

Avaliação do tempo de cura na resistência ao cisalhamento de misturas solo-emulsão com teores de emulsão superiores a 10%

Stabilization of sandy soil with high contents of asphalt emulsion and the influence of curing time on the shear strength of the mixture

Natália Jéssica Canuto Oliveira Brito¹, Silvrano Adonias Dantas Neto¹, Paulo Mateus Barros Rodrigues¹ , Jannyne Correia Girão de Oliveira²

¹Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Campus do Pici, Bloco 713, 1º andar, 60440-970, Fortaleza, CE, Brasil.

²Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Bloco 713, 1º andar, 60440-970, Fortaleza, CE, Brasil.

e-mail: nataliacanuto@gmail.com, silvrano@ufc.br, jannynecorreia@alu.ufc.br

RESUMO

Neste artigo avaliou-se o efeito do processo de cura na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso misturado com teores de emulsão superiores a 10% em massa. A metodologia consistiu na coleta e caracterização do solo, caracterização da emulsão, compactação das misturas, cura dos corpos de prova por exposição ao ar por 1, 7 e 28 dias, e realização de ensaios de compressão triaxial em condições saturadas e não saturadas. Evidenciou-se que o aumento do tempo de cura ocasionou uma diminuição da massa específica aparente dos corpos de prova em razão da diminuição do teor de umidade devido à evaporação da água de constituição da emulsão. Os resultados dos ensaios realizados em condições saturadas indicaram não haver influência do tempo de cura na resistência ao cisalhamento. Já nos corpos de prova sem saturação, o aumento do tempo de cura produziu um aumento no valor do intercepto coesivo das misturas, mais pelo incremento da sucção do que pelo aumento da capacidade de ligação entre os grãos minerais. Em todos os casos, a adição de altos teores de emulsão asfáltica provocou um aumento no intercepto coesivo e diminuição do ângulo de atrito nos corpos de prova ensaiados com e sem saturação.

Palavras-chave: Cura; Solo-emulsão; Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the effect of the curing process on the shear strength of mixtures of a sandy soil and high levels of emulsion (higher than 10% in weight). The adopted methodology consisted of collecting and characterizing the sandy soil, characterizing the asphaltic emulsion, compacting the mixtures, curing the specimens by exposure to air for 1, 7, and 28 days, and performing triaxial compression tests under saturated and unsaturated conditions. The results showed that the increase in the curing time caused a gradual decrease in the apparent specific gravity of the specimens due to the decrease in the moisture content caused by the evaporation of the water in the asphaltic emulsion. The results of tests carried out in saturated conditions indicated that there is no influence of the curing time of the specimens on their shear strength. In the specimens tested without saturation, the increase in the curing time produced a significant increase in the value of cohesive intercept of mixtures, more due to the increase in suction than to the increase in the bonding capacity between the soil grains. In all cases, the addition of asphalt emulsion contents higher than 10% caused an expressive increase in the cohesive intercept and a decrease in the friction angle in the specimens tested with and without saturation.

Keywords: Curing; Soil-emulsion; Shearing strength.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais betuminosos podem ser aplicados de diferentes maneiras na estabilização de solos, podendo-se citar entre eles o cimento asfáltico de petróleo, o asfalto diluído e a emulsão asfáltica [1]. Destes, os asfaltos diluídos e as emulsões asfálticas são os materiais mais usuais na estabilização asfáltica dos solos, por não necessitarem de aquecimento para a sua fluidificação e por se encontrarem em estado líquido em temperatura ambiente [2]. Aqui, destaca-se a emulsão asfáltica como sendo a mais utilizada na estabilização de solos empregados em camadas de sub-base e base de pavimentos [3]. Na pavimentação, a técnica de estabilização de solos com a adição da emulsão asfáltica tem por objetivo promover mudanças no solo estabilizado, como a diminuição da permeabilidade, aumento da durabilidade das camadas dos pavimentos, melhora da resistência pela ação coesiva proporcionada pela ação ligante asfáltico e também a proporcionar uma maior capacidade de resistir à ação de intempéries [4–8].

Por outro lado, pesquisas com a aplicação de emulsão asfáltica, na área de geotecnia, para estabilização de solos a serem empregados na construção de barragens de terra, aterros em geral, e na impermeabilização de aterros sanitários, são escassas [3], fazendo com que seja cada vez mais necessário o desenvolvimento de novos estudos que permitam a definição das condições de utilização e dos benefícios da estabilização de solos para tais aplicações com materiais betuminosos.

Dentre os estudos mais específicos sobre a estabilização de solos com emulsão asfáltica podem ser citados os trabalhos de Jacintho [9], Jacintho [10], Lima *et al.* [11], Pereira [12] e Dantas Neto *et al.* [13].

Jacyntho [9, 10] avaliou o comportamento mecânico e hidráulico das misturas solo-emulsão. Os solos estudados por Jacintho [9] foram uma areia argilosa (SC), uma areia (SM) e um solo residual (GC), já Jacintho [10] avaliou a adição de emulsão asfáltica em uma areia argilosa (SM), areia argilosa (SC) e em um solo argiloso (CL). Entretanto, a autora obteve resultados considerados inconclusos e inconsistentes, possivelmente, em razão dos baixos teores de emulsão asfáltica utilizados na sua pesquisa, que variavam 0% até 8%, e que ocasionaram o aumento da macroporosidade nas misturas estudadas devido à formação de grumos entre as frações finas dos solos estudados e o ligante asfáltico residual.

Lima *et al.* [11], Pereira [12] e Dantas Neto *et al.* [13] estudaram as características da mistura solo-emulsão para elevados teores de emulsão asfáltica, variando entre 13% e 31%, com o intuito de minimizar a heterogeneidade que ocorria quando eram utilizados baixos teores, os quais ocasionavam uma macroporosidade que muitas vezes prejudicava o comportamento do material estabilizado [9].

Os autores procuraram analisar os efeitos que um maior teor de emulsão ocasionaria na compactação e no comportamento mecânico e hidráulico das misturas. Lima *et al.* [11] avaliou o processo de dosagem dos altos teores de emulsão asfáltica, buscando uma maior homogeneidade da mistura, em razão da alta quantidade emulsão asfáltica adicionada ao solo, que variava entre 13% e 31%. Dantas Neto *et al.* [13] avaliaram o comportamento das misturas solo-emulsão, com teores de emulsão asfáltica variando entre 13% e 28%, em massa, dando ênfase as propriedades de permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Os autores observaram um aumento da coesão da mistura, além da diminuição da sua permeabilidade. Estes resultados foram coerentes diante do esperado para a estabilização de solos com materiais betuminosos.

Um fator extremamente importante na utilização da emulsão asfáltica em estabilização de solos é que após mistura desta com as partículas minerais, o processo de ruptura da começa a ocorrer [14]. A ruptura da emulsão asfáltica, trata-se do processo no qual a água de dispersão evapora e ocorre a cobertura da superfície dos agregados com o asfalto residual. Tal fase, é de suma importância na análise do ganho de resistência com a adição de emulsão asfáltica [9, 4, 7]. Após realização da compactação da mistura solo-emulsão, inicia-se o processo de cura, o qual só estará completo quando a emulsão asfáltica estiver totalmente rompida [6].

A ruptura também pode ser entendida como a união, coalescência, das gotículas de cimento asfáltico de petróleo (CAP) que estão dispersas na água, logo após o processo de compactação da mistura solo-emulsão. Já a cura da emulsão asfáltica, pode ser definida como a continuação da perda de água, que ocorre simultaneamente com a estabilização do processo de ruptura [7].

Diante disto, tal trabalho tem o objetivo de estudar a influência da adição de altos teores de emulsão, variando entre 10% e 22%, nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo granular avaliados por meio de ensaios de compressão triaxial, como também avaliar o efeito do tempo de cura das misturas solo-emulsão na sua resistência ao cisalhamento em condições saturadas e não saturadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Amostras de solo

Para realização deste artigo foram estudadas duas amostras de solo arenoso classificado, de acordo com os critérios do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como uma areia siltosa (SM). A Tabela 1

Tabela 1: Resumo dos parâmetros geotécnicos das amostras de solo utilizadas no estudo.

PARÂMETROS	RESULTADOS
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,85
Umidade ótima (%)	9,65
Limite de liquidez (%)	NL
Índice de plasticidade (%)	NP
Densidade real do solo	2,64

Tabela 2: Especificações e parâmetros obtidos para a emulsão RL-1C utilizada.

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÕES - IBP/ABNT	RESULTADOS
Viscosidade “Saybolt-Furoi”, sSF, a 50°C	Máx. 70	44
Peneiração, 0,84 mm, % em peso	Máx. 0,10	0,01
Resíduo, % em peso	Mín. 60	63,20

apresenta os valores médios dos parâmetros geotécnicos das amostras utilizadas na confecção das misturas solo-emulsão, obtidas a partir das seguintes metodologias de ensaio: NBR 6457 [15], NBR 6459 [16], NBR 7180 [17], NBR 7181 [18], NBR 7182 [19], NBR 12770 [20], DNER – ME 093 [21].

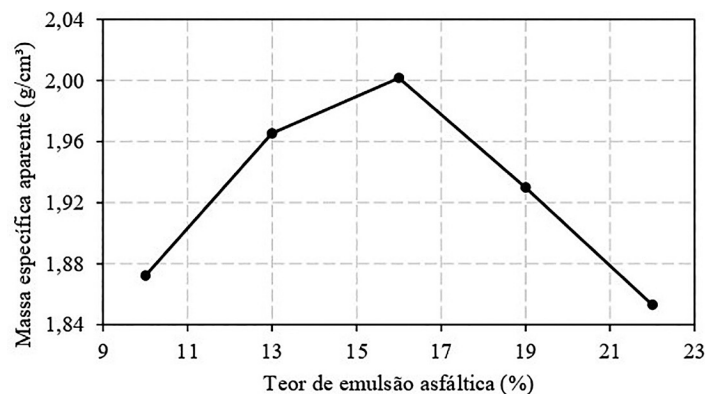
2.2. Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica escolhida para ser aplicada nas misturas estudadas foi do tipo catiônica de ruptura lenta (RL-1C). As especificações do material, assim como os resultados dos ensaios de caracterização realizados, de acordo com as recomendações da NBR 581 [22], NBR 609 [23] e NBR 6568 [24], estão expostos na Tabela 2.

A escolha da emulsão asfáltica de ruptura lenta foi dada em razão da necessidade de um tempo suficiente para o revestimento dos agregados pelo ligante asfáltico, durante da mistura dos materiais, sem que houvesse a ruptura da emulsão. Procedimento este também adotado nos trabalhos de Lima et al.[11], Pereira [12] e Dantas Neto et al. [13].

2.3. Preparação e compactação das misturas solo-emulsão

O procedimento empregado para a etapa de mistura, entre o solo e os altos teores de emulsão asfáltica, foi o mesmo definido nos estudos de Lima [3], Pereira [12] e Dantas Neto et al. [13]. A faixa de teores de emulsão aplicados variou entre 10% e 22%. Na confecção dos corpos-de-prova foi adotado a metodologia de compactação Marshall. Esta escolha foi feita, pois nos estudos prévios já citados [3, 12, 13] as condições de compactação mais eficientes foram obtidas para tal metodologia, que segue as recomendações da norma DNER – ME 107 [25]. A compactação feita imediatamente após a mistura entre o solo e a emulsão asfáltica (Mistura MI). Na Figura 1 é apresentada a curva de compactação da mistura MI, a partir da qual observa-se que a massa específica aparente máxima foi de 2,00 g/cm³ para o teor de emulsão de 16%.


Figura 1: Curva de compactação do solo em estudo – Energia Proctor Normal.

2.4. Confeção dos corpos de prova e definição dos tempos de cura para os ensaios de resistência à compressão triaxial

As condições para a confecção dos corpos de prova de solo - emulsão, a serem ensaiados na prensa triaxial, foram determinadas a partir dos resultados obtidos na curva de compactação. Sendo estes executados nas condições de teor de emulsão ótimo, em função da massa específica aparente máxima.

As compactações destes corpos de prova foram realizadas dinamicamente no compactador MCT (Miniatura Compactador Tropical), cujo martelo do equipamento possui o peso de 2270g e uma altura de queda de 305 mm. A amostra de solo - emulsão era colocada em um molde metálico devidamente lubrificado e eram aplicados golpes a este material até que a massa específica definida no ensaio de compactação fosse atingida (Figura 2).

No total, foram realizadas 4 camadas com 25 mm de espessura, aproximadamente, nas quais eram aplicados 50 golpes em cada, totalizando 200 golpes no corpo de prova. Para garantir uma ligação eficiente entre as camadas, fornecendo ao material uma condição de maior homogeneidade, foram realizadas ranhuras superficiais no término de cada uma delas.

Para os corpos de prova compostos apenas de solo, a compactação foi realizada de forma semelhante ao descrito anteriormente, mas com o objetivo de alcançar o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima, obtidos no ensaio de compactação do solo. Entretanto, a quantidade de golpes e de camadas eram inferiores ao da mistura solo-emulsão, sendo realizadas apenas duas camadas de 50 golpes, totalizando 100 golpes no corpo de prova.

Os corpos de prova das misturas solo-emulsão (MI) foram expostos ao ar livre (Figura 3), com o intuito de que ocorressem os processos de ruptura da emulsão asfáltica e cura da mistura, para que fosse possível a evaporação da água de dispersão e assim se desse a formação do filme betuminoso sobre as partículas minerais. Foram adotados três tempos distintos de cura, sendo estes: 1 (um), 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias, com o objetivo de analisar até qual período os processos de ruptura e cura interferem na resistência à compressão triaxial do material.

2.5. Ensaios de compressão triaxial

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados tanto em corpos de prova sob condições saturadas como não saturadas, mesmo sem haver controle de sucção. As tensões de confinamento para os corpos de prova saturados foram de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, devido às limitações do equipamento. Já as tensões para os corpos de prova não saturados foram de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.



Figura 2: Processo de compactação dos corpos de prova.



Figura 3: Corpos de prova após compactados e expostos ao ar livre.

Para as amostras ensaiadas em condições saturadas, os ensaios de compressão triaxial foram do tipo consolidado isotropicamente e não-drenado (CIU) e os procedimentos adotados seguiram as recomendações dadas por Head [26]. A escolha do tipo do ensaio CIU, ocorreu devido ao fato de as misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica apresentarem baixos valores de permeabilidade, conforme apresentado por Pereira [12], fazendo com que a ruptura fosse realizada em condições não-drenadas.

Na condição não saturada, os corpos de prova foram montados na célula de carga de maneira semelhante à condição saturada, porém, neste caso, não houve saturação prévia das linhas de drenagem, do próprio corpo de prova, aplicação de contrapressão e nem o processo de adensamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos índices físicos para todas as misturas de solo – emulsão asfáltica compactadas imediatamente após a confecção e submetidas ao ensaio de compressão triaxial CIU, sob condições saturadas e não saturadas.

Observa-se, para as misturas ensaiadas, que com o aumento do tempo de cura houve uma diminuição gradual da massa específica aparente final (ρ_{final}), em razão da diminuição do teor de umidade dos corpos de prova. O intervalo de variação do teor de umidade se deu entre 4,62%, para o menor tempo de cura (1 dia), até 6,35%, para o maior período de cura (28 dias), e foi ocasionado pela ruptura da emulsão após contato com os grãos minerais constituintes do solo.

Nas Figuras 4, 5 e 6 são expostas as curvas de ruptura que mostram a variação da tensão desvio com a deformação axial obtidas nos ensaios triaxiais CIU, para as tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, realizados no solo compactado na condição saturada e nas misturas entre o solo – emulsão asfálticas nas condições saturadas e não-saturadas.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4, 5 e 6, é possível observar que nas condições saturadas não há uma influência do tempo de cura no comportamento cisalhante e nas rigidezes das misturas, já que os resultados obtidos nos ensaios foram bastantes semelhantes para todos os níveis de deformação axial induzidos nos corpos de prova. A não existência de tal influência pode ser justificada pelo fato de que no ensaio triaxial CIU, não havendo drenagem dos corpos de prova durante o processo de ruptura, a geração de porpressões prejudica a interação entre os grãos de solo e o ligante asfáltico.

Ainda em relação à comparação entre os resultados obtidos nos ensaios saturados, verifica-se que o solo puro apresentou um comportamento tensão x deformação do tipo elastoplástico com endurecimento, enquanto, as misturas solo-emulsão apresentaram um comportamento semelhante àquele de materiais elástico perfeitamente-plástico. O comportamento elastoplástico com endurecimento do solo compactado pode ser atribuído às

Tabela 3: Índices físicos das misturas solo-emulsão estudadas.

TEMPO DE CURA	w _{inicial} (%)	w _{final} (%)	$\rho_{inicial}$ (G/CM ³)	ρ_{final} (G/CM ³)
01 dia - MI	6,90	2,28	2,00	1,91
07 dias - MI	6,65	0,79	2,00	1,89
28 dias - MI	6,71	0,36	2,00	1,88

Onde: w_{inicial} = teor de umidade inicial; w_{final} = teor de umidade final; $\rho_{inicial}$ = massa específica aparente inicial; ρ_{final} = massa específica aparente final.

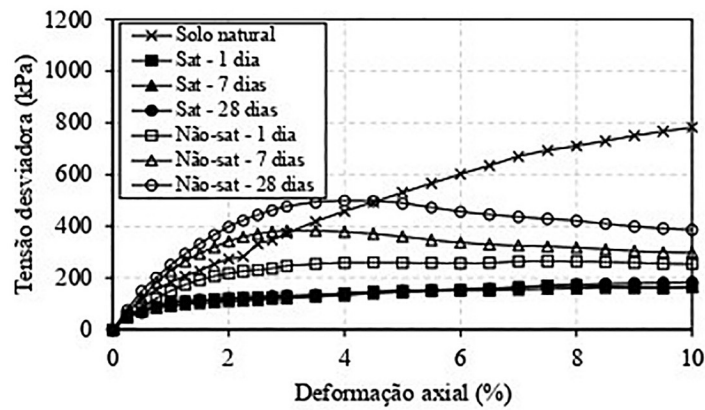


Figura 4: Misturas MI - Curvas de ruptura – $\sigma_3 = 50$ kPa.

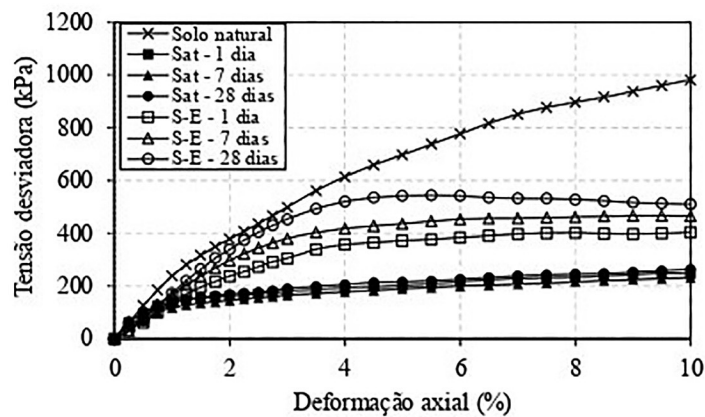


Figura 5: Misturas MI - Curvas de ruptura – $\sigma_3 = 100$ kPa.

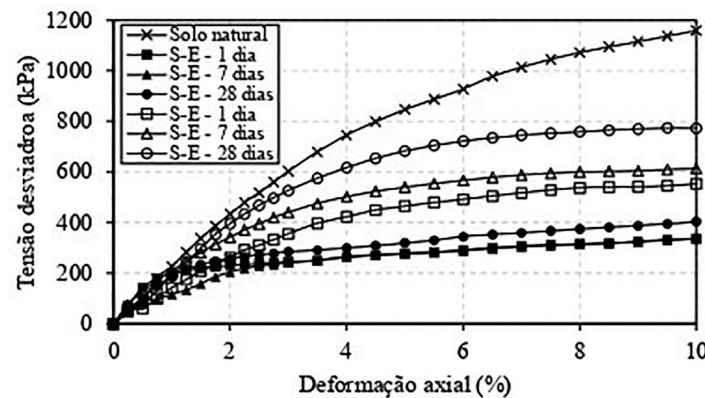


Figura 6: Misturas MI - Curvas de ruptura – $\sigma_3 = 200$ kPa.

suas características granulométricas, uma vez que trata-se de um material com grande percentual de areia fina e silte, enquanto que para as misturas solo-emulsão o comportamento elástico perfeitamente plástico pode ser atribuído, também, às interações entre o ligante asfáltico residual e grãos de solo, que ficam prejudicadas quando da ruptura dos corpos de prova sob geração de poropressões, fazendo com que o material, após a plastificação, não apresente mais qualquer capacidade de receber os carregamentos aplicados.

Com relação aos corpos de prova ensaiados sob condições são saturadas, os resultados mostram que inicialmente houve um aumento da resistência ao cisalhamento, se comparada com aquela apresentada para os corpos de prova ensaiados de forma saturada, o que é explicado pela presença e ação da sucção mátrica sempre que o material é ensaiado em condição não-saturado. Além disto, verifica-se que houve um aumento da tensão

desvio de pico com o tempo de cura. Este aumento das tensões desvio de pico com o tempo de cura, que expressa também um aumento da resistência ao cisalhamento do material para todas as tensões de confinamento aplicadas, pode ser atribuído ao efeito combinado da ação ligante do betume residual e da sucção mátrica atuantes nos corpos de prova ensaiados com teores de umidade menores, conforme pode ser comprovado nos resultados apresentados na Tabela 3.

Em sua pesquisa, Pereira [12] também observou que em misturas entre solo e emulsão asfálticas, com teores variando entre 13% e 28%, confeccionadas em condições muito semelhantes àquelas dos corpos-de-prova cujos resultados são apresentados entre as Figuras 4 e 5, submetidas a ensaios de cisalhamento direto sob condições não saturadas, também apresentaram um aumento da resistência ao cisalhamento em comparação à misturas ensaiadas em condições saturadas. Este autor atribuiu este aumento da resistência ao cisalhamento em relação às misturas ensaiadas de forma não saturada à sucção mátrica existente nos corpos de prova ensaiados de forma não saturados. Resultados com mesma tendência no comportamento de solos estabilizados com emulsão foram obtidos nos trabalhos [5, 8, 27–29]

As envoltórias de ruptura obtidas para os ensaios triaxiais realizados nos corpos de prova saturados do solo compactado (SM) e nas misturas solo-emulsão compactadas imediatamente após a confecção ensaiadas saturadas e não saturadas são mostradas na Figura 7.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento representados pelo intercepto coesivo e pelo ângulo de atrito dos materiais ensaiados.

Os resultados mostrados na Figura 7 e na Tabela 4 mostram inicialmente que para as condições de ensaios em corpos de prova saturados, o ligante asfáltico residual presente nas misturas solo-emulsão conduziu a um aumento significativo do intercepto coesivo e a uma diminuição do ângulo de atrito em relação aos valores obtidos para o solo compactado. Este aumento do intercepto coesivo observado a partir dos resultados dos ensaios triaxiais em condições saturadas pode ser atribuído à ação ligante do betume presente nas misturas, e a diminuição do ângulo de atrito ao fato de que o filme de asfalto residual funcionar como um lubrificante e também diminuir o entrosamento entre as partículas constituintes do esqueleto sólido das misturas ensaiadas, conforme resultados já obtidos por outros autores em materiais ensaiados com características semelhantes [4, 7, 12, 30, 31].

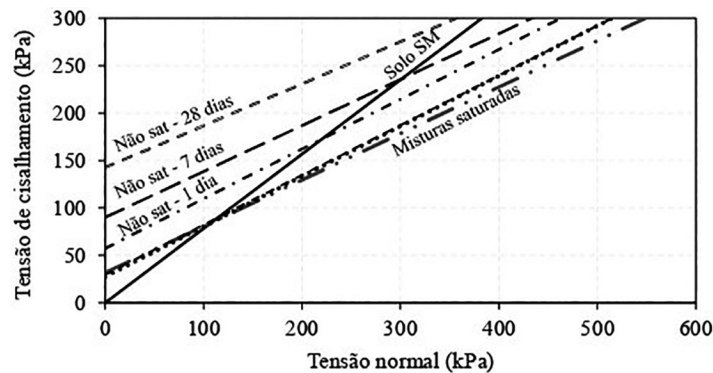


Figura 7: Envoltória de cisalhamento - Parâmetros efetivos - Misturas solo-emulsão e solo compactado na condição saturada.

Tabela 4: Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-emulsão compactadas imediatamente após a confecção (MI).

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	INTERCEPTO COESIVO (kPa)	ϕ' (°)
Solo natural – Proctor – Saturado	0,0	38
Solo-emulsão MI – 01 dia – Saturado	31,6	26,1
Solo-emulsão MI – 07 dias – Saturado	27,4	27,9
Solo-emulsão MI – 28 dias – Saturado	29,7	27,7
Solo-emulsão MI – 01 – Não saturado	57,2	27,7
Solo-emulsão MI – 07 dias – Não saturado	90,0	25,9
Solo-emulsão MI – 28 dias – Não saturado	142,5	23,9

Em relação às misturas ensaiadas em condições não saturadas, os resultados mostrados na Figura 7 indicam que o aumento do tempo de cura levou a um aumento do intercepto coesivo muito provavelmente pelo aumento da sucção mátrica nos corpos de prova. Para todas as misturas solo-emulsão ensaiadas, seja em condições saturadas ou não, observou-se um relativo paralelismo entre as envoltórias de ruptura mostradas na Figura 7, indicando não haver influência significativa do processo de saturação, nem do tempo de cura nos valores do ângulo de atrito obtidos.

Vale a pena mencionar que as envoltórias de ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CIU em misturas saturadas e não-saturadas não apresentaram a bilinearidade observada nas envoltórias obtidas a partir da realização de ensaios de cisalhamento direto em outros trabalhos [12, 13]. Isto indica, que o comportamento cisalhante do material é também dependente da metodologia de ensaio, a qual deve ser devidamente escolhida em função das trajetórias de tensões a que estes materiais estarão submetidos durante a vida útil das obras para as quais forem destinados.

Assim, observa-se que o comportamento das misturas solo-emulsão, de uma maneira geral, tanto em condições saturadas como não saturadas, pode ser atribuído ao filme de asfalto residual. Ele também proporciona a existência de um intercepto coesivo devido à ação ligante do filme betuminoso residual e à diminuição do intertravamento entre os grãos do solo, comportamento também observado pelos autores [13].

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que, com o passar do tempo de cura das misturas entre solo e altos teores de emulsão asfáltica, há uma diminuição do teor de umidade residual de acordo com o período de exposição das misturas ao ar livre, em razão da evaporação da água constituinte da emulsão asfáltica após o processo de ruptura. Esta perda de umidade leva a um aumento da sucção mátrica nas misturas solo-emulsão ensaiadas que foi o principal responsável pelo aumento da resistência ao cisalhamento das misturas ensaiadas em condições não-saturadas.

Os ensaios triaxiais realizados em condições saturadas mostraram que as misturas solo-emulsão apresentaram tensões desvio de pico (ruptura) inferiores aos valores obtidos para os ensaios nos corpos de prova do solo compactado. Isto levou a um aumento do intercepto coesivo e uma diminuição do ângulo de atrito das misturas solo-emulsão em relação ao comportamento cisalhante do solo compactado, indicando o efeito esperado do filme de asfalto residual. Analisando-se os resultados das misturas solo-emulsão ensaiadas em condições saturadas, sob diferentes tempos de cura, observou-se não haver influência do tempo de cura nos resultados obtidos. Assim, nas situações em que estas misturas forem utilizadas sob condições saturadas, o material pode ser compactado e entrar em serviço de forma imediata.

Para as misturas ensaiadas em condições não saturadas observou-se que o aumento do tempo de cura levou a um aumento significativo do intercepto coesivo das envoltórias de ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CIU. Tal aumento do intercepto coesivo foi atribuído ao aumento da sucção mátrica devido à evaporação da água de constituição da emulsão asfáltica durante a exposição dos corpos de prova ao ar em temperatura ambiente (25°) para os períodos de cura adotados no estudo.

Os resultados obtidos com os estudos da estabilização de solos com emulsão asfáltica têm mostrado que a inserção dos altos teores de emulsão em solos arenosos apresenta-se como uma alternativa interessante em obras geotécnicas em que há a necessidade de materiais coesos e com de baixas permeabilidades. Nas situações em que o material se encontra em condições não saturadas, esse tipo de estabilização se torna bem mais proveitosa, do ponto de vista mecânico, por haver ganhos substanciais de interceptos coesivos com o passar do tempo de cura. Tais mudanças não ocorrem só em razão da adição do betume, mas também, e principalmente, devido à sucção mátrica que ocorre por meio da menor umidade residual do sistema solo-emulsão.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AFRIN, H., "A review on different types soil stabilization techniques", *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, v. 3, n.2, pp. 19-24, 2017.
- [2] CASTRO, C.A., *Estudo da técnica anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

- [3] LIMA, F.C., *Estudo dos processos de compactação e dosagem de misturas entre solo arenoso e emulsão asfáltica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- [4] GONDIM, L.M., *Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe – Estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- [5] MICELI JUNIOR, G., *Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- [6] SOLIZ, V.V.P., *Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [7] SANT’ANA, W.C., *Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão*. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [8] MOREIRA, E.D., *Desempenho de dois trechos de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- [9] JACINTHO, E.C., *Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2005.
- [10] JACINTHO, E.C., *Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo emulsão aplicado a barragens*. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- [11] LIMA, F.C., DANTAS NETO, S.A., “Estudo dos mecanismos de compactação em misturas entre solo arenoso e altos teores de emulsão asfáltica”, *Geotecnia*, n. 145, pp. 61-80, 2019.
- [12] PEREIRA, C.G.F., *Avaliação do comportamento hidráulico e da resistência ao cisalhamento de misturas entre solo arenoso e elevados teores de emulsão asfáltica para aplicações em barragens*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- [13] DANTAS NETO, S.A., PEREIRA, C.G. F., ABREU, A.A., “Stabilization of sandy soil with high content of asphalt emulsion”, *REM-International Engineering Journal*, v. 73, n. 2, pp. 163-169, 2020.
- [14] BOUCARD, L., GAUDEFROY, V., CHAILLEUX, E., et al., “Bitumen emulsion destabilization kinetics: importance of the crystallized wax content”, *Langmuir*, v. 33, n. 38, pp. 9740-9749, 2017.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Solo – Determinação do limite de liquidez. NBR 6459*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Solo – Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Solo – Análise Granulométrica. NBR 7181*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Solo – Ensaio de compactação. NBR 7182*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada. NBR ME 12770*. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- [21] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). *Solos – Determinação da densidade real. ME 093*. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Emulsão Asfáltica – Viscosidade “Saybolt-furol” de emulsões asfálticas. NBR MB 581/1971*. Rio de Janeiro: ABNT, 1971.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Emulsão Asfáltica – Determinação da peneiração de emulsões asfálticas. NBR MB 609*. Rio de Janeiro: ABNT, 1971.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo de destilação. NBR 6568*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [25] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). *Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. ME 107*. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- [26] HEAD, K.H., *Manual of soil laboratory testing - v 3*. 2 ed. West Sussex: Wiley–Blackwell, 1986.

- [27] ANDAVAN, S., MANEESH KUMAR, B., “Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions – A review”, *International Conference on Materials Engineering and Characterization 2019*, v. 22, n.3, pp. 1200-1202, 2020.
- [28] MAHTO, A., KHAN, F., KUMAR, V., *et al.*, “Increase the Shear Strength of Soil Using Bitumen Emulsion to Strengthening of Sub-structure”, *International Journal of Architectural Heritage*, v. 2, n. 1, pp. 37-57, 2019.
- [29] ROHAN, D., AAFATAB, S., RAMEEZ, F., *et al.*, *Improvement of soil by using bitumen emulsion*. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia), Anjuman-I-Islam’s Kalsekar Technical Campus, Nani Mumbai, 2018.
- [30] KEZDI, A., *Stabilized Earth Roads – Developments in Geotechnical Engineering*. 1 ed. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [31] MATTOS, A.B.G., “Estabilização de solo com betume”, In: *Reunião Anual de Pavimentação*, pp. 25, São Paulo, 1991.