

Estudo da Compactação de Misturas Solo-Emulsão Para Emprego em Núcleo de Barragem Zoneadas

Silvrano Adonias Dantas Neto
UFC, Fortaleza, Brasil, silvrano@gmail.com

Fabiola Costa de Lima
UFC, Fortaleza, Brasil, fabiola-cl@hotmail.com

Rosiel Ferreira Leme
UFC, Fortaleza, Brasil, rosielferreira@gmail.com

RESUMO: Esta pesquisa tem a finalidade de estudar o processo de compactação em misturas solo-emulsão a serem utilizadas na execução de barragens de terra. A metodologia utilizada compreendeu a coleta e caracterização de um solo arenoso por meio de ensaios de laboratório, a confecção das misturas solo-emulsão em laboratório e posteriormente o estudo da influência da energia utilizada na compactação sobre os parâmetros físicos das misturas. Os resultados mostraram que o mecanismo de compactação das misturas solo-emulsão não é afetado pelo teor de umidade como ocorre na compactação dos solos granulares, e que parâmetros físicos como a massa específica aparente e a percentagem de volume de vazios expressam de forma satisfatória a influência do teor de emulsão na compactação das misturas que a massa específica aparente seca, tradicionalmente utilizada para expressar a mudança na estrutura dos solos pelo processo de compactação. Além disto, observou-se que a compactação das misturas só foi possível quando utilizado uma energia de compactação elevada, como a Proctor modificada, em detrimento à Proctor Normal. Tal comportamento pode ser atribuído ao fato de que para baixas energias de compactação, a elevada rigidez do filme betuminoso formado ao redor dos grãos impede a compactação das misturas, uma vez que a energia não é elevada o suficiente para provocar uma deformação do filme de forma a promover a aproximação das partículas. De uma forma geral, os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando que os mecanismos responsáveis pela compactação das misturas solo-emulsão são significativamente diferentes daqueles que regem a compactação dos solos granulares e finos.

PALAVRAS-CHAVE: solo-emulsão, barragem, compactação.

1 INTRODUÇÃO

As restrições quanto à disponibilidade de materiais adequados para a construção de barragens de terra, aliadas às preocupações de ordem ambiental fazem com que seja necessário o desenvolvimento de novos materiais, que confirmem ao barramento condições satisfatórias de impermeabilização, resistência e deformabilidade. Diante disso, a possibilidade de utilização de misturas betuminosas na construção de barragens como elemento de vedação torna-se bastante plausível.

Dentre as misturas betuminosas com potencial de utilização pode-se citar as misturas solo-emulsão, cujas possíveis vantagens para emprego na execução de barragens são:

- a) Aumento das opções de materiais utilizáveis na construção de barragens, permitindo a utilização de solos arenosos de aluvião;
- b) A utilização de equipamentos simples comumente encontrados em obras de engenharia para preparação das misturas e compactação em campo;
- c) A possibilidade da redução da espessura

do núcleo impermeável gerando economia, e menor impacto ambiental com a redução da área de exploração de jazidas naturais;

- d) A diminuição das distâncias de transporte devido à utilização de materiais que antes não satisfaziam às condições de permeabilidade e/ou resistência.

De uma forma geral, estudos sobre o uso de materiais betuminosos em obras de barragens são mais direcionadas às barragens com núcleo impermeável formado por misturas asfálticas do tipo CBUQ (Falcão, 2003; Guimarães, 2012; dentre outros). No caso específico das misturas solo-emulsão, poucos são os estudos existentes no Brasil, sendo muitos deles ainda inconclusivos, ou então sem abordar aspectos importantes, como por exemplo, os mecanismos de compactação apropriados ao tipo particular de material.

Assim sendo, este trabalho tem por finalidade a avaliação do processo de compactação das misturas asfálticas, com ênfase à definição dos parâmetros físicos mais apropriados para a determinação do teor ótimo de emulsão asfáltica, e a influência da energia na compactação das misturas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Histórico da Utilização de Materiais Asfálticos em Barragens

Dantas Neto (2001) e Guimarães (2012) afirmam que o emprego de materiais asfálticos em construção e impermeabilização já data há mais de cinco mil anos. Segundo Melo (2012), em 1.300 anos a.C. foi construída na Antiga Mesopotâmia a barragem de Assur, uma das primeiras obras de barramento a empregar um tipo de concreto asfáltico primitivo como elemento de vedação.

Na era moderna, em 1910, foi construída a primeira barragem de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico, a Barragem Central nos Estados Unidos. Desde então, o uso de materiais betuminosos como elementos impermeabilizantes em barragens começou a se desenvolver nos países europeus,

principalmente na Alemanha, Noruega e Itália. O bom comportamento desses tipos de barramentos levou outros países, além daqueles citados anteriormente, a desenvolverem essa tecnologia, sendo que atualmente existem mais de 100 barragens construídas com núcleo de concreto asfáltico em todo o mundo (Falcão, 2003; Guimarães, 2012; Souza Neto, 2013).

No Brasil, a primeira barragem de núcleo de concreto asfáltico construída foi a barragem principal da Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó (Figura 1). Localizada no Rio Uruguai, na divisa de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, esta barragem possui altura média de 48 m e núcleo asfáltico com 0,55 m de espessura (Guimarães, 2012; Melo, 2012).

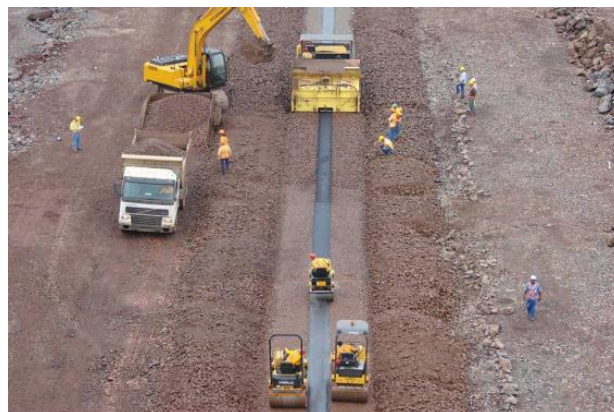


Figura 1. Execução do núcleo asfáltico da UHE Foz do Chapecó (Ramalho *et al.*, 2013).

Segundo Ramalho *et al.* (2013), devido ao sucesso na construção da UHE Foz de Chapecó, surgiu o projeto de construção da UHE Jirau para o barramento do rio Madeira. Situada na região norte do país, no estado de Rondônia, a 120 km da capital Porto Velho, e com condições climáticas semelhantes à da UHE Foz de Chapecó, a UHE de Jirau foi projetada para ter uma altura de 60 m e núcleo de concreto asfáltico com uma espessura de 0,60 m.

Uma das vantagens atribuídas às barragens de enrocamento com núcleo asfáltico é a capacidade de cicatrização do núcleo devido ao comportamento viscoelástico da mistura asfáltica. Isto torna-se importante principalmente nos casos dos maciços que apresentam recalques diferenciais, causados seja pela compressibilidade da fundação compressiva, seja pela formação do efeito arco

(penduramento), ou até mesmo nos casos de formação de trincas devido a sismos. Além disso, o uso do núcleo de concreto asfáltico leva vantagem em relação às operações de terraplenagem necessárias nos casos dos núcleos argilosos, dificultadas em áreas com forte incidência de chuva (Souza Neto, 2013; Ramalho *et al.*, 2013).

2.2 Mistura Solo-Emulsão

A substituição do concreto asfáltico pelo solo-emulsão na construção de núcleo de barragens é uma possibilidade a ser avaliada. Soliz (2007) descreve um resumo de várias pesquisas realizadas sobre a estabilização dos solos com emulsão asfáltica. A maioria das pesquisas apresentadas avalia a aplicação desse tipo de estabilização em pavimentação. O único estudo sobre a utilização de misturas solo-emulsão em barragens é atribuído a Jacintho (2005).

Nas pesquisas relatadas por Soliz (2007), o objetivo da adição da emulsão asfáltica é envolver individualmente os grãos de solo com um filme de betume, fino o suficiente para produzir coesão entre os grãos, mas sem haver redução significativa do atrito. Este autor descreve ainda as principais alterações nas propriedades mecânicas dos solos causado pela adição do ligante asfáltico, podendo-se citar: o aumento até o teor ótimo e, posterior diminuição da resistência com o aumento dos teores de emulsão asfáltica; e redução da permeabilidade das misturas solo-emulsão em relação à permeabilidade dos solos.

Jacyntho (2005) estudou a estabilização de areias argilosas com teores de emulsão de 0%, 2%, 4%, 6% e 8%. Por meio de ensaios de compressão triaxial, verificou-se que em uma mistura de solo-emulsão com 4% de emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C) ocorreu um aumento da coesão de 13 kPa para 57 kPa e uma redução do ângulo de atrito de 35° para 22°.

Cavalcante *et al.* (2010) estudaram a estabilização solo-emulsão para três tipos de solos: arenoso, argiloso e intermediário. Com a estabilização do solo arenoso com uma emulsão asfáltica do tipo RL-1C, em percentuais que

variaram entre 2% a 8%, foi observado um ganho de resistência.

Rabelo *et al.* (2014) estudaram os efeitos da adição da emulsão asfáltica RL-1C a um solo siltoso, com teores de 1% a 8%, aeração de 0 e 1h e período de cura de 0 e 7 dias. Os resultados mostraram haver uma melhoria na deformabilidade das misturas com a adição da emulsão asfáltica e uma melhoria na resistência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostra de Solo

Para a confecção das misturas solo-emulsão estudadas neste trabalho foi utilizada uma amostra de solo coletada no campus da Universidade Federal do Ceará – UFC, no local de coordenadas 3°44'42.8"S 38°34'40.3"W (datum: SIRGAS 2000), na cidade de Fortaleza - CE.

Os ensaios executados para a caracterização física da amostra de solo utilizada foram: limite de liquidez (NBR 6459/84), limite de plasticidade (NBR 7180/84), granulometria por peneiramento e sedimentação (NBR 7181/84), massa específica dos sólidos (NBR 6508/84) e compactação Proctor (NBR 7182/86). As Figuras 2 e 3 a seguir apresentam a curva granulométrica e curva de compactação do solo, respectivamente.

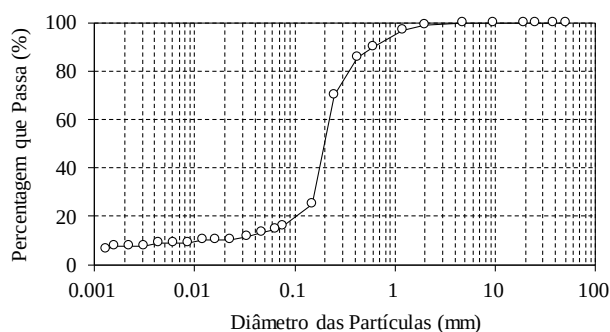


Figura 2. Curva granulométrica do solo

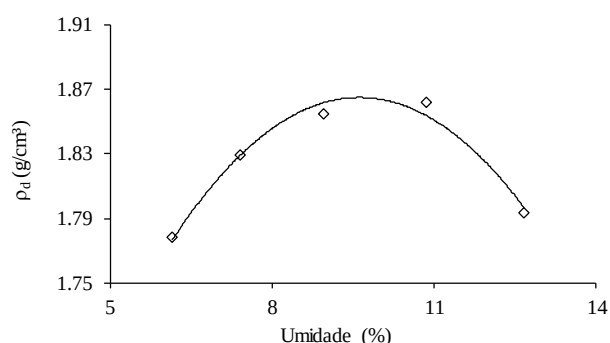


Figura 3. Curva de compactação do solo.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos resultados dos ensaios realizados na amostra de solo coletada. Observa-se que se trata de um solo tipicamente arenoso cujas características não são compatíveis com aquelas desejadas para a execução de uma barragem de terra homogênea, justificando assim, a necessidade de estabilização pela adição do agente ligante, no caso, a emulsão asfáltica.

Tabela 1. Propriedades Geotécnicas da Amostra de Solo.

Parâmetro	Valor
Peso específico seco máximo (kN/m³)	18,6
Umidade Ótima (%)	9,7
Limite de Liquidez (%)	NL
Índice de Plasticidade (%)	NP
Densidade Relativa dos grãos	2,64
Classificação SUCS	SM

3.2 Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada foi do tipo catiônica de ruptura lenta (RL- 1C), com as seguintes características apresentadas na Tabela 2.

A utilização de uma emulsão do tipo de ruptura lenta se deu pela necessidade de compatibilizar o tempo de ruptura da emulsão com o tempo necessário para o envolvimento dos grãos do solo pelo ligante asfáltico durante a confecção das misturas solo-emulsão. A utilização de uma emulsão de cura rápida, ou média, podia levar a uma ruptura prematura da emulsão de forma a não permitir o envolvimento dos grãos de solo de forma satisfatória.

Tabela 2. Propriedades da emulsão asfáltica utilizada.

Ensaio Realizado	IBP/ABNT Especificações	Resultados
Viscosidade Saybolt Furol, S, a 50°C	(MB 581/71) Máx. 70	44
Peneiração, 0,84mm, % em peso máx.	(MB 609/71) 0,1	0,01
Resíduo, mín. % em peso	(NBR 6569/00) 60	63,2

3.3 Procedimento de Confecção das Misturas Solo-emulsão

As misturas solo-emulsão foram confeccionadas a partir da mistura manual entre a emulsão asfáltica na temperatura ambiente e o solo previamente seco em estufa a 100°C. É importante destacar que a emulsão utilizada na confecção das misturas não foi diluída, nem o solo umedecido, conforme procedimentos-padrão utilizados por outros pesquisadores citado por Soliz (2007). Mesmo assim, a mistura manual entre os materiais ocorreu de forma fácil e satisfatória.

O teor de emulsão inicial utilizado para a confecção das misturas foi definido a partir de um procedimento empírico e tátil-visual. Foi definido como o teor de emulsão inicial aquele que conferisse ao solo seco alguma coesão por meio do amassamento manual da mistura solo-emulsão estudada. A partir do teor inicial de emulsão definido conforme este procedimento, foram confeccionadas misturas solo-emulsão com 10 teores de emulsão, a partir do teor inicial com aumentos gradativos de 2% em massa.

De acordo com este procedimento foram confeccionadas misturas solo-emulsão com os seguintes teores de emulsão asfáltica em relação à massa total da mistura: 13%, 15%, 17%, 19%, 21%, 23%, 25%, 27%, 29% e 31%.

3.4 Compactação das misturas solo-emulsão

Os ensaios de compactação nas misturas solo-emulsão confeccionadas foram conduzidos de acordo com os procedimentos prescritos na NBR 7182/86. As misturas confeccionadas segundo o procedimento descrito anteriormente foram divididas em dois grupos: no primeiro

grupo a compactação ocorreu imediatamente após a mistura entre o solo e a emulsão asfáltica; no segundo grupo, a compactação foi realizada 24 após a mistura ser realizada, de forma a permitir a ruptura da emulsão asfáltica e a formação da película de asfalto residual sobre os grãos. Em ambos os casos, foram empregadas as energias Proctor Normal e Modificado. Este procedimento de compactação teve por objetivo avaliar a influência da ruptura da emulsão e da energia empregada na compactação das misturas solo-emulsão.

No caso específico da compactação das misturas solo-emulsão na energia Proctor Modificado, três corpos de prova foram compactados para cada teor de emulsão, de forma a se avaliar a variabilidade nos resultados dos parâmetros físicos devido a problemas de homogeneização.

Os parâmetros físicos utilizados para a avaliação da compactação das misturas solo-emulsão foram, os tradicionais parâmetros empregados nos ensaios de compactação Proctor, como a massa específica aparente seca e o teor de umidade, e alguns dos parâmetros físicos tradicionalmente utilizados nos procedimentos de dosagem das misturas asfálticas como a massa específica aparente (ρ), a percentagem de volume de vazios (V_v), a percentagem de vazios em relação aos agregados minerais (VAM) e relação betume-vazios (Dantas Neto, 2001). Devido às particularidades próprias das misturas solo-emulsão, a percentagem de vazios em relação aos agregados minerais (VAM) será denominada neste trabalho pela percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM), embora mantenha-se o mesmo conceito e formulação de cálculo apresentada, por exemplo, no trabalho de Dantas Neto (2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 mostra as curvas de compactação expressas em termos de massa específica aparente seca versus teor de umidade para as amostras de solo, e para as misturas solo-emulsão compactadas na energia Proctor Normal. Inicialmente, observa-se que a metodologia de avaliação da compactação utilizando a massa específica aparente seca e o teor de umidade não se apresenta eficaz para as

misturas solo-emulsão confeccionadas. Isto pode ser atribuído tanto à dificuldade de se determinar com precisão o teor de umidade das misturas solo-emulsão, como as dúvidas sobre a consideração do estado – sólido, ou não – do ligante asfáltico residual no cálculo da massa específica aparente seca, para as duas situações consideradas quais sejam, a compactação imediatamente após a mistura dos materiais, e a compactação após as 24 horas necessárias para ocorrer a ruptura da emulsão, como

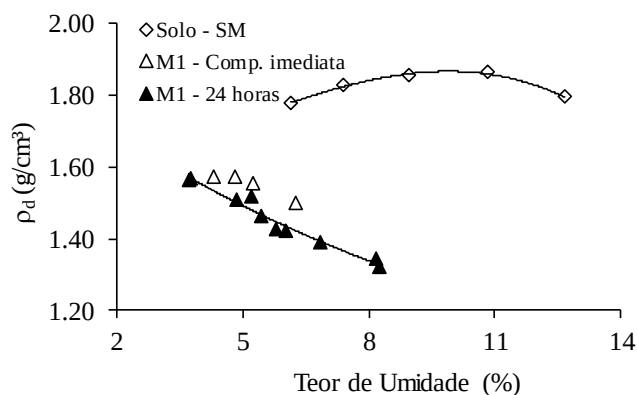


Figura 4. Variação da Massa Específica Aparente Seca com o Teor de Umidade para a Compactação na Energia Proctor Normal.

A Figura 5 mostra as curvas de compactação para as misturas solo-emulsão compactadas imediatamente após a mistura entre os materiais, e após 24 horas expressas pela variação da massa específica aparente com o teor de emulsão das misturas. Analisando estes resultados, observa-se que em ambos os casos é possível se definir o teor ótimo de emulsão asfáltica como aquele para o qual a mistura apresenta a máxima massa específica aparente. Assim, verifica-se que a massa específica aparente se apresenta como um parâmetro mais eficiente na avaliação do processo de compactação das misturas solo-emulsão do que a massa específica aparente seca utilizada na definição da condição ótima de compactação dos solos.

Os resultados mostrados na Figura 5 indicam também que a compactação das misturas solo-emulsão 24 horas após a sua confecção leva a uma diminuição dos valores da massa específica aparente no caso da compactação na energia Proctor normal. Isto pode ser atribuído

ao aumento da rigidez do filme asfáltico que envolve os grãos de solo que ocorre após a ruptura da emulsão asfáltica. Devido ao comportamento viscoelástico do betume residual, a energia Proctor Normal não é elevada o suficiente para promover a deformação do filme asfáltico e consequentemente, promover a compactação da mistura.

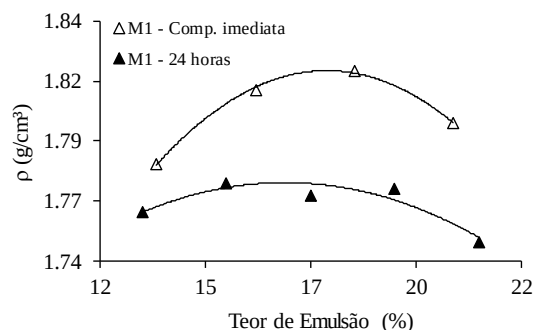


Figura 5. Variação da Massa Específica Aparente com o Teor de Emulsão Asfáltica para a Compactação na Energia Proctor Normal.

Os resultados apresentados na Figura 6 mostram que o aumento da energia de compactação levou a uma definição mais clara da curva de compactação das misturas solo-emulsão para todo o intervalo de teores de emulsão investigado, e que os valores obtidos para a massa específica aparente das misturas compactadas na energia Proctor Modificada são significativamente superiores àqueles obtidos para as misturas compactadas na energia Proctor Normal. Isto comprova a hipótese citada anteriormente de que o aumento na energia de compactação é capaz de produzir uma maior deformação no filme de betume residual que envolve os grãos de solo, levando, as misturas a um estado mais compacto.

Na Figura 6 além da curva de compactação média para a energia Proctor Modificada são apresentados também os resultados da massa específica aparente para os três corpos de prova compactados em cada teor de emulsão utilizado. Os resultados mostram que há uma variação significativa entre os resultados obtidos, e que esta variação é menor nas situações em que a mistura é mais homogênea, ou seja, para os teores de emulsão correspondentes aos pontos extremos da curva

de compactação. Assim sendo, é imperativo que para uma melhor representação da curva de compactação, os ensaios de compactação sejam sempre realizados em no mínimo 3 corpos de prova para cada teor de emulsão utilizado.

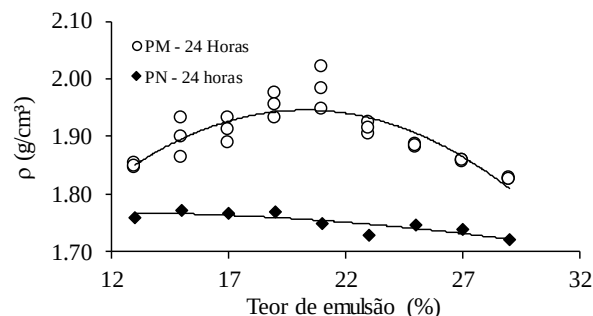


Figura 6. Resultados das compactações para as energias Proctor Normal e Modificada.

As Figuras 7 e 8 mostram a variação da percentagem do volume de vazios (Vv) e a percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM), respectivamente, em função dos teores de emulsão utilizados nas misturas. Estes resultados, os quais devem ser considerados complementares àqueles obtidos para a massa específica aparente das misturas, mostram que a condição ótima de compactação das misturas se dá a partir do teor de emulsão em que ocorre uma constância da percentagem do volume de vazios (Vv), ou quando há um aumento para a percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM).

Pode-se considerar que ao se atingir a condição máxima de compactação representada pelo máximo valor para a massa específica aparente, a compactação da mistura solo-emulsão não ocorre mais, e isto reflete-se no volume de vazios que, considerando o betume como um sólido, torna-se constante, o que explica o comportamento das curvas apresentadas na Figura 7. No caso, a mistura compactada na energia Proctor Normal não apresentando a condição ótima de compactação bem definida, tem-se uma tendência de diminuição da percentagem de volume de vazios, para todos os teores de emulsão investigados, ao contrário do que ocorre com a mistura compactada na energia Proctor Modificada, que a partir do teor ótimo de

emulsão apresenta uma constância para este parâmetro físico.

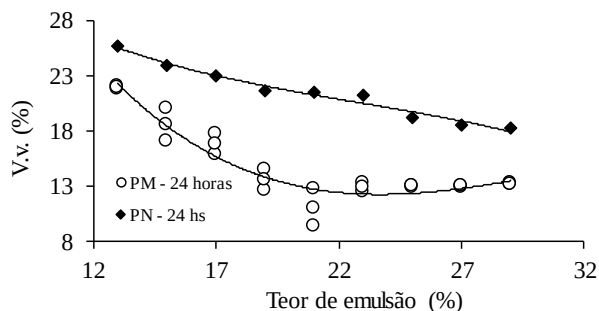


Figura 7. Variação da Percentagem de Vazios com o Teor de Emulsão para as Misturas Compactadas nas Energias Proctor Normal e Modificado.

No caso da percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM), ao se atingir a condição ótima de compactação, qualquer acréscimo de emulsão asfáltica irá contribuir para o aumento da espessura do filme betuminoso que envolve os grãos do solo, o qual devido à sua rigidez, tende a afastar os grãos minerais, aumentando assim, o valor dos vazios, aqui considerando-se como sólidos apenas os grãos de solo.

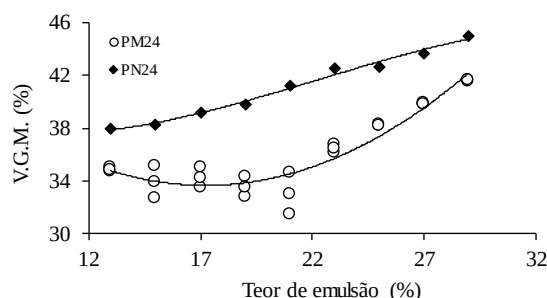


Figura 8. Variação da Percentagem de Vazios em Relação aos Grãos Minerais (VGM) com o Teor de Emulsão para as Misturas Compactadas nas Energias Proctor Normal e Modificado.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de compactação realizados em misturas solo-emulsão pode-se inicialmente concluir que o mecanismo responsável pela compactação das misturas solo-emulsão difere significativamente do mecanismo responsável pela compactação dos solos, qual seja, a influência da água na massa específica aparente seca. Estes resultados estão contrários ao que se encontra apresentado

nos estudos realizados sobre o comportamento das misturas solo-emulsão por vários pesquisadores, os quais referem-se sempre à compactação das misturas com variação do teor de umidade.

Os resultados mostram que a utilização de parâmetros físicos como a massa específica aparente, a percentagem do volume de vazios, e a percentagem do volume de vazios em relação aos grãos minerais, que são parâmetros tradicionalmente utilizados nos estudos de dosagem de misturas asfálticas devem ser utilizados para a representação da variação da compactação das misturas com o aumento do teor de emulsão asfáltica.

De uma forma geral, a compactação das misturas solo-emulsão é mais eficiente com o emprego de elevadas energias de compactação, as quais são responsáveis por induzir deformações no filme de betume residual que envolve os grãos de solo, favorecendo assim, a deformação volumétrica do material, e consequentemente a sua compactação.

Este estudo apresenta-se como a avaliação do processo de compactação em misturas solo-emulsão levando-se em consideração apenas aspectos relacionados aos parâmetros físicos das misturas. A influência da compactação nas propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas ainda necessitam de maiores estudos, uma vez, que mesmo os poucos estudos existentes sobre o tema são ainda inconclusivos.

AGRADECIMENTOS

À empresa Asfalto Nordeste pelo apoio à pesquisa, através do fornecimento de amostras de emulsões.

REFERÊNCIAS

- Cavalcante, E.H., Santos, W.J., Rodrigues, J.K.G., (2010). Avaliação de Propriedades Mecânicas de Misturas Solo-Emulsão. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG).
- Dantas Neto, S.A. (2001). Materiais Alternativos para Uso em Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.
- Falcão, P.R.F. (2003). Aplicação de Misturas Betuminosas em Barragens de Terra e Enrocamento. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de

- Brasília, Brasília, DF, 106 p.
- Guimarães, R.C. (2012). Barragens com Núcleo de Concreto Asfáltico – Análise do Comportamento Mecânico e Hidráulico do Núcleo. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189 p.
- Jacintho, E.C. (2005). Estudo do Comportamento de Misturas Solo-Emulsão para Uso em Barragens. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160 p.
- Melo, R. (2012). Comportamento de Percolação em Barragens de Enrocamento com Núcleo em Concreto Asfáltico. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 101 p.
- Ramalho, M.C., Tajima, D., Maldi junior, J.L., Carvalho, A.P. (2013). Barragem de Enrocamento com Núcleo Asfáltico na UHE Jirau. XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens. Porto de Galinha, PE.
- Rabelo, E.P., Ferreira, M.R.P., Frota, C.A., (2014). ENGEVISTA, V. 16, n. 2, p. 180-190, Junho 2014.
- Soliz, V.V.P. (2007). Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 166 p.
- Souza Neto, F.A.D.D. (2013). Concreto Asfáltico para Núcleo de Barragens – Caso da UHE Jirau. Projeto de Graduação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 131 p.