

O SOLO-CAL NA PAVIMENTAÇÃO DE ESTRADAS E AERÓDROMOS

Soil-Lime in Road and Airfield Paving

por

ELDA DE CASTRO*
ANTÓNIO SERAFIM LUÍS**

RESUMO – Neste trabalho apresenta-se uma breve síntese dos conhecimentos actuais sobre estabilização de solos com cal com vista à sua aplicação em estradas e aeródromos, referem-se os pontos com mais interesse de alguns estudos laboratoriais realizados no LNEC neste domínio, e descreve-se o emprego que este tipo de estabilização tem tido em Moçambique e a técnica de construção aí utilizada.

SYNOPSIS – The paper briefly sums up the present knowledge on soil stabilization with lime in roads and airfields, refers points of major interest in some laboratory studies carried out at the LNEC on this subject, and describes applications of this type of soil stabilization in Mozambique and the construction method in use there.

1 – INTRODUÇÃO

Os materiais usados na pavimentação rodoviária têm de possuir, como é evidente, características apropriadas, e é frequente os terrenos existentes no local não satisfazerem às especificações exigidas para a sua utilização. O engenheiro tem então à sua escolha duas soluções: substituir esses materiais por outros convenientes ou corrigi-los de modo a conferir-lhes as características necessárias, por meio de um método adequado de estabilização mecânica, química ou de outro tipo. A escolha de um ou outro caminho estará condicionada por muitos factores e, entre eles, por considerações de ordem económica.

* Engenheira Química, Especialista em Geotecnia do LNEC

** Engenheiro Civil do LEM

Entre os numerosos processos de estabilização química de solos que vêm tendo emprego progressivamente crescente em muitos países, conta-se a estabilização com cal.

A utilização de cal no tratamento de solos é uma das mais velhas técnicas usadas na construção de estradas. Mesmo antes dos Romanos, há 2000 anos, a utilizarem, já outros povos tinham recorrido ao seu emprego. Os Romanos não só desenvolveram a sua técnica de aplicação, como usaram também um outro material, a pozolana (cinza vulcânica existente em Puzzuoli), para melhorar a acção de cimentação da cal.

Contudo, nos tempos modernos a construção rodoviária pouco recorreu à utilização da cal e as primeiras experiências em grande escala tiveram lugar nos U.S.A. nos estados do Texas e Missouri, em 1924, e na Rússia, em 1926. Entretanto foi só depois da 2.^a Guerra Mundial que começou a ter substancial incremento nos Estados Unidos.

Também nos países tropicais o seu uso tem vindo a aumentar. Assim, por exemplo, a Rodésia do Norte construiu um trecho experimental de estrada estabilizado com cal em 1950 e, subsequentemente, incluiu este tipo de estabilização num vasto programa de construção rodoviária iniciado em 1952. O sucesso foi tal que 90% das estradas construídas em 1955 e 1956 utilizaram bases estabilizadas com cal (Cartmell e Berg, 1958).

Em Portugal continental não tem sido geralmente empregado este tipo de estabilização, e a produção de cal, embora existam bastantes fornos, não está ainda convenientemente industrializada nem normalizados os diversos tipos, como acontece, por exemplo, nos Estados Unidos.

Dado o seu interesse, no LNEC têm sido feitos estudos experimentais em laboratório no domínio da estabilização de vários tipos de solo com cal (Castro 1966 e 1969, Silva 1967, Branco, Castro e Silva 1967) dos quais se apresentarão seguidamente os pontos com maior importância.

Em Moçambique tem-se já empregado a estabilização com cal em razoável escala, tendo-se recorrido à cal nos casos específicos em que a utilização de determinados solos com elementos grossos resistentes dependia somente da correcção do seu índice de plasticidade, e naqueles em que apenas se dispunha de solos finos com elevado índice de plasticidade incapazes de permitirem uma boa homogeneização quando tratados com cimento ou com betume (Luís 1972).

2 - GENERALIDADES SOBRE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

2.1 - Cal

No sentido restrito do termo cal é o óxido de cálcio (CaO), mas esta designação tem na linguagem corrente uma aceção mais lata e abrange outros produtos derivados do, ou associados ao óxido de cálcio.

A cal é fabricada comercialmente por calcinação do calcário (CaCO₃), transformando-se o carbonato de cálcio no respectivo óxido e libertando-se o anidrido carbónico:



O produto assim obtido é a cal de alto teor em cálcio também designada por cal calcítica. Calcinando a dolomite ou calcário dolomítico, rocha constituída por carbonato de cálcio e carbonato de magnésio em quantidades equimoleculares, obtém-se a cal dolomítica, que é uma mistura equimolecular de óxido de cálcio e óxido de magnésio (CaO + MgO). A calcinação de calcários dolomíticos impuros (calcários magnesianos) conduz a cais com diferentes proporções daqueles óxidos.

Tanto a cal calcítica como a dolomítica são usualmente designadas por cal viva. A cal calcítica é susceptível de reagir muito rapidamente com a água com libertação de calor, produzindo-se a cal hidratada, também correntemente designada por cal apagada, em que todo o óxido de cálcio se encontra convertido em hidróxido (Ca(OH)₂). Nas cais dolomíticas o óxido de magnésio hidrata mais dificilmente e, assim, a maior parte permanece como óxido. A cal hidratada resultante (Ca(OH)₂ + MgO) é chamada cal dolomítica hidratada normal ou monohidratada. Usando técnicas de hidratação sob pressão obtém-se cal dolomítica altamente hidratada (Ca(OH)₂ + Mg(OH)₂) em que o óxido de magnésio se transformou em hidróxido.

Pouco existe ainda no domínio da normalização das cais para a estabilização de solos.

Para a fixação das características físicas e da composição química têm sido usadas nos Estados Unidos as especificações ASTM* para cais empregadas na construção.

* American Society for Testing and Materials.

Recentemente a AASHO* publicou algumas especificações relativas a cal para estabilização de solos e entre elas a especificação AASHO M 16-68 que define dois tipos fundamentais:

- Tipo I - cal calcítica hidratada, com um teor máximo em óxido de magnésio de 4%.
- Tipo II - cal dolomítica ou cal de magnésio, com um teor em óxido de magnésio superior a 4% e igual ou inferior a 36%.

A África do Sul tem-se também preocupado com a normalização de cais para a estabilização de solos. O SABS** publicou em 1967 uma especificação neste domínio (SABS 824-1967).

Em Portugal existem cais calcíticos e cais dolomíticos mas não há qualquer normalização de tipos ou características.

2.2 - *Mecanismo da estabilização dos solos pela cal*

Quando se mistura cal a um solo húmido processam-se simultaneamente vários tipos de reacção que modificam as suas características. Admite-se, geralmente, que as mais importantes são as seguintes: permuta iónica e floculação, acção de cimentação (ou reacção pozolânica) e carbonatação.

A acção dos iões cálcio começa a fazer-se sentir imediatamente após a adição da cal a um solo plástico e, deixando a mistura húmida solta em cura (por vezes designada por apodrecimento devido ao cheiro que se desenvolve), verifica-se uma diminuição da plasticidade e o solo torna-se friável e desagrega-se facilmente à mão, à semelhança de um silte. Este fenómeno deve-se à permuta iónica pela qual os cations Ca^{2+} vão adsorver-se à superfície das partículas diminuindo a sua electronegatividade e originando a floculação. A argila, constituída agora por partículas de maiores dimensões, passa a comportar-se como um silte, perde plasticidade, coesão e expansibilidade, e a sua trabalhabilidade aumenta. Estas modificações benéficas são geralmente alcançáveis com pequenas quantidades de cal, e casos há em que a adição de 1 a 2% conduz a melhorias muito significativas.

* American Association of State Highway Officials.

** South African Bureau of Standards.

Um outro tipo de reacção mais lenta, que se processa a longo prazo e que é frequentemente designada por reacção pozolânica, tem como resultado uma cimentação das misturas compactadas de solo-cal. Trata-se duma reacção entre os minerais siliciosos e aluminosos do solo e a cal, de que resultam vários produtos cimentantes aos quais tem sido atribuído o papel mais importante no incremento da resistência das misturas solo-cal. A acção de cimentação requer bastante mais tempo do que a hidratação do cimento Portland e é favorecida por condições climáticas quentes. Pode ser acelerada por meio de aditivos adequados.

A carbonatação da cal promovida pelo anidrido carbónico do ar é outro tipo de reacção química que ocorre nas misturas solo-cal. É afinal a reacção inversa da produção da cal a partir do calcário. Os carbonatos de cálcio e magnésio formados são cimentos fracos e, além disso, prejudicam a reacção pozolânica impedindo que se atinja a resistência desejada, pelo que deve ser evitada (Herrin e Mitchell 1961, Castro 1970 e 1972).

2.3 - Características das misturas solo-cal

As modificações dos solos pela acção da cal conferem às misturas solo-cal características próprias. Destas modificações as mais importantes para o engenheiro rodoviário, e que por isso têm sido mais intensivamente estudadas, são as que incidem sobre a plasticidade, granulometria, variações volumétricas por absorção de água, pressão de expansão, características de compactação, resistência e durabilidade. Outras propriedades sofrem também alterações (permeabilidade, sucção, absorção, etc.) mas têm sido objecto de menos estudos.

O grau em que as modificações dos solos se processam é dependente da sua natureza, do tipo e teor em cal e do modo de utilização (tempo e forma de cura, compactação da mistura, etc.) e não existem ainda estudos suficientes que permitam estabelecer, de modo seguro, normas para a obtenção das modificações desejadas apenas com base no conhecimento das características dos solos e das cais.

Dum modo geral pode dizer-se, muito resumidamente e referindo apenas os pontos mais importantes, que com a adição de cal se verifica o seguinte:

- O limite de plasticidade normalmente sobe e o limite de liquidez normalmente baixa, diminuindo conseqüentemente o índice de plasticidade. Os solos altamente plásticos são aqueles em que a redução da plasticidade é mais

substancial, conseguindo-se por vezes que o solo fique não plástico com teores em cal relativamente baixos. Com solos moderadamente plásticos o efeito é menos sensível e há mesmo casos em que se tem verificado um ligeiro aumento do índice de plasticidade. As variações são acentuadas até um determinado teor em cal (designado por “lime fixation point” na literatura de língua inglesa) não se processando daí em diante melhoria sensível.

– A granulometria do solo natural é modificada mediante a floculação e aglomeração das partículas finas pela cal, tornando-se mais grosseira. Este efeito, incidindo principalmente na fracção argilosa, é sobretudo relevante nos solos finos.

– Nas argilas expansivas as variações volumétricas por absorção de água e as retracções por secagem são substancialmente reduzidas, o mesmo sucedendo à pressão de expansão.

– Geralmente para uma mesma energia de compactação a mistura solo-cal apresenta uma baridade seca mais baixa que o solo sem cal. O teor óptimo em água é, normalmente, superior.

– A resistência da mistura solo-cal após compactação e cura é, em geral, consideravelmente superior à do solo compactado sem cal. Este aumento é gradual e processa-se lentamente, com uma velocidade muito inferior à que é usual no betão de cimento. Em obra são habitualmente necessários 4 a 6 meses para que se alcance a maior parte da resistência atingível. Temperaturas ambientes elevadas aceleram este processo consideravelmente. Têm sido também utilizados, com a mesma finalidade, aditivos químicos em pequena percentagem.

Para que uma mistura solo-cal tenha bom comportamento em obra, é necessário não só que possua características satisfatórias e seja convenientemente aplicada, mas ainda que essas características permaneçam e resistam às acções de meteorização. A durabilidade das misturas é normalmente maior quando se empregam teores em cal altos e, por esta razão, alguns técnicos aconselham o emprego de pelo menos 5% de cal mesmo que quantidades menores possam produzir a resistência necessária.

2.4 – *Especificações relativas a solo-cal e dosagem*

Não há ainda especificações geralmente aceites para a selecção de solos nem para a dosagem, ensaio e aplicação das misturas solo-cal. Os diversos

organismos utilizam métodos de ensaio e critérios mínimos frequentemente baseados nos usados para o solo-cimento. Tal como sucede com a cal para estabilização de solos, só recentemente as grandes organizações de normalização começaram a publicar algumas especificações relativas a solo-cal.

No XIV Congresso Mundial de Praga (1971) o "Comité des routes economiques" propõe como regra prática para a selecção dos solos a estabilizar com cal que estes contenham pelo menos 15% de material passando no peneiro de 0,425 mm e um I_p mínimo de 10%. O departamento da Força Aérea Americana (1966) estabelece um I_p mínimo de 12% e a "Nacional Lime Association" (1965) 10%. Segundo a prática australiana este valor é de 15% (Department of Works 1964).

É frequente encontrar na literatura a referência de que os solos orgânicos não reagem satisfatoriamente com a cal. Casos há, contudo, em que têm sido obtidos bons resultados (Arman 1969). Igualmente se encontram referências de que os solos contendo sulfatos (mais de 0,5 a 1%) também não são eficazmente estabilizados pela cal (Dumbleton 1962).

Recentemente, a AASHO publicou dois métodos de ensaio relativos a solo-cal: "T 220-66 - Determinação da resistência de misturas de solo-cal" e "T 232-70 - Determinação do teor em cal de solos tratados com cal, por titulação". A primeira destas especificações inclui um método expedito de determinação do teor em cal a usar em estabilização de camadas de base e leitos de pavimento, baseado no índice de plasticidade e na percentagem de material que passa no peneiro de 0,425 mm (n.º 40) ASTM. Recomenda também para resistência à compressão, determinada sobre provetes submetidos a 10 dias de absorção de água por capilaridade, um mínimo de 3,5 kgf/cm² para sub-bases e 7,0 kgf/cm² para bases.

A "British Standards Institution" possui também uma série de métodos para o ensaio de solos estabilizados (BS 1924:1967). São de índole geral, devendo certos pontos ser fixados em função do estabilizante em causa. Especialmente para a cal só é incluída a "Determinação do teor em cal em solos estabilizados com cal".

A "California Standard Specifications" (1971) apresenta também uma especificação sobre tratamentos com cal.

O teor em cal a usar na estabilização de solos deve ser determinado em cada caso. Está, contudo, geralmente compreendido entre 1 e 10%. Quantidades mais elevadas não são, normalmente, nem económicas nem necessárias. É recomendável não utilizar menos de 3% mesmo quando se tenha obtido em laboratório as

modificações desejadas com um teor mais baixo, dado que em obra as condições de mistura são, em geral, mais imperfeitas.

Para a dosagem das misturas solo-cal são normalmente determinados para cada solo os limites de consistência, a granulometria e a classificação e fazem-se ainda ensaios de compactação, de resistência e de durabilidade. Recentemente Eades e Grim (1966) propuzeram um método com base no pH. O conhecimento da composição mineralógica, expansibilidade, teores em matéria orgânica e sulfatos, capacidade de permuta catiónica, etc. poderão também contribuir para uma dosagem mais adequada, mas não são ainda de uso corrente.

Para a selecção final da mistura são geralmente usados os ensaios de resistência e durabilidade, mas os critérios mínimos seguidos são também variáveis. Nos climas frios a durabilidade é a qualidade mais exigida.

3 - ALGUNS ESTUDOS SOBRE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL REALIZADOS NO LNEC

Os estudos laboratoriais realizados no LNEC neste domínio tiveram o objectivo de analisar a acção das cals comerciais portuguesas (de natureza calcítica e dolomítica) sobre diversos tipos de solo, com vista ao aproveitamento económico, em pavimentação rodoviária, de materiais cujas características não satisfazam às especificações exigidas para a sua utilização.

Castro (1966) estudou a influência destes dois tipos de cal sobre a plasticidade, expansibilidade, granulometria, sucção e absorção e analisou ainda outros aspectos tais como a influência do tempo de cura e a capacidade de permuta catiónica.

Silva (1967) estudou a influência sobre as características de compactação e sobre a resistência à penetração medida pelo CBR.

Seguidamente se referem, muito resumidamente, os pontos com mais interesse dos trabalhos citados.

3.1 - *Escolha e identificação dos materiais*

3.1.1 - *Solos*

Para o estudo da influência da cal nas características dos solos, estes foram escolhidos com uma grande diferenciação quanto à sua natureza, variando

na classificação rodoviária desde materiais granulares [A-2-6(0)] até solos argilosos [A-7-5(20)] e cobrindo uma vasta gama de plasticidade (desde $I_p = 8$ até $I_p = 66$). Igualmente se procurou que tivessem variações volumétricas por absorção de água muito diversas, sendo coberta uma gama desde 1% até aproximadamente 45% de expansibilidade, determinada pelo método desenvolvido por Castro (1964) (LNEC E 200-1967).

Estes solos foram identificados do ponto de vista geotécnico e determinaram-se também algumas características físico-químicas julgadas com mais interesse (Quadros I e II). Fez-se ainda a identificação mineralógica da fracção argilosa ($< 2 \mu$), tendo em vista relacionar a sua natureza com a aptidão dos solos para a estabilização com cal (Figueiredo 1964). Também deste ponto de vista as amostras têm composição variada, havendo uma predominantemente caulínica com apenas alguma ilite (am. 18), uma mista de ilite e caulinite (am. 22), uma predominantemente ilítica com alguma caulinite (am. 15), duas mistas de ilite, caulinite e montmorilonite (am. 38 e 39), duas montmoriloníticas (am. 41 e 42) e duas haloisíticas (am. 2832 e 2838).

QUADRO I – Características geotécnicas dos solos

N.º da amostra	Granulometria							W _L (%)	W _p (%)	I _p (%)	Classificação rodoviária	Compactação		CBR (%)
	Seixo 60 mm a 2 mm	Areia 2 mm a 0,06 mm	Silte 0,06 mm a 0,002 mm	Argila < 0,002 mm	Porcentagens passadas nos peneiros							V _d máx. g/cm ³	W ópt. (%)	
					N.º 10 (2,00 mm)	N.º 40 (0,425 mm)	N.º 200 (0,075 mm)							
18	12	70	5	13	88	51	20	25	14	11	A-2-6 (0)	2,19	5,9	85
22	8	47	34	11	92	74	52	23	15	8	A-4 (3)	2,17	6,8	12
38	0	25	45	30	100	99	81	40	20	20	A-6 (12)	1,92	13,4	4
39	0	40	42	18	100	93	75	36	16	20	A-6 (12)	1,97	11,1	5
15	0	3	20	77	100	100	99	77	30	47	A-7-5(20)	1,56	25,9	5
42	25	52	12	11	75	43	26	45	18	27	A-2-7 (2)	2,08	7,8	19
41	27	59	9	5	73	32	15	47	25	22	A-2-7 (0)	2,06	8,5	10
2838	0	2		98	100	100	99	103	37	66	A-7-5(20)	1,47	31,5	9
2832	2	11		87	98	93	87	82	34	48	A-7-5(20)	1,57	26,0	2

QUADRO II – Características físico-químicas dos solos

N.º da amostra	Expansibilidade (%)	Capacidade de permuta catiónica (m.e./100 g)	pH	Matéria orgânica (%)	SO ₃ (%)	Composição mineralógica da fracção* argilosa (< 2 μ)			
						Caulinite	Haloisite	Ilite	Montmorilonite
18	1,4	2,41	8,7	0,04	0,10	xxx	—	x	—
22	10,3	1,15	8,8	0,04	vestg.	xx	—	xxx	—
38	18,6	4,31	8,6	0,13	vestg.	xx	—	xxx	x
39	20,8	6,82	8,6	0,17	0,00	xx	—	xxx	x
15	23,9	15,48	8,8	0,25	vestg.	x	—	xxx	—
42	21,8	7,06	8,5	0,02	0,00	vestg.	—	—	xxx
41	28,7	não det.	5,3	0,33	não det.	vestg.	—	—	xxx
2838	38,2	26,93	8,0	0,44	0,00	—	xxx	—	—
2832	44,8	31,63	6,7	2,14	0,00	—	xxx	—	—

* - (xxx) mineral de argila predominante; (xx) percentagem média; (x) percentagem baixa; (vestg.) percentagem mínima detectável pelo processo de identificação utilizado; (—) ausência (ou existência em percentagem inferior ao mínimo detectável).

3.1.2 – Cais

Procurando investigar a influência do teor e do tipo de cal escolheram-se duas cais vivas comerciais, uma calcítica e outra dolomítica.

Foram analisadas quimicamente pelos métodos correntes e a sua composição consta do Quadro III. Segundo a especificação AASHO M 16-68 a cal calcítica seria do tipo I e cal dolomítica do tipo II.

QUADRO III – Composição química das cais vivas

Natureza da cal	CaO (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CO ₂ (%)	Perda ao rubro (%)
Calcítica	85,95	0,45	0,19	0,05	0,12	1,02	12,92
Dolomítica	53,30	36,00	1,00	3,60	0,60	0,75	5,50

Como se pretendia estudar a estabilização dos solos com cal hidratada, mais conveniente do ponto de vista de facilidade de aplicação em obra, as cais foram apagadas juntando-se a água suficiente para satisfazer a sua afinidade química, obtendo-se cal calcítica hidratada e cal dolomítica monohidratada com aspecto pulverulento que, para evitar a carbonatação pelo anidrido carbónico do ar, foram conservadas em recipientes fechados até serem utilizadas. No que se segue estas cais hidratadas serão designadas abreviadamente por cal calcítica e cal dolomítica.

3.2 – Preparação das misturas

Para o estudo da influência da cal na plasticidade, expansibilidade e granulometria dos solos, cada um destes foi misturado com vários teores em cal e com a quantidade de água suficiente para conferir à mistura o teor em água correspondente ao teor óptimo para compactação previamente determinado.

O solo e a cal, convenientemente desagregados, foram misturados nas proporções desejadas, calculadas a partir do conhecimento dos seus teores em água, previamente determinados antes de cada mistura. Adicionou-se em seguida a água necessária, calculada tendo em conta a existente nos materiais. Após perfeita homogeneização as misturas foram colocadas em cura numa câmara saturada, durante 7 dias, para que se processasse a reacção do solo com a cal.

Terminado o tempo de cura, as misturas foram secas em estufa a 60° C.

3.3 – Influência da cal na plasticidade dos solos

Para a análise desta influência determinaram-se os limites de liquidez e de plasticidade de misturas com 1, 3, 5, 7, 10 e 15% de cada um dos tipos de cal, preparadas como ficou descrito. Na Fig. 1 apresenta-se a variação do índice de plasticidade com o teor em cal das misturas.

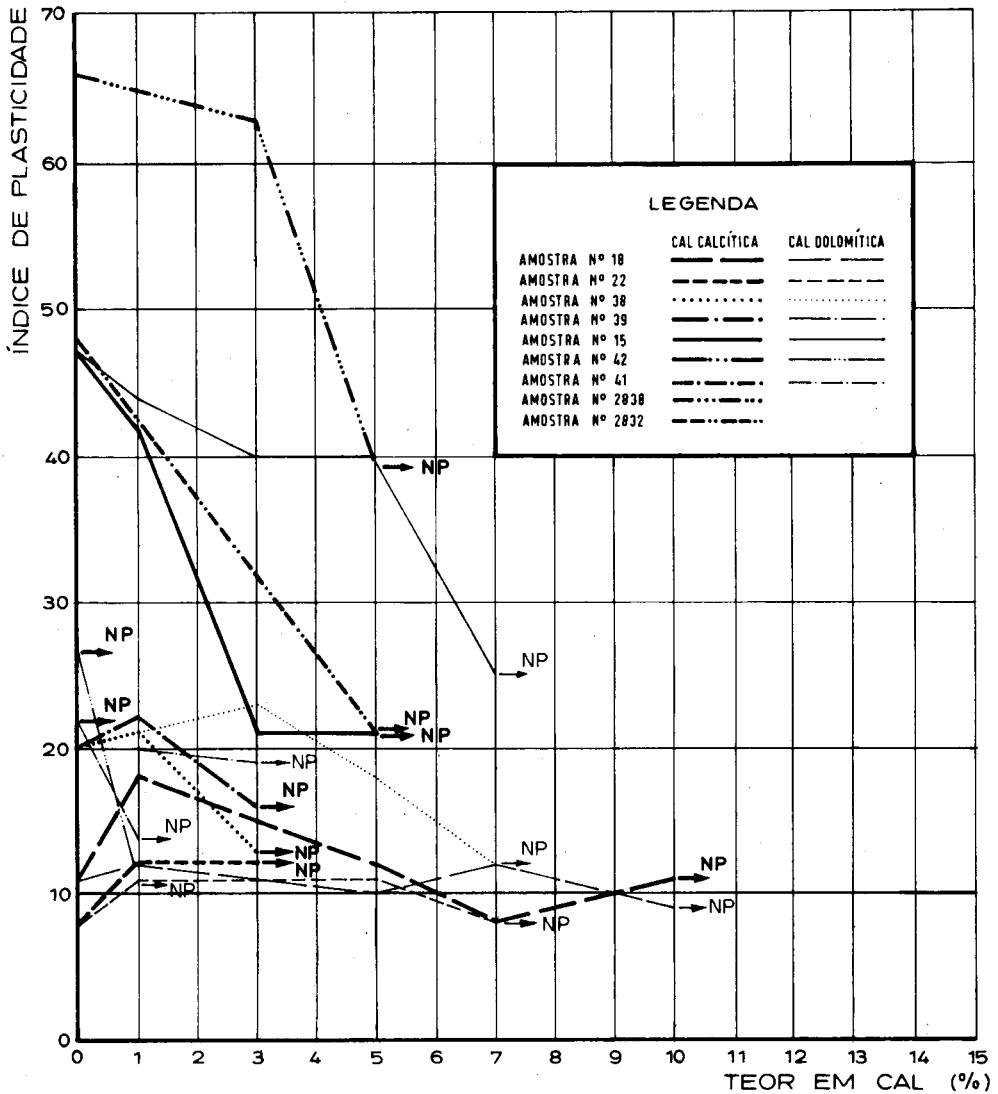


Fig. 1 – Variação do índice de plasticidade com o teor em cal

Constata-se que os solos mais beneficiados pela adição de cal são os mais plásticos. Com efeito, as amostras 2838, 2832 e 15 (I_p igual, respectivamente, a 66, 48 e 47) ficaram não plásticas com a adição de 7% de cal calcítica; as amostras 38 e 39 ($I_p = 20$) atingiram a mesma situação com 5% da mesma cal; as amostras 42 e 41, de granulometria mais grosseira mas com fracção argilosa montmorilonítica, portanto com finos em menor quantidade mas muito plásticos (I_p de 27 e 22, respectivamente), ficaram não plásticas com 1% de cal calcítica.

Pelo contrário, a cal não trouxe apreciável melhoria aos solos com reduzida plasticidade; a amostra 18 ($I_p = 11$) só ficou não plástica para o teor em cal de 15%, depois de o I_p variar entre 18 e 8 para teores em cal menores; a amostra 22 ($I_p = 8$) ficou não plástica com 5% de cal calcítica, não havendo benefício sensível no I_p para teores menores.

A redução do índice de plasticidade, quando ocorreu, foi de um modo geral motivada não só pelo aumento do W_p mas principalmente pela redução do W_L . Esta diminuição foi sobretudo acentuada nos solos com elevados limites de liquidez. Quando este era baixo (am. 18 e 22) verificou-se pelo contrário um aumento. A cal dolomítica, mostrando acção análoga à da cal calcítica, foi em geral menos activa, em igualdade de percentagem.

3.4 – *Influência da cal na expansibilidade dos solos*

Neste estudo, conduzido em paralelo com o referido em 3.3, obtiveram-se os resultados que se apresentam na Fig. 2 em que se mostra a variação da expansibilidade com o teor em cal.

Analogamente ao que se passou com a plasticidade, os solos mais expansivos sofreram redução de expansibilidade e os pouco expansivos (amostras 18 e 22) não foram melhorados ou foram prejudicados com a adição de cal.

Tendo-se determinado a redução máxima de expansibilidade de cada solo com a adição de cal (o que implicou o ensaio com teores em cal de 20 e 25% para alguns deles), relacionou-se na Fig. 3 essa redução máxima com a expansibilidade inicial do solo. Ela mostra, na medida em que o conjunto de amostras ensaiadas seja representativo, que os solos com expansibilidade de cerca de 10% não serão modificados pela adição de cal, que os que têm expansibilidade superior sofrerão reduções de expansibilidade tanto maiores quanto mais expansivos forem inicialmente, e que os de expansibilidade inferior

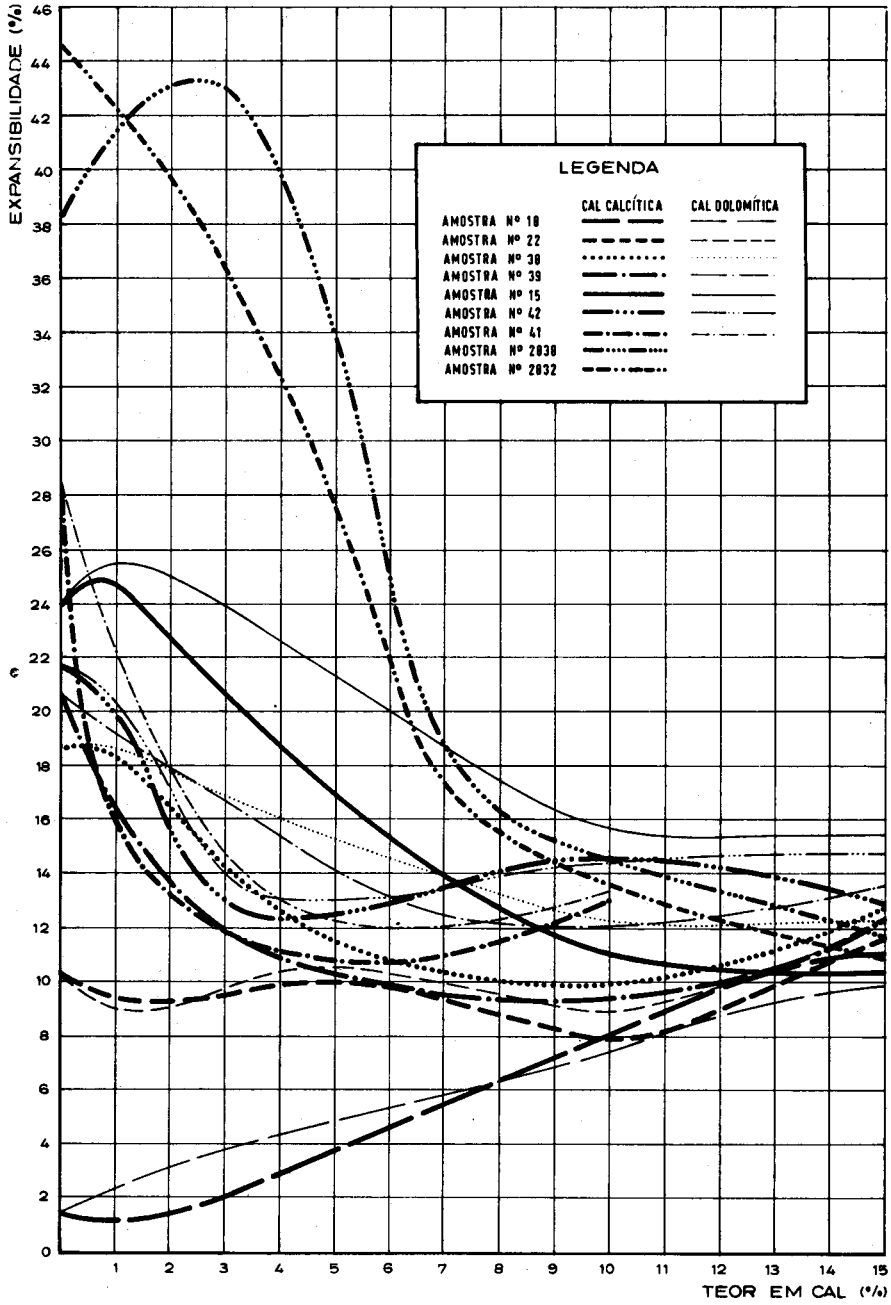


Fig. 2 - Variação da expansibilidade com o teor em cal

sofrerão aumento em vez de redução de expansibilidade. Por consequência, o tratamento com cal não terá interesse ou será contra-indicado, deste ponto de vista, para os solos com expansibilidade pouco superior, igual ou inferior a 10%.

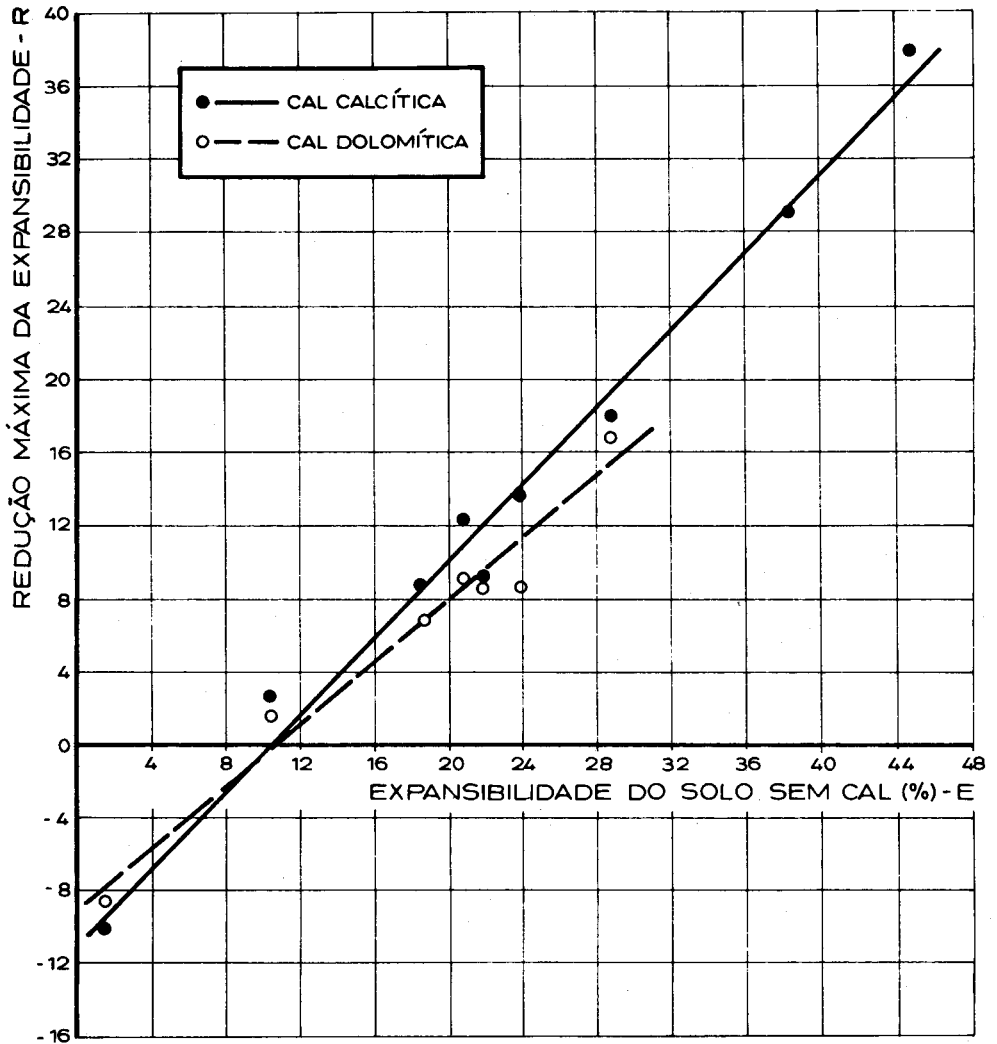


Fig.3—Relação entre a expansibilidade do solo sem cal e a variação máxima da expansibilidade pela adição de cal

Sendo E a expansibilidade do solo sem cal, a redução máxima de expansibilidade conseguível pela adição de cal calcítica (R_c) poderá ser calculada pela expressão :

$$R_c = 1,05 E - 10,9$$

e pela adição de cal dolomítica (R_d):

$$R_d = 0,84 E - 8,9$$

Experiências posteriormente realizadas em Moçambique com solos daquela província conduziram a resultados concordantes.

3.5 – *Influência da cal na granulometria dos solos*

A cal produz floculação e aglomeração das partículas finas dos solos, como se referiu, determinando modificações granulométricas que combinadas com as alterações verificadas nos limites de consistência se reflectem consideravelmente no comportamento dos solos.

A análise granulométrica do material estabilizado com cal oferece contudo certas dificuldades porque os aglomerados de partículas criados pela adição da cal não resistem à desagregação em almofariz, embora resistam em grande parte à acção da água. Para avaliar o efeito aglomerante da cal nos solos estudados, as análises granulométricas foram realizadas do seguinte modo: a mistura, preparada como se indicou em 3.2, foi imersa em água durante 4 a 5 h e depois passada na série de peneiros escolhida, sendo a fracção retida em cada um lavada com água; após secagem em estufa de todas as fracções retidas, fez-se nova peneiração, sem desagregação no almofariz.

Na Fig. 4 apresentam-se os resultados obtidos com misturas de quatro dos solos estudados e 5% de cada tipo de cal.

Como se verifica, a influência da cal na granulometria foi maior nos solos mais finos. Esta acção da cal combinada com a exercida na plasticidade conduziu a que solos do tipo A-6 e A-7-5 passassem a A-2-4 e A-2-7 (amostras 39 e 15), um solo A-4 passasse a A-1-b ou A-2-6 conforme o tipo de cal (amostra 22), enquanto a amostra 18 do tipo A-2-6 se manteve praticamente no mesmo tipo.

3.6 – *Influência do tempo de cura na acção da cal*

É geralmente admitida, na construção de bases e sub-bases de solo-cal, a conveniência em deixar a mistura solo-cal-água, não compactada, em cura

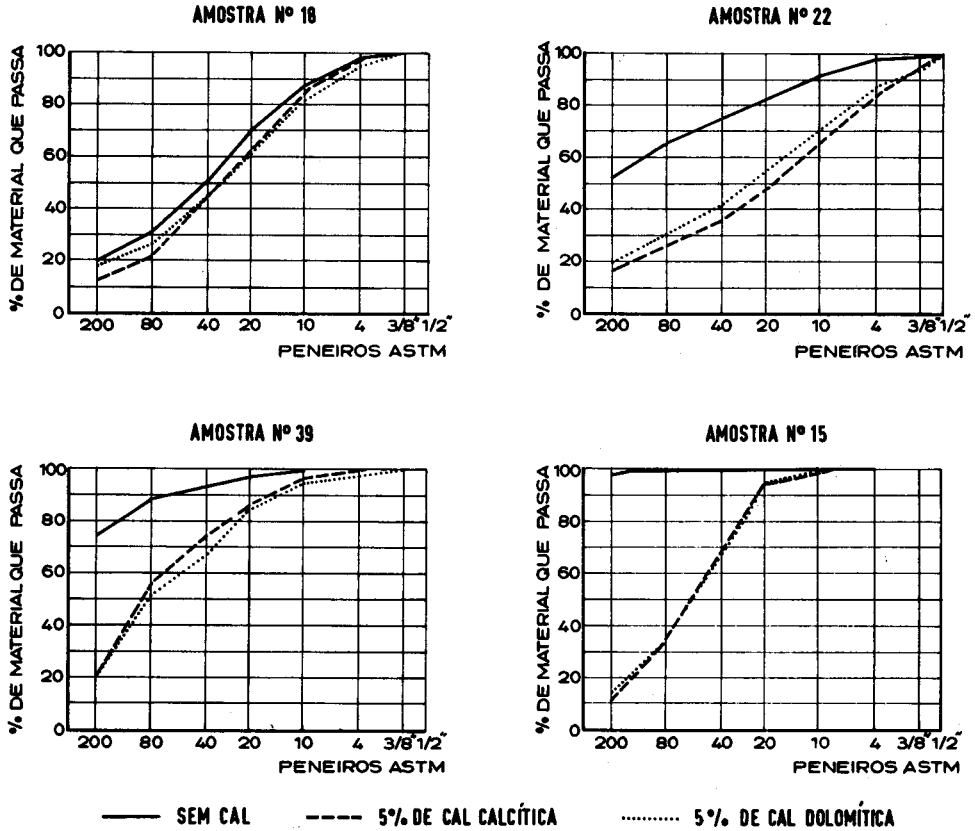


Fig. 4 - Variação da granulometria dos solos com a adição de cal

durante um a dois dias até que se torne friável e facilmente desagregável à mão. Esta cura, só necessária no caso dos solos plásticos, destina-se a permitir o processamento total ou parcial das reacções que conduzem à diminuição da plasticidade do solo.

No estudo que se vem descrevendo fixou-se "a priori" em sete dias o tempo de cura das misturas destinadas aos ensaios em que se não pretendia analisar em particular a influência da cura. Aquele intervalo de tempo permitiria, segundo se supunha, o desenvolvimento da maior parte das reacções solo-cal, e, sendo o mesmo para todos os ensaios, tornava mais fácil a relação dos resultados.

Todavia, pelo interesse de que se reveste para as aplicações práticas e para melhor se interpretem os resultados obtidos, procurou-se averiguar em que medida o tempo de cura tinha efeito nas modificações das características do solo devidas à adição da cal. Este estudo foi feito pela análise da plasticidade, expansibilidade e pH das misturas solo-cal sem cura, e ao fim de 1, 2, 4 e 7 dias de cura. Embora do ponto de vista prático isso não oferecesse interesse, fizeram-se ainda dois ensaios com longos prazos de cura (28 e 112 dias) para verificar se as tendências evidenciadas na primeira fase se confirmavam.

Verificou-se que os máximos benefícios devidos à cal tinham lugar dentro dos dois primeiros dias de cura para a cal calcítica e dentro dos primeiros quatro dias para a cal dolomítica. Para além daqueles períodos a evolução das características processava-se a ritmo muito lento e em geral correspondia a um retrocesso das modificações verificadas. Julga-se que este retrocesso se deva, pelo menos em parte, à carbonatação da cal pelo anidrido carbónico do ar, já que se não notou aquele efeito em provetes destinados a ensaios de resistência que foram parafinados após a moldação.

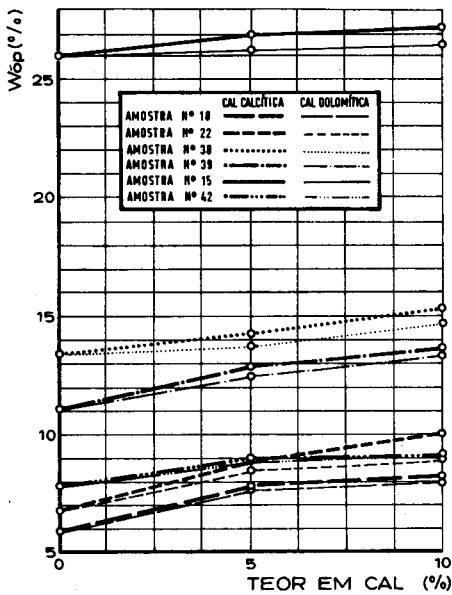


Fig. 5 - Variação do teor em água das misturas solo-cal com o teor em cal

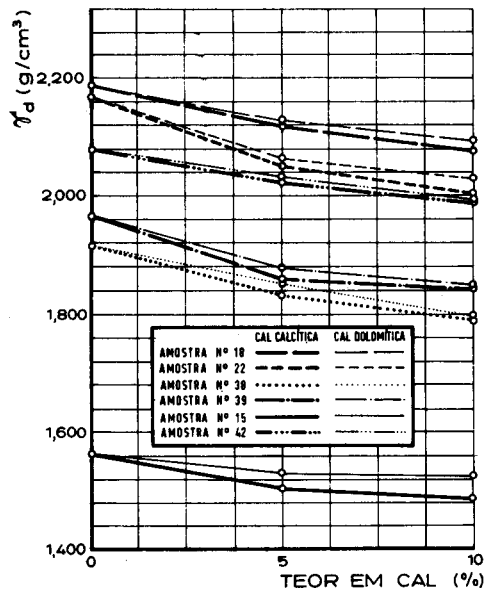


Fig. 6 - Variação do peso específico aparente seco máximo das misturas solo-cal com o teor em cal

3.7 – Influência da cal nas características de compactação dos solos

Os resultados obtidos neste estudo realizado por Silva (1967) acham-se apresentados nas Figs. 5 e 6.

Foram ensaiados 6 solos com teores em cal (calcítica e dolomítica) de 5 e 10%.

Verificou-se, em geral, um abaixamento do peso específico aparente seco máximo e um aumento do teor óptimo em água sendo maior a diferença entre os valores destas características para 0 e 5% de cal do que para 5 e 10%.

3.8 – Influência da cal na resistência dos solos

A influência da cal na resistência dos solos foi também estudada por Silva (1967) através de ensaios de CBR. Na Fig. 7 apresentam-se os resultados obtidos com 5 solos com os teores de 5 e 10% de cal calcítica e ensaiados sem cura e com cura da mistura húmida solta durante sete dias. Os provetes em qualquer dos casos foram ensaiados após quatro dias de imersão.

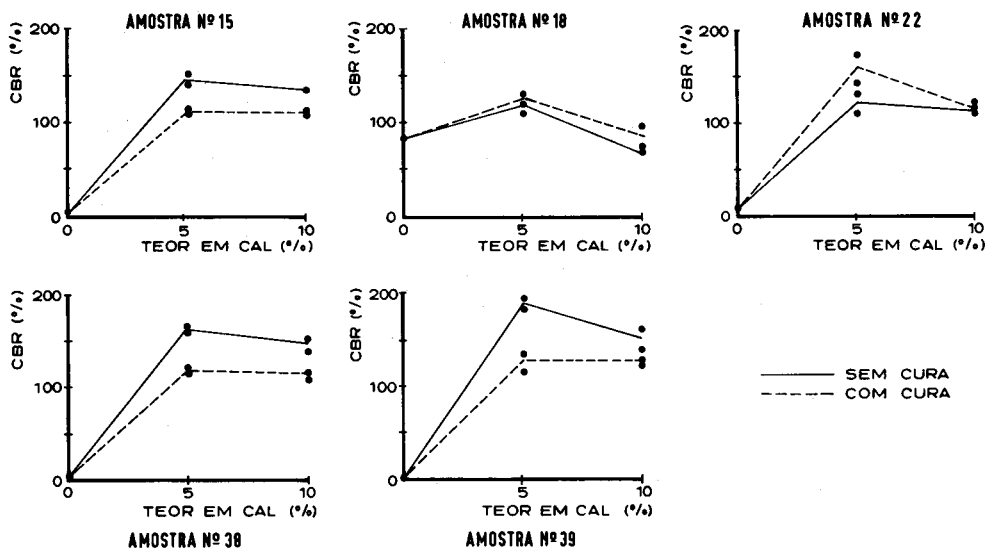


Fig. 7 – Variação do CBR das misturas solo-cal calcítica com o teor em cal

Embora o CBR não seja o ensaio mais adequado para a avaliação da resistência das misturas solo-cal (dada a rigidez destas), e o próprio autor deste estudo lhe ponha certas reservas, permite no entanto verificar uma melhoria substancial especialmente nos solos finos e plásticos. O teor em cal de 5% foi, em geral, mais vantajoso que o de 10%.

3.9 – *Alguns aspectos complementares*

Neste estudo foram ainda encarados outros aspectos da influência da cal sobre os solos.

No gráfico da Fig. 8 mostra-se, para a amostra 2832, a relação entre a expansibilidade e o teor em água da amostra com 0, 3, 5, 7 e 10% de cal. Estes valores foram obtidos fazendo vários ensaios de expansibilidade e determinando, num deles, o teor em água imediatamente após a água absorvida por capilaridade ter molhado completamente o provete, isto é ao fim do tempo de molhagem (1.º ponto), e nos outros procedendo do mesmo modo para vários valores da expansibilidade, até se atingir o seu valor máximo.

Verifica-se que, para o mesmo teor em água, a expansibilidade é tanto menor quanto maior for o teor em cal do provete. Assim, por exemplo, para 50% de teor em água a expansibilidade do solo sem cal é de aproximadamente 30%, tomando sucessivamente os valores de cerca de 26, 20, 17 e 13% para 3, 5, 7 e 10% de cal, respectivamente. Observa-se ainda que a variação da expansibilidade, desde que a amostra fica completamente molhada até que atinge a expansibilidade final, diminui progressivamente com o aumento do teor em cal. Estes mesmos resultados se obtiveram com a amostra 2838.

Também a permeabilidade dos solos pode ser muito modificada pela acção da cal; assim, a amostra 2838, muito impermeável, cujo tempo de molhagem no ensaio de expansibilidade atingia cerca de 10h, molhou ao fim de um quarto de hora quando estabilizada com 3% de cal, e apenas em minuto e meio com 10% de cal.

Na Fig. 9 mostra-se o aspecto dos provetes que serviram para a determinação da expansibilidade da amostra 2838, após secagem na estufa. Como pode verificar-se, os provetes sem cal retraíram muito mais e apresentam numerosas fendas. À medida que o teor em cal aumenta observa-se uma melhoria progressiva e com 7% já não se apresentam fendilhados.

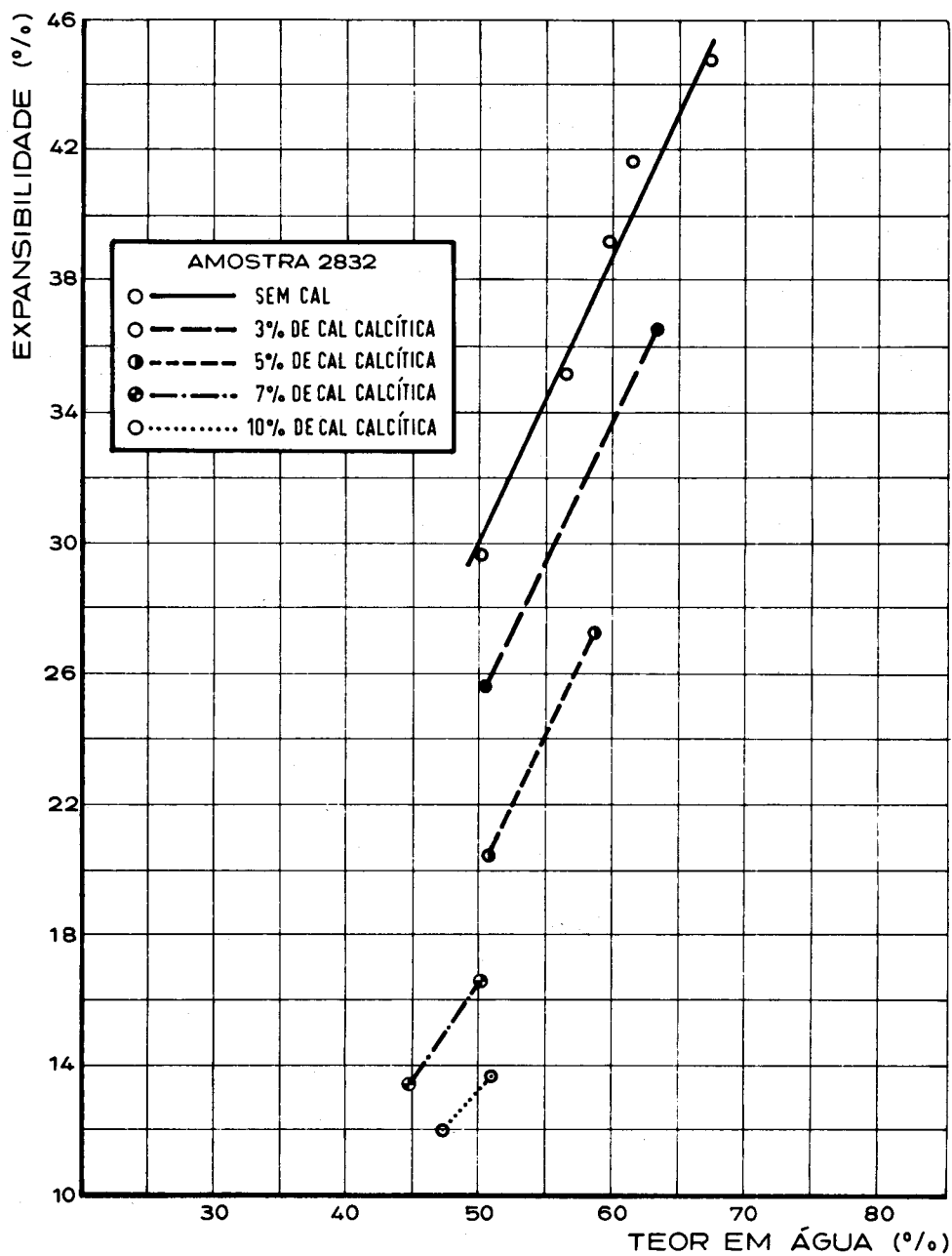


Fig. 8 – Relação entre a expansibilidade e o teor em água da amostra n.º 2832 com vários teores em cal

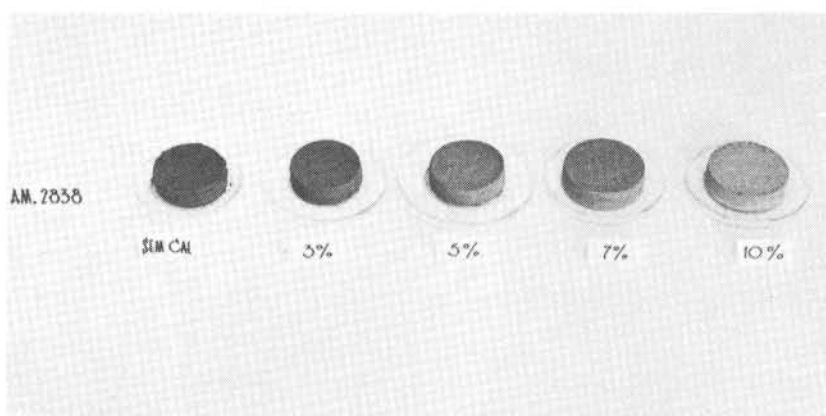


Fig. 9 – Provetes do ensaio de expansibilidade da amostra n.º 2838, com vários teores em cal, após secagem na estufa

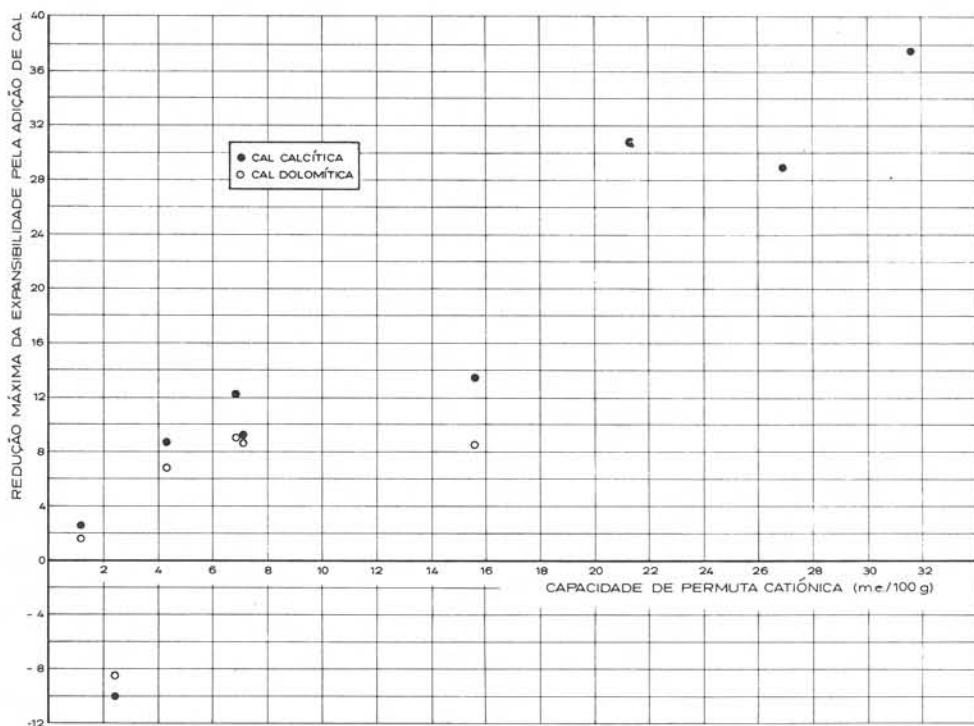


Fig. 10 – Relação entre a capacidade de permuta catiônica do solo e a variação máxima da expansibilidade pela adição de cal

A friabilidade é também muito acentuada, sendo os provetes tratados com cal muito facilmente desagregáveis.

Na Fig. 10 acha-se relacionada a capacidade de permuta catiónica com a redução máxima de expansibilidade verificada pela adição de cal calcítica e de cal dolomítica, para cada solo. Como pode observar-se, as grandes reduções de expansibilidade verificaram-se com os solos de mais elevada capacidade de permuta catiónica, o que era de esperar em face da actuação da cal sobre esta característica se processar através de reacções de permuta catiónica. Contudo, a relação não é linear.

A influência da cal na capacidade de retenção de água dos solos, estudada através da determinação das curvas de sucção dos solos sem cal e com 5% de cal calcítica ou dolomítica, foi variável, tendo-se verificado, conforme os casos, aumento ou diminuição com qualquer das cais. O sentido da variação parece estar relacionado com a natureza mineralógica da fracção argilosa.

A adição de cal, tanto calcítica como dolomítica, fez aumentar o limite de retracção de todos os solos estudados e teve uma influência variável no limite de absorção. O grau de absorção baixou em todos os casos melhorando portanto as características dos solos deste ponto de vista.

Todas as amostras incluídas neste estudo tinham baixo teor em matéria orgânica e em sulfatos, e pH básico (igual ou superior a 8), excepto a amostra 2832 com um teor em matéria orgânica um pouco mais elevado (2,14%) e pH de 6,7 possivelmente devido aos ácidos orgânicos. A homogeneidade destas características não permitiu a sua correlação com o diferente comportamento perante a acção da cal.

4 – A ESTABILIZAÇÃO COM CAL EM MOÇAMBIQUE

Em Moçambique a cal foi utilizada na pavimentação dos aeródromos do Lumbo, Vila Coutinho, Gago Coutinho e Ponta de Ouro, nos acessos à ponte sobre o Rio Maputo e sobre o Rio Save na Estrada Nacional n.º 1 (Fig. 11). No distrito do Niassa encontra-se em curso a construção de uma vasta rede de estradas em que a sub-base e a base do pavimento são constituídas por solos locais argilosos estabilizados com cal. Obviamente os melhores solos foram reservados para a base.

As Figs. 12 e 13 reportam-se a experiências efectuadas em Moçambique com dois solos argilosos típicos :

- caulinite, do distrito de Niassa
- montmorilonite, do distrito do Sul do Save.

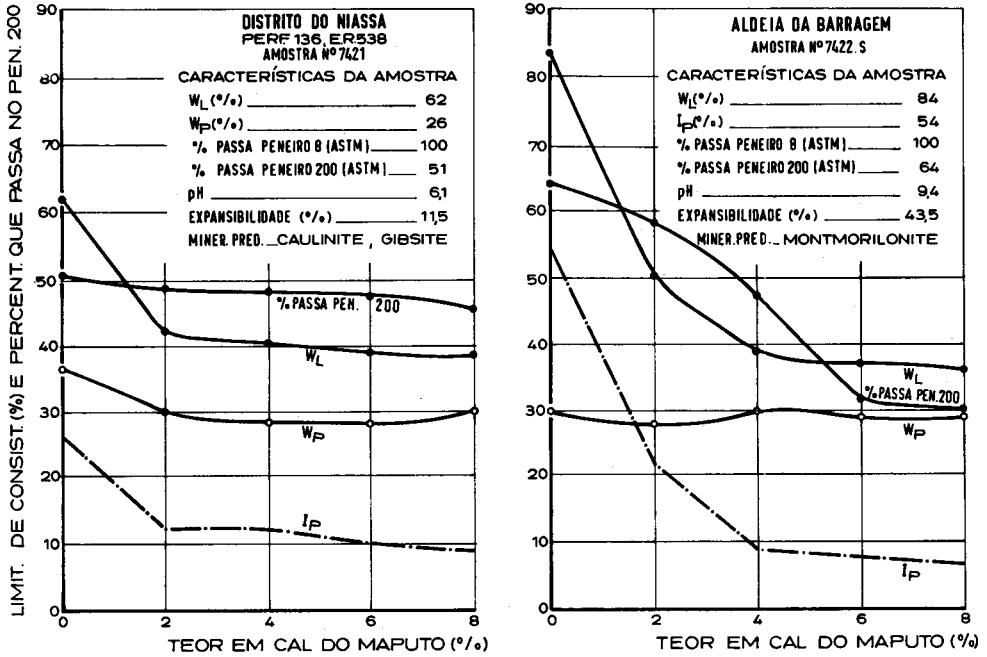
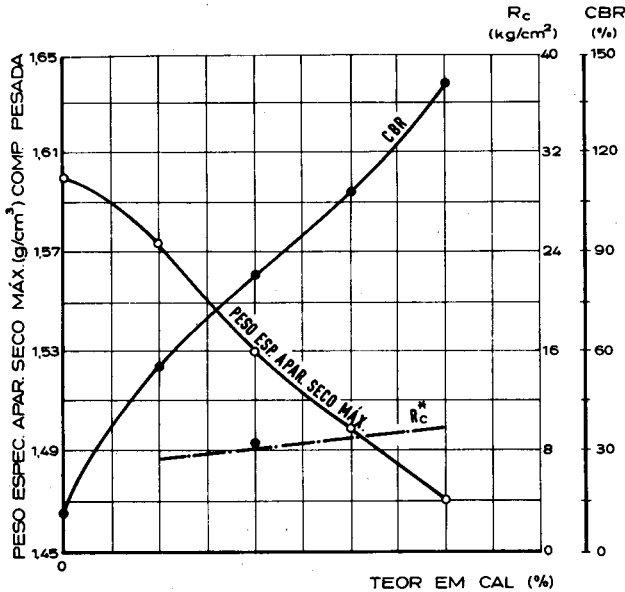


Fig. 12 - Variação dos limites de consistência e da granulometria (percentagem que passa no peneiro 200) com o teor em cal do Maputo

Nelas se apresentam resumidamente os resultados obtidos após a mistura desses solos com diversos teores em cal do Maputo.

As características dos solos encontram-se indicadas nos gráficos respectivos. Quanto à cal, o seu teor em óxido de cálcio é relativamente baixo e da ordem de 65%. A cal utilizada na construção no distrito de Niassa, oriunda da África do Sul ("Stabilime"), é preparada e ensacada especialmente para trabalhos de estabilização de solos. O seu teor é mais rico e da ordem dos 70%.

Dado o extraordinário aumento na utilização da cal, têm surgido em Moçambique pequenas indústrias que se desenvolvem à medida que as necessidades o justificam.



DISTRITO DO NIASSA
 PERFIL 136, ER 538
 AMOSTRA Nº 7421.S

CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA

W_L (‰) _____ 62
 I_P (‰) _____ 26
 % PASSA PEN. 8 (ASTM) _____ 100
 % PASSA PEN. 200 (ASTM) _____ 51
 pH _____ 6,1
 EXPANSIBILIDADE (‰) _____ 11,5
 MIN. PREDOM. CAULINITE, GIBSITE

* APÓS 7 DIAS DE CÂMARA HÚMIDA E 4 HORAS DE IMERSÃO EM ÁGUA.

Fig. 13 - Variação do peso específico aparente seco máximo, da resistência à compressão e do CBR com o teor em cal do Maputo

4.1 - Técnica de construção

A técnica de construção de bases de solo-cal utilizada em Moçambique é a recomendada pelo "Lime Stabilization Construction Manual" (1965), e os seus passos principais resumem-se seguidamente:

- Espalhamento do solo a ser estabilizado, de acordo com o perfil transversal da estrada, numa espessura que permita obter, após compactação, a espessura desejada. A plataforma onde o solo é espalhado deverá estar devidamente compactada e de acordo com o respectivo perfil transversal.

- Pulverização do solo com uma grade de discos, ou "rotavator", ou "pulvimixer".

- Espalhamento da cal, através de um espalhador mecânico ou em sacos, à taxa indicada para cada metro quadrado da base ou sub-base. A cal deverá ser misturada com o solo em menos de 4 a 6 h, a fim de evitar a sua deterioração por exposição ao ar e perdas devidas ao vento ou chuva. Poderá também ser

espalhada sob a forma de calda (“slurry”) que, geralmente, contém cerca de 30% de material sólido.

- Imediatamente a seguir ao espalhamento da cal, quando a seco, a água deverá ser adicionada até um teor ligeiramente superior ao óptimo.

- Mistura preliminar, com uma grade de discos, “rotavator”, ou “pulvimixer”. Durante a mistura deverá procurar manter-se o teor em água necessário.

- Cura preliminar de 24 a 48h para os solos plásticos. É neste intervalo que se processa a desintegração e o solo se torna friável e menos plástico. Este período poderá, por vezes, ser insuficiente para que se obtenham os resultados desejados, nomeadamente no que respeita à plasticidade. Nestas condições deverá prolongar-se a cura ou então examinarem-se as causas que poderão obrigar a aumentar o teor em cal.

- Escarificação do material e mistura final até se obter o adequado grau de pulverização. Recomenda-se que todo o material passe pelo peneiro de 25,0 mm e que 60 a 72% passe pelo peneiro de 4,75 mm (n.º 4) ASTM.

- Compactação a uma baridade igual ou superior a 95 e 98% da obtida no ensaio AASHO T 99-57, para sub-bases e bases respectivamente. Recomendam-se os cilindros pneumáticos e de rasto liso.

- Regularização com uma niveladora.

- Cura final. A cura final obtém-se com temperaturas quentes e evitando a evaporação da humidade do interior da mistura compactada. É por isso conveniente que os trabalhos de construção sejam executados no início da estação quente e se aplique uma rega betuminosa (betumes fluidificados de tipo RC-250 para solos finos e de tipo MC-30 para solos com elementos grossos ou ainda emulsões betuminosas de tipo SS-1) ou então uma camada de solos arenosos mantidos húmidos. A rega betuminosa deverá ser precedida de uma ligeira humificação da superfície de base. Durante a cura não deverá ser permitida a passagem de veículos pesados a fim de evitar a fissuração.

Na Fig. 14 pode ver-se um caso típico de fissuração na E.R. 538 no distrito de Niassa, em Moçambique, devido à falta de cura e à passagem imediata de veículos pesados.

Qualquer tipo de revestimento betuminoso deverá ser feito após a cura final.

Na Fig. 15 pode ver-se um dos trechos já executados da E.R. 538 cuja camada de desgaste é um revestimento superficial betuminoso duplo.

Fig. 14 – Um caso típico de fissuração (falta de cura e passagem imediata de veículos pesados)

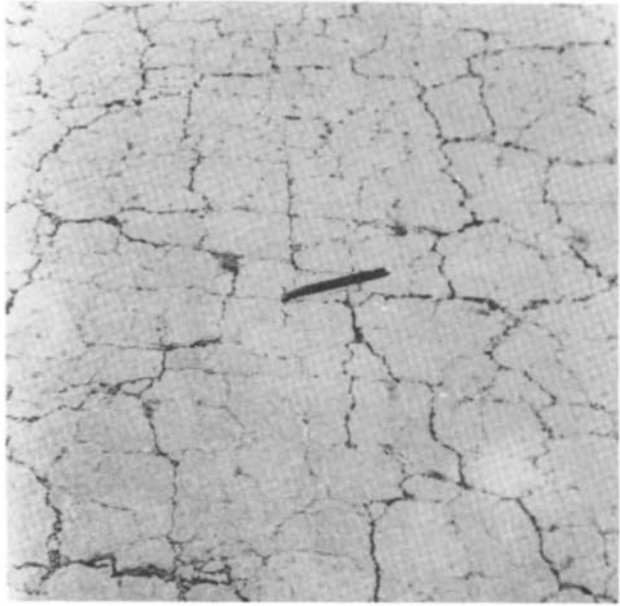


Fig. 15 – Um trecho da E.R. 538 (Niassa)

Antes da execução da camada de desgaste torna-se necessário examinar cuidadosamente a superfície da base estabilizada. É que, por vezes, em bases de solo-cal como de solo-cimento, dá-se a desagregação das partículas da superfície (Herrin e Mitchell 1961, Zalazar 1962), principalmente quando o teor em finos do material a estabilizar é elevado e as regas de aderência não são as mais adequadas. Em Moçambique houve muita oportunidade de se verificar este pormenor, que, quando não resolvido a tempo, contribui para o arrastamento da camada de desgaste. As partículas soltas deverão ser removidas antes da execução da camada de desgaste.

As referências feitas à estabilização com cal dizem respeito praticamente às misturas de cal com solo de granulometria fina. Muitas vezes, como sucede em Moçambique, na África do Sul e na Rodésia, há áreas extensas com solos contendo elementos grossos resistentes. A fracção fina é muito argilosa o que, por vezes, impede a sua utilização em bases estabilizadas mecanicamente. A vantagem da cal nestes casos é extraordinária. Uma adição de cerca de 2 a 3% melhora a fracção fina e contribui bastante para aumentar a resistência do material. Tanto na Rodésia como na África do Sul adoptam-se, por vezes sem qualquer estudo, esses teores em cal. Para a mistura, emprega-se geralmente a grade de discos. Por outro lado, sempre que se deseje estudar devidamente uma mistura recorre-se ao ensaio triaxial segundo a norma AASHO T 212-65. São adoptadas para a base apenas as curvas de classe I e classe II.

5 – CONCLUSÕES

Dos estudos laboratoriais realizados no LNEC e das aplicações de solo-cal em pavimentação de estradas e aeródromos feitas em Moçambique, ressalta o interesse que esta técnica de estabilização oferece em muitos casos e as consideráveis melhorias das características de certos solos que podem obter-se.

As principais conclusões são, muito sumariamente, as seguintes:

- A estabilização com cal é sobretudo indicada para os solos com fracção fina muito plástica e expansiva.

- Quanto à constituição mineralógica da fracção argilosa os solos com argila haloisítica, predominantemente ílítica ou montmorilonítica foram os mais beneficiados pela adição de cal calcítica ou dolomítica. Aqueles em que

a argila era em grande parte caulinitica não foram melhorados do ponto de vista plasticidade e expansibilidade, e a capacidade de suporte medida pelo CBR também sofreu menor incremento.

- O ensaio de expansibilidade parece permitir avaliar a aptidão de um solo a ser estabilizado pela cal, tendo-se encontrado relações lineares entre a expansibilidade do solo sem cal e a redução máxima de expansibilidade conseguível pela adição de cal calcítica ou dolomítica. Essas equações de regressão mostraram que o tratamento com cal só terá interesse (do ponto de vista da plasticidade e da expansibilidade) para os solos com mais de 10% de expansibilidade, sendo contra indicado nos solos com expansibilidade inferior. (É de notar que estes últimos se comportam geralmente bem nas aplicações rodoviárias).

- O tempo de cura necessário para que se dê a redução da plasticidade e expansibilidade situou-se para a cal calcítica nos primeiros dois dias e para cal dolomítica nos primeiros quatro dias.

- A adição da cal tem importante influência na granulometria dos solos argilosos provocando significativas floculações e aglomerações das partículas finas. Nos solos de granulometria grosseira esta influência é muito reduzida.

- O efeito da cal na capacidade de retenção de água dos solos, estudada através das curvas de sucção, foi variável. O sentido da variação parece estar relacionado com a natureza mineralógica da fracção argilosa.

- A adição de cal fez aumentar o limite de retracção de qualquer dos solos, teve influência variável no limite de absorção e fez baixar o grau de absorção.

- Os solos de mais elevada capacidade de permuta catiónica foram os mais beneficiados pela acção da cal.

- Nas características de compactação o efeito da cal traduziu-se numa diminuição do peso específico aparente seco máximo e num aumento do teor óptimo em água.

- A acção da cal conduziu a considerável elevação dos valores do CBR dos solos mais finos e plásticos. Nos solos mais grosseiros e menos plásticos com CBR alto, não teve repercussão tão acentuada.

- A cal calcítica mostrou-se, de um modo geral, mais eficaz do que a cal dolomítica quando empregada na mesma percentagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHO STANDARD M 216-68 - Standard Specification for Lime for Soil Stabilization, Washington, American Association of State Highway Officials, 1970.
- AASHO STANDARD T 220-66 - Standard Method of Determination of the Strength of Soil-Lime Mixtures. Washington, American Association of State Highway Officials, 1970.
- AASHO STANDARD T 232-70 - Determination of Lime Content in Lime-Treated Soils by Titration, Washington, American Association of State Highway Officials, 1970.
- ARMAN, A. - A Definition of Organic Soils - An Engineering Identification, Louisiana State University, Engineering Research Bull. No. 101, 1969.
- BRANCO, F. E. F.; CASTRO, E. de; SILVA, D. P. da - Elementos para o dimensionamento de bases e sub-bases de solo-cal, 2.^{as} Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, S. Paulo, 1967.
- BRITISH STANDARD BS 1924: 1967 - Methods of Test Stabilized Soils, London, British Standards Institution, 1967.
- CALIFORNIA STANDARD SPECIFICATIONS SECTION 24 - Lime Treatment, State of California Business and Transportation Agency, Department of Public Works, Division of Highway, 1971.
- CARTMELL, H. S.; BERG, A. O. - Lime Stabilization of Soils for Use as Road Construction of Low-cost Roads in N. Rhodesia, N. Rhodesia, Road Research Overseas Bull. No. 9, 1958.
- CASTRO, E. de - Estudos relativos à estabilização de solos com cal, 3.^o relatório, Proc.^o 52/1/925, Lisboa, LNEC, 1966.
- CASTRO, E. de - Estudos relativos à estabilização de solos com cal. Trabalho apresentado ao II Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias, no Rio de Janeiro, entre 5 e 10 de Setembro de 1966, Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1969 (Publicação 347).
- CASTRO, E. de - Solo-cal. Mecanismo da estabilização. Modificação das características. Dosagem. Especificações, Curso de Especialização 108, Estabilização de Solos, Lisboa, LNEC, 1970.
- CASTRO, E. de - Materiais de pavimentação - Solos estabilizados com cal, cloretos e outros produtos químicos, Curso de especialização C - 139, Pavimentos Rodoviários, Lisboa, LNEC, 1972.
- CASTRO, E. de - Soil Swelling Test, Lisboa, LNEC, 1964. Memória N.^o 235 (Comunicação à Third Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Salisbury, 1963).
- XIV^o CONGRÈS MONDIAL PRAGUE 1971 - Comité des essais de materiaux routiers - Rappo., Association Internationale Permanente des Congrès de la Route, Paris, 1971.
- DEPARTMENT OF WORKS, COMMONWEALTH OF AUSTRALIA - Procedures for the Preparation and Testing of Lime-Stabilized Soils. Melbourne, Department of Works, 1964 (Technical Instructions n.^o 4 A.106).

- DUMBLETON, M. J. - Lime-Stabilized Soil for Road Construction in Great Britain, Roads and Road Construction, London, November, 1962.
- EADES, J. L.; GRIM, R. E. - A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization, Washington, HRB, 1966 (Highway Research Record No. 139).
- ESPECIFICAÇÃO LNEC E 200-1967 - Solos. Ensaio de Expansibilidade, Lisboa, LNEC, 1967.
- FIGUEIREDO, M. O. - Estudo mineralógico, por difracção de raios X e termogravimetria, de algumas argilas extraídas de solos, Lisboa, LNEC, 1964.
- HERRIN, M.; MITCHELL, H. - Lime-Soil Mixtures, Washington, HRB, 1961 (Bull. 304).
- LUÍS, A. S. - Estabilização com cal - Breve referência ao seu emprego em Moçambique, Colóquio realizado no LNEC, 1972.
- MANUAL AFM 88-51, 1966.
- NATIONAL LIME ASSOCIATION - Lime-Stabilization Construction Manual, Washington, National Lime Association, 1965, (Bull. 326).
- SABS STANDARD 824-1967 - Standard Specification for Lime for Stabilization, Pretoria, South African Bureau of Standards, 1967.
- SILVA, D. P. da - Estudos das características de compactação e CBR de solos estabilizados com cal, 4.º relatório Proc.º 52/1/925, Lisboa, LNEC, 1967.
- ZALAZAR, L. M. - Asphalt Pavement in Southwestern Santa Fé Province (Argentina), First Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1962.