontos têm elevados valores do CBR, superiores a 70%. O valor de 30 a 35% é geralmente considerado o teor máximo de finos para o qual o atrito entre as partículas grosseiras dum solo pode ser mobilizado e a Fig. 3 apresenta uma confirmação deste valor para os solos carbonatados. Além disto, este gráfico mostra que o valor mínimo de 70% do equivalente de carboneto de cálcio é uma indicação segura de valores elevados de resistência mecânica de seixos de calcreto.

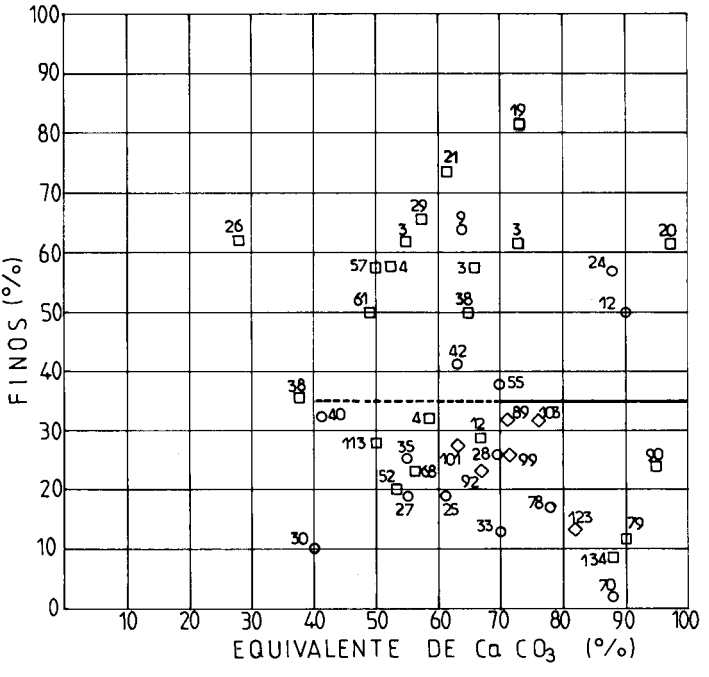

Fig. 3— Representação do teor de carbonetos e do teor de finos de solos carbonatados de Marrocos (Legroun, 1987), da Argélia (Perelle, 1972) e da Tunísia (Hamrouni, 1974) com a mesma legenda que a Fig. 2. O CBR saturado de laboratório, determinado em provetes compactados ao peso específico seco máximo do Proctor modificado, foi indicado ao lado de cada ponto

Os resultados atrás discutidos, a composição mineralógica dos finos de calcreto em que a calcite predomina assim como o processo de desenvolvimento de solos de calcreto com enriquecimento progressivo em carbonetos sugerem que há vantagem em considerar o equivalente de carboneto de cálcio da fracção que passa através do peneiro de 0,4 mm (N.° 40) como a propriedade fundamental para identificação de solos carbonatados. Com efeito, o teor de carbonetos pode ser determinado com precisão, rapidez e facilidade utilizando o calcímetro COLLINS-BERNARD ou uma bomba de carbonetos, comparativamente à determinação dos limites de consistência que é demorada e cuja precisão e reprodutibilidade dependem muito da destreza do operador e de outros factores difíceis de controlar.

Conforme foi mostrado, o equivalente de $CaCO_3$ apresenta uma boa correlação com as características de resistência dos solos carbonatados. Além disso, os calcretos e outros solos carbonatados como os calcários coralíferos apresentam auto-estabilização e aumentos de resistência resultantes da dissolução de pequenos cristais de calcite na água intersticial e consequente precipitação por secagem (Netterberg, 1975) ou do crescimento cristalino em condições húmidas (Bullen e Williams, 1988). Esta propriedade dos solos carbonatados depende directamente do teor de carbonetos da fracção fina.

3 — PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS GIPSÍFEROS

A maior parte dos gipcretos do Noroeste do Sahara formou-se em areias eólicas e compõe-se de quartzo e gesso. O gesso tem propriedades pouco comuns e muito diferentes das dos minerais banais dos solos. Em equilíbrio com a atmosfera o gesso pode ceder-lhe parcialmente a sua água de hidratação a temperaturas relativamente baixas da ordem de 40 a 60 °C e mesmo inferiores e humidades relativas atmosféricas baixas:

$$2CaSO_4.2H_2O = 2CaSO_4.0{,}5H_2O + 3H_2O \quad (1)$$

A desidratação do gesso para dar o hemi-hidrato β pode ter lugar na estufa de secagem mas também em ambientes desérticos quentes. A desidratação reconhece-se nos cristais macroscópicos de gesso por perderem a transparência e limpidez tornando-se brancos e opacos.

O gipcreto forma-se geralmente na franja capilar de lençóis freáticos selenitosos. As jazidas de gipcreto antigo que perderam o contacto com os lençóis freáticos e permaneceram expostas à atmosfera desértica de verão, quente e seca, apresentam um padrão prismático de fissuração higroscópica resultante da retracção por desidratação.

As jazidas antigas de gipcreto parcialmente desidratado dão origem a areias e siltes gipsíferos que na realidade representam argamassas naturais de gesso produzindo presa a seguir à compactagem húmida e dando pavimentos semi-rígidos. Durante a estação quente desenvolve-se nestes pavimentos uma fissuração higroscópica com duas famílias de fissuras, uma transversal e outra longitudinal.

O gesso é um sal relativamente solúvel e a solubilidade do hemi-hidrato β é superior à do gesso. O endurecimento do gesso calcinado e dos solos gipsíferos nos desertos quentes pode ser explicado pela cristalização de gesso seguidamente à dissolução do hemi-hidrato β.

O peso específico do gesso (2,32 g/cm^3) é bem inferior aos pesos específicos dos outros minerais dos solos como o quartzo (2,65 g/cm^3), mas o peso específico do hemi-hidrato β é superior (2,75 g/cm^3).

Outra propriedade particular do gesso é a sua baixa dureza: pode ser riscado com a unha. Durante a extracção e compactagem os seixos e calhaus de gipcreto são facilmente esmagados e reduzem-se a areia e silte.

As propriedades de identificação convencionais não servem para caracterizar os solos gipsíferos e o seu comportamento específico. Os ensaios e procedimentos de ensaio de identificação convencionais podem fornecer resultados sem sentido se forem aplicados indiscriminadamente aos solos gipsíferos. A determinação normal do teor de água por secagem na estufa a 105 °C causa desidratação. Amostras de solo contendo gesso devem ser secadas até peso constante a temperaturas inferiores a 60 °C, usualmente a 50 – 55 °C e de preferência a 40 °C. A análise granulométrica por peneiração e lavagem causa dissolução e perda de finos gipsíferos assim como modificações erráticas das dimensões das partículas por atrição. Os solos gipsíferos formados em areias eólicas apresentam índices de plasticidade relativamente elevados excedendo por vezes 15% apesar de não terem praticamente nenhuma argila. Esta pseudo-plasticidade dos solos gipsíferos parece estar relacionada com a flexibilidade dos cristais aciculares de gesso. O peso específico dos solos gipsíferos varia com o tamanho das partículas e a composição mineralógica e depende das condições meteorológicas.

Para caracterizar os solos gipsíferos torna-se indispensável um ensaio de identificação determinando o teor em gesso. A dosagem dos sulfatos solúveis por meio do cloreto de bário após solubilização em ácido clorídrico parece ser um ensaio de identificação conveniente e fundamental para ser feito na fracção inferior a 0,4 mm (peneiro N.° 40) dos solos gipsíferos.

4 — CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS CARBONATADOS E GIPSÍFEROS

Os ensaios químicos que se referem directamente à composição mineralógica dos solos carbonatados e gipsíferos são os mais eficientes para caracterizar as propriedades específicas destes solos e os equivalentes de carboneto de cálcio e gesso da fracção inferior a 0,4 mm (peneiro Nº. 40) devem substituir os limites de consistência na classificação destes solos. Nestas condições o sistema de classificação unificado de solos passaria a incluir novas classes definidas a seguir.

As *areias carbonatadas* são areias com mais de 40% de carbonetos na fracção passando através do peneiro de 0,4 mm. Propõe-se o símbolo SE para as areias carbonatadas, sendo E a inicial da palavra francesa "encroûtement" que quer dizer crosta. Acima de 40% de carbone-

tos a cor original do material hospedeiro é ocultada pela cor branca da calcite finamente dividida e o solo torna-se esbranquiçado. Esta cor assim como a efervescência aos ácidos facilitam a identificação das areias carbonatadas no campo.

Os *seixos carbonatados*, símbolo GE, são seixos com mais de 60% de carbonetos na fracção inferior a 0,4 mm. A identificação no campo pode basear-se no reconhecimento das estruturas do calcreto. Os seixos carbonatados correspondem aos calcretos com crostas foliadas e crostas compactas, aos seixos cimentados por calcreto e a calcretos nodulares bem desenvolvidos. Todos estes tipos de calcretos apresentam geralmente mais de 60% de carbonetos na fracção inferior a 0,4 mm.

A classificação dos solos finos carbonatados não é aqui encarada. Com efeito, grande parte das jazidas de calcreto são solos grosseiros. Areias finas e solos finos carbonatados são muito comuns nos fundos marinhos e estão a ser estudados por geotécnicos da especialidade.

As *areias gipsíferas*, símbolo SY, e os siltes gipsíferos, símbolo MY, onde Y é a primeira letra da palavra "yeso" que significa gesso em espanhol, são areias e siltes com um teor de gesso mínimo. Para este teor mínimo da fracção inferior a 0,4 mm propõe-se 30%. Contudo os gipcretos apresentam geralmente teores mais elevados de gesso acima de 50% e indo até 85%. A classificação no campo pode basear-se na identificação do gesso e das jazidas de gipcreto por geotécnicos experientes.

Contrariamente ao que acontece com a calcite, a epigenese de minerais preexistentes não se verifica no caso do gesso. O gesso cristaliza nos interstícios do material hospedeiro, podendo a sua pressão de cristalização afastar as partículas deste, mas não as substitui. Certas argilas podem apresentar cristais de gesso segregado ou em filonetes mas não parece haver motivo para que se defina uma classe de argilas gipsíferas, como também não há para se falar de seixos gipsíferos porque, sendo o gesso extremamente friável, qualquer agregado de maiores dimensões é facilmente esmagado.

5 — CONCLUSÕES

Os solos continentais carbonatados e gipsíferos derivados de jazidas de calcreto e gipcreto apresentam propriedades e comportamentos geotécnicos específicos que não é possível caracterizar por meio dos ensaios de classificação convencionais.

As granulometrias dos calcretos são muito variáveis e os solos grosseiros carbonatados compreendem diferentes tipos e tamanhos de partículas com pesos específicos e durezas diferentes.

O índice de plasticidade dos solos carbonatados depende do equivalente de carboneto de cálcio e diminui quando este aumenta. A resistência dos solos carbonatados, ilustrada pelo índice CBR, aumenta quando o equivalente de $CaCO_3$ aumenta e um valor mínimo de 70%

deste é uma indicação segura de resistência elevada. Os finos carbonatados são ligeiramente solúveis na água à temperatura ambiente e são responsáveis por aumentos de resistência ou auto-estabilização dos solos carbonatados.

A maioria das jazidas de gipcreto do Noroeste do Sahara desenvolveu-se em areias eólicas. Os gipcretos são formados por areia de quartzo e finos de gesso e apresentam particularidades muito específicas relacionadas com este mineral. O gesso é friável, solúvel na água e instável em ambientes desérticos quentes onde se desidrata para dar o hemi-hidrato β. Solos gipsíferos parcialmente desidratados endurecem como as argamassas de gesso depois de compactados com água, mas fendilham-se por retracção higroscópica em consequência da desidratação durante periodos quentes e húmidos.

Os ensaios químicos com referência directa à composição mineralógica dos solos carbonatados e gipsíferos são os mais eficientes para caracterizar as propriedades particulares e comportamento geotécnico específico destes solos. Os equivalentes de carboneto de cálcio e de gesso devem substituir os limites de consistência como propriedades de identificação fundamentais destes solos. Com base nestes ensaios, propõe-se classificá-los, no âmbito do sistema unificado de classificação de solos, em areias carbonatadas (SE), seixos carbonatados (GE), areias gipsíferas (SY) e siltes gipsíferos (MY).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BULLEN, F.; WILLIAMS, D. (1988) — *Coralline calcareous pavement and foundation aggregates*, in JEWELL and ANDREWS eds., "Engineering for calcareous sediments", Proc. Int. Conf. on Calcareous Sediments, Perth, 15-18.3.1988, Vol. I, General Proceedings, p. 3-10.

GILETTE, N. S. (1934) — *Soils tests useful in determining quality of caliche*, Public Roads, Vol. 15, N°. 10, p. 237-242.

HAMROUNI, A. (1974) — *Question VIII: Routes économiques, routes à faible circulation*, Rapport Tunisien, XVème Congrès Mondial de la Route, Mexico, 1975, 29 p.

HORTA, J. C. (1978) — *Les chaussés en sables gypseux du Sahara*, Técnica – Rev. de Engenharia, N.º 447, p. 417-430.

HORTA, J. C. (1980) — *Les encroûtements calcaires et la construction de chaussées en Afrique du Nord*, Técnica – Rev. de Engenharia, N.º 460, p. 9-22 e 461, p. 61-72.

LEGROUN, N. A. (1987) — *Étude de laboratoire de différents tufs ou encroûtements calcaires du Maroc*, 2ème Congrès National de la Route, Mohammedia, 10-12.6.1987, Question 3: Routes Économiques, p. 112-120.

NETTERBERG, F. (1971) — *Calcrete in road construction*, NIRR Bull. 10, CSIR Res. Rep. 286, 56 p.

NETTERBERG, F. (1975) — *Self-stabilization of road bases: fact or fiction?*, Sixth Reg. Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Eng., Durban, Sept. 1974, p. 115-119.

PERELLE, J. (1964) — Relatório inédito, Laboratoire des Ponts et Chaussées, Algiers.

PERELLE, J. (1964) — Relatório inédito, L.N.T.P.B., Oran.

YAALON, D. M. (1981) — *Pedogenic carbonate in aridic soils: magnitude of the pool and anual fluxes* (Abs.), Int. Conf. on Aridic Soils, Jerusalém, 29.3-4.4.1981, p. 94.