

# ESTUDO DOS MECANISMOS DE COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ENTRE SOLO ARENOSO E ALTOS TEORES DE EMULSÃO ASFÁLTICA

## Study of the Compaction Mechanism in Mixtures of Sandy Soil and High Asphalt Emulsion Contents

Fabiola Costa de Lima <sup>a</sup>, Silvrano Adonias Dantas Neto <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil.

**RESUMO** – Este artigo apresenta uma avaliação dos mecanismos de compactação de misturas entre solo arenoso e altos teores de emulsão asfáltica. Para tanto, foram utilizados um solo classificado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos como SP e uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C). As misturas entre solo e emulsão asfáltica foram confeccionadas com teores de emulsão entre 13% e 31%, em peso, e foram submetidas a diferentes condições de compactação, de forma que as informações obtidas permitissem a identificação dos mecanismos que governam a sua compactação, bem como a identificação da metodologia de compactação mais apropriada para este tipo de material. Os resultados mostraram que os mecanismos responsáveis pela compactação das misturas entre solo e altos teores de emulsão asfáltica são significativamente diferentes daqueles que regem a compactação dos solos granulares e finos. A rigidez do filme betuminoso apresentou-se como o parâmetro com maior influência na compactação das misturas estudadas, mostrando que para a obtenção de uma compactação eficiente é necessária a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, que pode ser feita pelo aumento da energia, ou aumento da temperatura do ligante no momento da compactação.

**ABSTRACT** – This paper presents an evaluation of the mechanisms which define the compaction of mixtures between sandy soil and high asphalt emulsion contents. A sandy soil classified according to the Unified Soil Classification System as SP and a cationic asphalt emulsion slow set (RL-1C) were used. The mixtures between soil and asphalt emulsion were manufactures with asphalt emulsion contents varying from 13% to 31%, in weight, and were compacted under different conditions, in order to allow the identification of the mechanisms responsible for their compaction, and compaction methodology suitable for this material. Results show that the mechanisms governing the compaction of mixtures between soil and high asphalt emulsion contents are significantly different from those ones regarding the granular and fine soils. The stiffness of the residual asphalt binder on the soil particles presents itself as the most important factor that has influenced the compaction of the studied mixtures, indicating that to obtain an efficient compaction of the mixtures it is necessary to increase the energy used in the compaction process or decreasing the viscosity of the residual binder by heating during the compaction procedure.

**Palavras Chave** – solo-emulsão, compactação, emulsão asfáltica.

**Keywords** – soil-emulsion, compaction, asphalt emulsion.

### 1 – INTRODUÇÃO

Suarez (2008) apresenta o solo-emulsão como um material resultante de um processo de estabilização pelo qual as propriedades do solo são supostamente melhoradas por meio da

---

E-mails: fabiola-cl@gmail.com (F. Lima), silvrano@ufc.br (S. Neto)

incorporação da emulsão asfáltica visando à melhoria das características mecânicas da mistura resultante quando comparada ao material granular. Tomando-se por base este princípio, observa-se que a estabilização dos solos mediante a adição das emulsões asfálticas pode ser aplicada na construção de diferentes tipos de obras geotécnicas, como por exemplo, barragens de aterro, estradas e aeroportos, nas quais o aproveitamento do solo local, nem sempre com as propriedades mecânicas satisfatórias, é importante para a redução das distâncias de transporte. Em geral, esse tipo de estabilização busca a melhoria das propriedades mecânicas e físico-químicas dos solos.

Na pavimentação, diversas pesquisas sobre estabilização de solos com emulsão asfáltica são reportadas (Pessoa, 2004; Miceli Júnior, 2006; Soliz, 2007; Gondim, 2008; Sampaio, 2008; Rebelo, 2009; Sant'ana, 2009; Pacheco, 2011; Linsha et al., 2016). Verma (2015) menciona que existem poucas pesquisas relacionadas à estabilização de solos com emulsão asfáltica. Estes autores citam como principais vantagens da estabilização dos solos com emulsão asfáltica: aumento da durabilidade e impermeabilização das camadas; ação coesiva promovida pelo ligante asfáltico ao material granular, aumentando a sua resistência; e capacidade de resistir às ações de ácidos, sais e álcalis. Além disto, estes autores citam que a formação do filme betuminoso residual nos grãos de solo, formado após a ruptura da emulsão asfáltica, confere à mistura solo-emulsão um aumento da resistência e flexibilidade se comparado ao comportamento das camadas granulares. Isto faz com que os estudos da estabilização dos solos com emulsão asfáltica com o objetivo de se aumentar a capacidade de suporte e a durabilidade das camadas de pavimento estejam, de certo ponto, avançados, apesar de se concentrarem no estudo de propriedades como a capacidade de suporte, avaliada por meio do Índice de Suporte Califórnia, resistência à compressão simples e módulo resiliente.

Jacinto (2005, 2010) apresentou estudos sobre o comportamento das misturas solo-emulsão com ênfase em suas propriedades de resistência ao cisalhamento, permeabilidade e deformabilidade. Este autor, assim como outros já citados anteriormente, trabalharam com teores de emulsão asfáltica normalmente inferiores a 10%, em peso, e os resultados obtidos podem ser considerados inconclusivos, uma vez que não mostram de forma clara, a melhoria promovida nas propriedades dos solos pela adição da emulsão asfáltica. Assim sendo, torna-se necessário o estudo mais aprofundado do comportamento das misturas solo-emulsão, considerando a possibilidade da adição de teores de emulsão asfáltica mais elevados que aqueles considerados até o presente momento nos diferentes trabalhos realizados sobre o tema.

Por se tratar de um material inteiramente novo para emprego em obras geotécnicas, a mistura solo-emulsão, ao se apresentar como um composto, pode apresentar mecanismos de compactação diferentes daqueles responsáveis pela compactação dos solos, sendo necessário, antes de estudar qualquer propriedade geotécnica, a definição da técnica de compactação e da metodologia de dosagem mais adequada, especificamente, quando utilizados elevados teores de emulsão asfáltica, como é o foco principal deste trabalho. Desta forma, este trabalho tem por objetivo a avaliação do processo de compactação das misturas de solo com elevados teores de emulsão asfáltica, de forma a permitir o entendimento dos principais fatores responsáveis pelo mecanismo de compactação deste tipo particular de material. O estudo concentra-se no estudo da metodologia de compactação e na influência da viscosidade do filme betuminoso formado sobre os grãos de solo nas propriedades físicas e na estrutura das misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas com teores de emulsão asfáltica variando de 13% a 31%, em peso.

## **2 – ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM MATERIAIS ASFÁLTICOS**

Ferreira (1980) apud Gondim (2008) relata que a estabilização betuminosa de solos começou a ser empregada quando engenheiros rodoviários, trabalhando nas proximidades de campos petrolíferos, notaram que ao espalharem óleo cru sobre as estradas de terra conseguiram reduzir o pó existente, tornando-as mais aptas a resistirem aos rigores do tráfego e do intemperismo. Essa

prática começou a ser difundida e aprimorada por meio da substituição do óleo cru pelo petróleo destilado.

Thuller (2005) relata que na rodovia RJ-148, situada no estado do Rio de Janeiro no Brasil, a camada de base foi construída com solo-emulsão por volta de 1979, e que mesmo após os primeiros 6 meses sem qualquer tipo de revestimento, ou proteção, a mesma apresentou um ótimo comportamento, recebendo posteriormente apenas um tratamento com lama asfáltica. A Figura 1 ilustra o estado de conservação do pavimento da rodovia RJ-148 após 25 anos de utilização, mesmo após a completa degradação da camada de revestimento, mostrando o ganho de durabilidade promovida pela estabilização da base com a adição da emulsão asfáltica (Thuller, 2005).



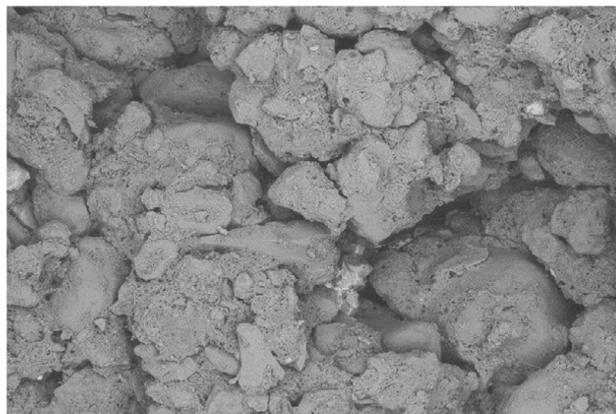
**Fig. 1** – Estado de conservação da rodovia da RJ-148 construída em 1979 com base de solo-emulsão (Thuller, 2005).

Soliz (2007) relata que estabilização dos solos com materiais asfálticos começou com a utilização do asfalto diluído de cura rápida e média, já que as emulsões asfálticas catiônicas foram colocadas à disposição do mercado somente em 1951 pela empresa Esso, na França. No Brasil, em 1952, a Shell lançou as emulsões aniônicas e somente dez anos mais tarde apareceram no mercado as emulsões catiônicas. Já as pesquisas sobre a estabilização de solos com asfalto diluído, na década de 50 e início da década 60, não forneceram informações suficientes que permitissem estabelecer especificações e normas para as misturas solo-betume e somente em 1976, no Brasil, foi iniciado um programa de construções de rodovias de baixo custo, no qual foi incluído o estudo de estabilização dos solos pela adição das emulsões asfálticas.

A principal função do material asfáltico na mistura solo-emulsão é conferir ao solo estabilizado coesão, pela ação do ligante asfáltico, e diminuir a permeabilidade do solo. Segundo Sant'ana (2009), a elevação da resistência do solo arenoso pela estabilização solo-emulsão está relacionada ao aumento da coesão entre partículas promovida pelo filme betuminoso que as envolve além do atrito já existente. Porém, acima de determinado teor de asfalto, ocorre o aumento do espessamento do filme que envolve as partículas de solo, afastando-as, e promovendo a perda de resistência ao cisalhamento devido ao menor atrito interno. A impermeabilização dos solos, promovida pelo material asfáltico, se dá pela diminuição dos vazios do solo, impedindo o fluxo de água, ou pela formação do filme betuminoso que protege as partículas da ação da água, ou ainda, pela ação conjunta destes dois mecanismos (Sant'ana, 2009).

Observa-se que a formação deste filme betuminoso é de fundamental importância para a estabilização do solo. Dentre os principais fatores que influenciam na eficiência da formação do

filme betuminoso podem ser citados a viscosidade e o tempo de ruptura da emulsão asfáltica e as características de adesividade entre o asfalto residual e os grãos minerais. A ruptura da emulsão ocorrendo antes de um total envolvimento das partículas de solo pelo material betuminoso, resultará na formação de grumos constituídos pelo asfalto residual e pela fração mais fina do solo, conforme observado nos resultados apresentados por Jacintho (2010) e mostrados na Figura 2. Pode considerar-se que a formação de grumos no interior da mistura solo-emulsão prejudica o processo de estabilização, pois confere à estrutura uma maior heterogeneidade, e pode, em muitos casos, aumentar o volume de vazios, levando a um aumento indesejado da permeabilidade do solo, ou até mesmo, à diminuição na sua resistência ao cisalhamento, como ocorreu em alguns dos resultados apresentados por Jacintho (2010). O fato de a ruptura da emulsão asfáltica ocorrer antes, ou após, o completo envolvimento dos grãos minerais do solo deve ser considerado de extrema importância no estudo das misturas solo-emulsão, e a interação química entre os grãos de solo e a emulsão desempenha um papel primordial neste processo. Dependendo dos componentes químicos presentes na mistura, eles podem funcionar como catalizadores do processo de coalescência da emulsão, acelerando a união entre os glóbulos de asfalto dispersos no emulsificante, e, portanto, influenciando a adesividade do betume aos grãos de solo, a qual é de fundamental importância no processo de estabilização.



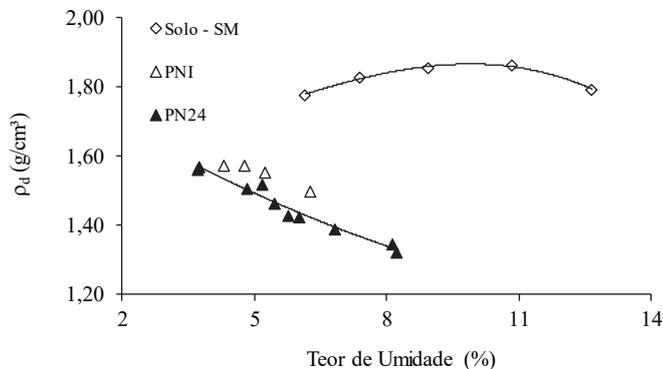
**Fig. 2** – Microscopia eletrônica em mistura solo-emulsão confeccionada com adição de 8%, em peso, de emulsão asfáltica a um solo classificado como uma areia siltosa (Jacintho, 2010).

De uma forma geral, observa-se que a maioria das aplicações e estudos sobre a estabilização solo-emulsão concentram-se na área de pavimentação (Nascimento *et al.*, 2003; Pessoa, 2004; Miceli Júnior, 2006; Gouveia *et al.*, 2007; Soliz, 2007; Gondim, 2008; Sampaio, 2008; Suarez, 2008; Rebelo, 2009). Estudos relacionados ao comportamento das misturas solo-emulsão para fins de execução de barragens são poucos, destacando-se, apenas, os trabalhos de Jacintho (2005, 2010). Observa-se que em todos estes estudos citados, os máximos teores de emulsão asfáltica adicionados aos mais diferentes tipos de solo, visando a sua estabilização, foram da ordem de 8%, em peso, e que os resultados foram muitas vezes inconclusivos a respeito do ganho promovido no comportamento dos materiais pela adição da emulsão asfáltica, o que pode ser atribuído à formação dos grumos na estrutura da mistura solo-emulsão, conforme já discutido anteriormente.

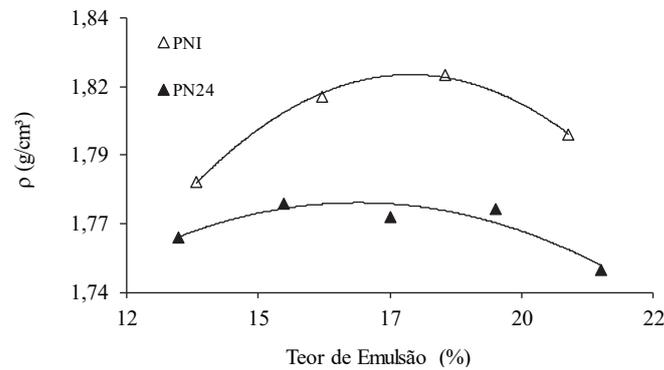
Do ponto de vista de compactação em laboratório, observa-se que em todos os estudos citados anteriormente foi utilizada a metodologia Proctor em diferentes energias. Como os teores de emulsão asfáltica utilizados foram baixos, menos que 10% em peso da mistura, a fase sólida formada pelo solo ainda predomina no controle do mecanismo de compactação das misturas solo-emulsão, o qual ainda é altamente influenciado pelo teor de umidade do material. Dantas Neto *et al.* (2016) iniciaram o estudo do comportamento das misturas solo-emulsão com teores de emulsão

asfáltica variando de 13% a 31%, em peso. Estes autores apresentaram um estudo do processo de compactação das misturas formadas a partir da adição de uma emulsão asfáltica do tipo RL-1C a um solo classificado como uma areia siltosa (SM). Os estudos consistiram na avaliação da energia de compactação (Proctor normal e modificada) e da viscosidade do ligante asfáltico (misturas compactadas imediatamente, e após 24 horas da confecção das misturas), e mostraram que para as misturas com elevados teores de asfalto, os mecanismos de compactação das misturas são bastante diferentes daqueles responsáveis pela compactação dos materiais granulares, ou mesmo das misturas solo-emulsão, com teores de emulsão inferiores a 10%, em peso.

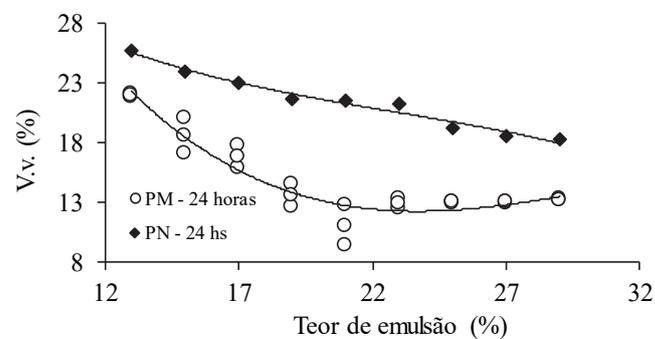
Os resultados apresentados por Dantas Neto *et al.* (2016) mostraram ainda que a rigidez do filme asfáltico formado exerce grande influência no processo de compactação das misturas solo-emulsão, sendo a eficiência da compactação obtida apenas para situações nas quais a viscosidade da emulsão foi significativamente baixa (compactação antes da ruptura da emulsão), ou com o aumento da energia de compactação. Além disto, estes autores mostraram que para misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica, parâmetros físicos como a massa específica aparente seca e a umidade ótima, tradicionalmente utilizados nos estudos de compactação dos solos granulares e finos, não devem ser aplicados nos estudos de compactação e dosagem das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão, conforme ilustrado na Figura 3, para misturas compactadas imediatamente (PNI), e 24 horas (PN24) após a mistura entre o solo e a emulsão asfáltica. Ao invés disto, a utilização dos parâmetros físicos como massa específica aparente (Figura 4), percentagem de volume de vazios (Figura 5), e percentagem de volume de vazios em relação à estrutura de grãos minerais (Figura 6) podem ser utilizados para melhor representar a influência da adição da emulsão asfáltica nas características de compactação das misturas solo-emulsão (Figura 4). Lima (2016) apresenta uma descrição detalhada a respeito da definição e cálculos destes parâmetros físicos, os quais são também utilizados no presente trabalho para a avaliação do processo de compactação das misturas solo-emulsão estudadas.



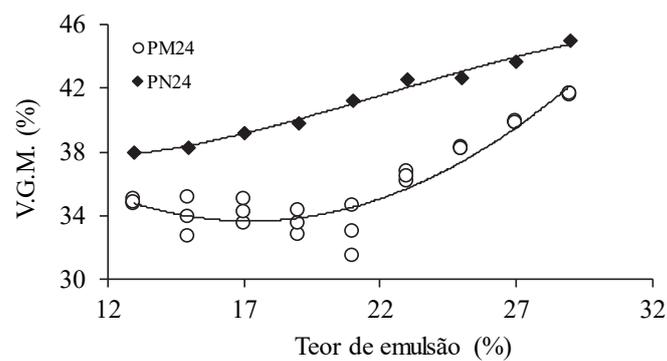
**Fig. 3** – Variação da massa específica aparente seca com o teor de umidade para a compactação na energia Proctor normal (Dantas Neto *et al.*, 2016).



**Fig. 4** – Variação da massa específica aparente com o teor de emulsão asfáltica para a compactação na energia Proctor normal (Dantas Neto *et al.*, 2016).



**Fig. 5** – Variação da porcentagem de vazios com o teor de emulsão para misturas solo-emulsão compactadas nas energias Proctor normal (PN) e modificada (PM) (Dantas Neto *et al.*, 2016).



**Fig. 6** – Variação da porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) com o teor de emulsão para misturas solo-emulsão compactadas nas energias Proctor normal (PN) e modificada (PM) (Dantas Neto *et al.*, 2016).

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Solo utilizado na confecção das mistura solo-emulsão estudadas

Para a confecção das misturas solo-emulsão estudadas neste trabalho foi utilizada uma amostra de solo coletada no Campus da Universidade Federal do Ceará – Universidade Federal do Ceará, 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 (ABNT, 1984a), limite de plasticidade (ABNT, 1984b), granulometria por peneiramento e sedimentação (ABNT, 1984c), massa específica dos sólidos (ABNT, 1984d) e compactação Proctor (ABNT, 1986).

As Figuras 7 e 8 apresentam a curva granulométrica e curva de compactação do solo, respectivamente. No Quadro 1 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados no solo utilizado para a confecção das misturas solo-emulsão estudadas e a classificação do solo de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, o solo foi classificado como uma areia siltosa (SM) não plástica. Este tipo de material normalmente não apresenta características de resistência, deformabilidade e estanqueidade suficiente para emprego em muitos tipos de obras geotécnicas, sendo, portanto, um material muito indicado para verificar os benefícios do processo de estabilização proporcionado pela adição da emulsão asfáltica.

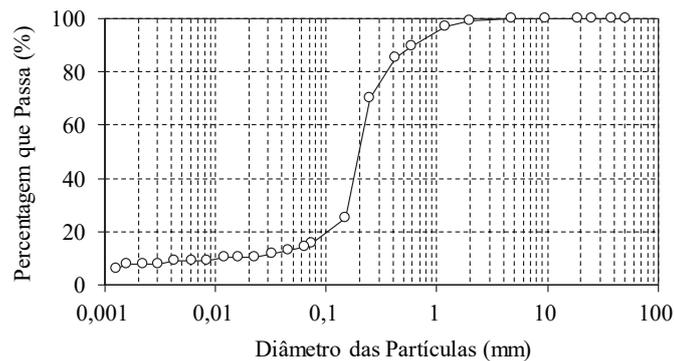


Fig. 7 – Curva granulométrica do solo.

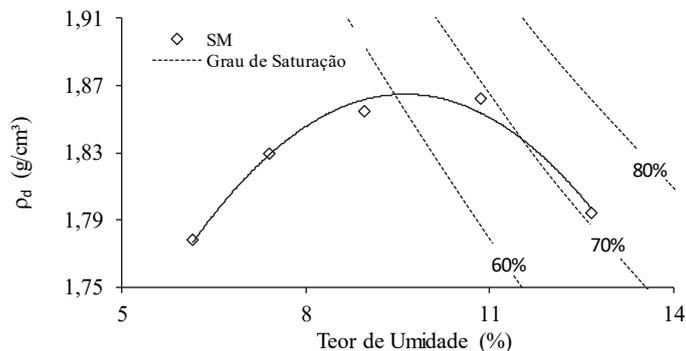


Fig. 8 – Curva de compactação do solo.

**Quadro 1** – Propriedades físicas do solo.

Parâmetro	Valor
Peso específico aparente seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )	18,6
Umidade ótima (%)	9,7
Limite de liquidez (%)	Não apresentou
Índice de plasticidade (%)	-
Densidade relativa dos grãos	2,64
Classificação SUCS	SM

### 3.2 – Caracterização química do solo

A caracterização química foi realizada no Laboratório de Solos e Água do Departamento de Ciências do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará. Esta caracterização teve o objetivo de verificar a composição química do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão, de forma a fornecer resultados que possam explicar a interação grão mineral vs. material asfáltico expressa pela adesividade solo-betume, que é importante no entendimento do comportamento das misturas solo-emulsão. Foram determinadas para o solo as seguintes características: pH em água, pH em KCl, teor de matéria orgânica (MO), soma dos cátions trocáveis (S), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de alumínio (%Al) e saturação de bases (%V), seguindo os procedimentos estabelecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997).

No Quadro 2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização química do solo estudado. De acordo com os resultados obtidos, o solo apresentou baixo valor de CTC (3,8 cmolc/kgm), indicando que o mesmo possui baixa capacidade de reter cátions. Segundo o Boletim técnico de Interpretação de Análise de Solo da ANDA (1992), o valor CTC = 3,8 cmolc/kgm é característico de solos que possuem uma das seguintes características: alta percentagem de quartzo, baixo teor de matéria orgânica, menor capacidade de reter umidade, e que são levemente ácidos.

**Quadro 2** – Resultados das análises químicas no solo.

Macronutrientes								
Ca <sup>2+</sup> *	Mg <sup>2+</sup> *	Na <sup>+</sup> *	K <sup>+</sup> *	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> * *	Al <sup>3+</sup> *	P (mg/kg)	C (g/kg)	N (g/kg)
1,40	1,10	0,24	0,11	0,99	0,10	10	5,04	0,47
Propriedades químicas								
pH			Matéria org. (g/kg)	S *	CTC *	%Al (%)	%V (%)	
Água	KCl	ΔpH						
5,6	5,1	-0,5	8,69	2,9	3,8	72	76	

\*Valores em cmolc/kgm

De acordo com os valores de pH em água (5,6) e em KCl (5,1), o solo ensaiado pode ser considerado ácido em solução de KCl 1N e moderadamente ácido em água, o que evidencia um possível potencial baixo de floculação natural do solo (ANDA, 1992). Um valor de ΔpH negativo indica que grande parte da quantidade de alumínio presente na amostra é trocável, o que é confirmado pelo valor da %Al igual a 72%. Outro fator a considerar é que quanto mais negativo for o ΔpH, menor será o predomínio de óxidos de ferro e de alumínio presentes na amostra de solo, sendo a presença destes compostos importante, uma vez que os mesmos são considerados

facilitadores da estabilização asfáltica (Jacintho, 2010), . Sendo assim, pode afirmar-se, que segundo o resultado apresentado ( $\Delta\text{pH}$  igual a -0,5), o solo utilizado na confecção das misturas estudadas apresenta moderada facilidade de estabilização.

### 3.3 – Caracterização mineralógica do solo

#### 3.3.1 – Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X é uma técnica de análise quantitativa e qualitativa da composição química do material, e baseia-se na absorção de energia por parte dos átomos, provocando uma excitação, que é seguida de uma liberação de radiação secundária chamada de fluorescência. Os raios liberados pelos átomos têm um comprimento de onda associado a cada elemento químico de acordo com a sua proporção presente na amostra. Os resultados deste ensaio serão usados principalmente para auxiliar o processo de identificação dos minerais utilizando o programa *X'Pert High Score Plus* em conjunto com os resultados da difratometria de raios X. Esse ensaio foi executado no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, utilizando o equipamento *RigaKu (ZSX Mini II)*. No Quadro 3 são apresentados os resultados da caracterização química do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão obtidos a partir dos ensaios de fluorescência de raios X.

**Quadro 3** – Elementos químicos presentes na composição do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão.

Si *	Al *	Fe *	K *	Ti *	Ca *	Zr *	S *
86,246	5,9203	3,2949	2,2920	1,0052	0,9772	0,1730	0,0911

\* Percentagem em massa

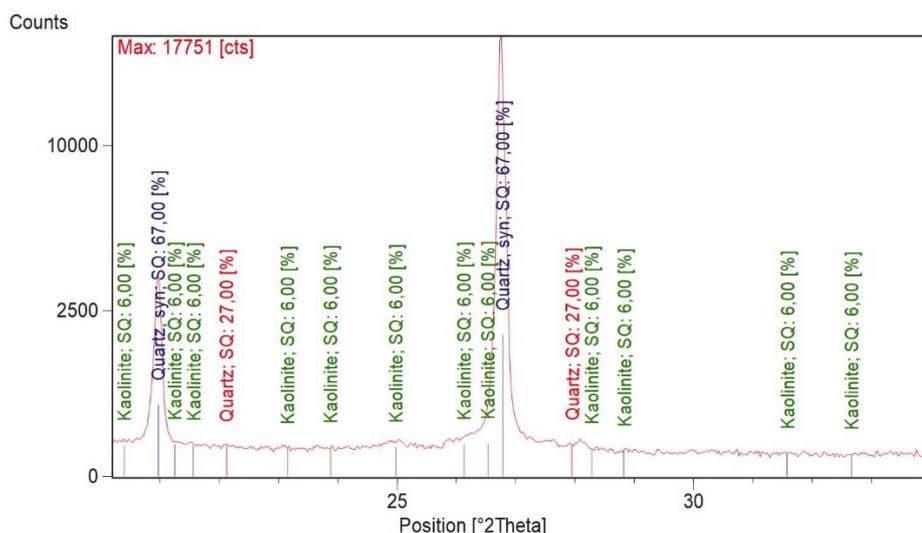
#### 3.3.2 – Difração de raios X

Segundo Silva (2013), a difração de raios X (DRX) é uma técnica baseada na incidência de radiação X na amostra, permitindo a definição da forma básica dos cristais, as distâncias interatômicas e as fases cristalinas. Diferente da radiação gama e das radiações corpusculares (alfa, beta, nêutrons, etc.), que são geradas nos núcleos atômicos e que podem ser obtidos naturalmente por decaimento radioativo de radionuclídeos, os raios X são provenientes da camada eletrônica dos átomos e são, em geral, obtidos por meio de tubos que promovem a produção da radiação X. Esses tubos consistem basicamente em um cilindro a vácuo contendo um anodo fixo ou giratório. Os valores de comprimento de onda das radiações características dependem do material do qual o anodo é feito. Após colidirem com o material, os raios X mudam a sua direção de propagação (difração), porém, mantêm o comprimento de onda da radiação incidente. O detector tem a função de identificar essa difração, realizar a contagem do número de fótons X difratados da amostra, e apresentar, desta forma, informações acerca da intensidade do feixe difratado. O detector depende, principalmente, do comprimento de onda da radiação de interesse e da intensidade máxima de fótons a ser medida.

As amostras de solo analisadas foram previamente moídas e homogeneizadas. Em seguida, foram coletadas alíquotas de aproximadamente 600 mg, as quais foram prensadas em um porta-amostra do tipo vazado utilizando-se o método de montagem denominado de *back loading*. A fonte de radiação utilizada foi monocromática  $\text{K}\alpha_1$  do elemento cobalto (Co),  $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$  a 40 kV e 30 mA, e o detector a gás do tipo proporcional a uma intensidade a ser medida em função do ângulo de varredura de  $2\theta$ , variando de 10 a 80 graus. Os dados gerados durante a leitura das amostras no difratômetro foram coletados, processados e armazenados pelo *software Data Collector* da *PANalytical*. A interpretação/caracterização foi realizada utilizando o programa

*X'Pert High Score Plus*. Esta análise também foi realizada no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC. O equipamento utilizado para realização das análises foi o difratômetro *X'Pert Pro* da marca *PANalytical*.

Na Figura 9 é apresentado o difratograma da amostra de solo analisada com a identificação de todos os minerais presentes. Observa-se de acordo com os resultados obtidos que os principais minerais identificados na amostra de solo foram o quartzo e a caulinita. A presença do quartzo foi identificada por picos bem definidos, estreitos, simétricos e intensos (intensidade até uma contagem de 17751), o que indica material com estrutura cristalina bem definida e presente em grande percentual (94%) na amostra. A caulinita foi identificada por meio de picos pouco intensos e largos, em pequena proporção (6%) na composição da amostra.



**Fig. 9** – Difratograma da amostra de solo analisada.

### 3.4 – Emulsão Asfáltica

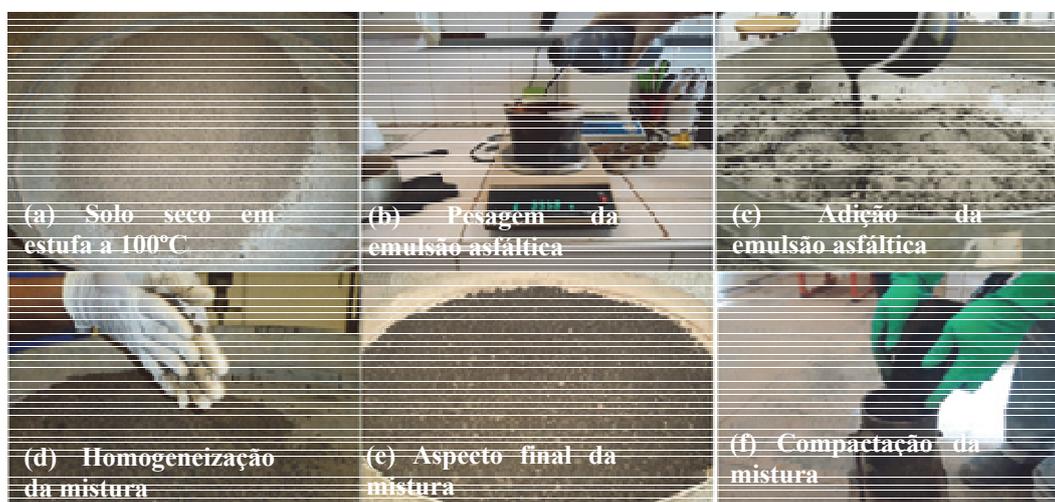
A emulsão asfáltica utilizada como agente da estabilização do solo é caracterizada como sendo do tipo catiônica de ruptura lenta (RL-1C). A utilização de uma emulsão do tipo de ruptura lenta se deu pela necessidade de compatibilizar o tempo de ruptura da emulsão com o tempo necessário para o envolvimento 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 e não permitir o envolvimento dos grãos de solo de forma satisfatória. É importante mencionar, que este tipo de emulsão asfáltica foi o mesmo utilizado pelos diferentes autores citados anteriormente que desenvolveram estudos sobre as misturas solo-emulsão (Jacintho, 2005, 2010; Miceli Júnior, 2006; Gondim, 2008; Cavalcante *et al.*, 2009; Rebelo, 2009; Rebelo *et al.*, 2014; etc.). No Quadro 4 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica de acordo com a normalização brasileira.

**Quadro 4** – Propriedades da emulsão asfáltica utilizada.

Ensaio Realizados	Especificações	Resultados
Viscosidade Saybolt Furol, s, a 50°C	(ABNT, 2000) Máx. 70	44
Peneiração, 0,84mm, % em peso máx.	(ABNT, 2012) 0,1	0,01
Resíduo, mín. % em peso	(ABNT, 1999) 60	63,2

### 3.5 – Procedimento de confecção das misturas solo-emulsão

As misturas solo-emulsão foram confeccionadas a partir da mistura manual da emulsão asfáltica à temperatura ambiente (25°C) 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, conforme citado por Soliz (2007). No presente trabalho, optou-se pela não diluição da emulsão asfáltica pelo fato de a mesma já apresentar uma viscosidade suficiente baixa que permite o envolvimento dos grãos do solo durante a operação de mistura manual. Além disto, a não adição de água à sua composição evita que haja alteração de sua composição e uma eventual ruptura prematura, o que iria prejudicar o envolvimento satisfatório dos grãos minerais, e a uniformização do filme betuminoso formado. Em relação ao não umedecimento do solo, optou-se por não o fazer, apesar de estudos anteriores sugerirem tal procedimento, pelo fato de que sendo os ligantes asfálticos materiais hidrófobos, a presença da água na superfície dos grãos minerais poderia prejudicar a adesividade do asfalto residual às partículas de solo. A Figura 10 ilustra todos os procedimentos realizados durante a confecção das misturas solo-emulsão estudadas.



**Fig. 10** – Procedimentos de confecção das misturas solo-emulsão.

O teor de emulsão inicial utilizado para a confecção das misturas foi definido a partir de um procedimento empírico e táctil-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 (Figura 11). 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 peso. De acordo com este procedimento, os teores de emulsão, em relação à massa total, utilizados na confecção das misturas solo-emulsão foram: 13%, 15%, 17%, 19%, 21%, 23%, 25%, 27%, 29% e 31%.



**Fig. 11** – Aspecto da mistura solo-emulsão após amassamento manual no teor de emulsão inicial.

### 3.6 – Compactação das misturas solo-emulsão

No presente trabalho foi avaliada a influência da metodologia de compactação das misturas solo-emulsão e da viscosidade do filme betuminoso formado sobre os grãos minerais nos parâmetros físicos massa específica aparente (DNER, 1994), percentagem do volume de vazios e percentagem do volume de vazios em relação ao grão mineral (Dantas Neto *et al.*, 2016; Lima, 2016). Desta forma, as misturas solo-emulsão confeccionadas de acordo com os procedimentos descritos anteriormente foram compactadas empregando-se a metodologia Proctor com as energias normal e modificada, e o método Marshall (DNER, 1995), tradicionalmente utilizado nos procedimentos de compactação em laboratório e dosagem de misturas asfálticas para aplicações em pavimentação.

Dantas Neto *et al.* (2016) estudaram a influência da viscosidade do ligante betuminoso nas propriedades físicas das misturas entre solo e elevados teores emulsão por meio da compactação das misturas imediatamente após a sua confecção, ou seja, antes da ruptura da emulsão asfáltica, e após 24 horas, tempo considerado como o necessário para que ocorresse a ruptura da emulsão asfáltica. Em ambos os casos, as misturas solo-emulsão, compactadas segundo a metodologia Proctor foram compactadas à temperatura ambiente (25°C). No presente trabalho, as misturas entre solo e emulsão foram compactadas segundo as metodologias descritas anteriormente à temperatura ambiente de 25°C, e imediatamente após permanecerem em estufa a 100°C durante um período de tempo de 24 horas. A colocação das misturas solo-emulsão em estufa a 100°C por 24 horas ocorreu após o envolvimento dos grãos de solo pela emulsão asfáltica ainda em estado líquido, e após a ruptura da emulsão, e teve por objetivos a diminuição da viscosidade do filme residual de betume que envolve os grãos minerais, uma vez que o asfalto é um material termoviscoelástico, e promover a evaporação da água e emulsificante ainda presentes após a ruptura da emulsão, visando com isto melhorar as características de adesividade grão-betume, e promover uma melhor compactação. O valor de 100°C para a temperatura de aquecimento foi adotada pela possibilidade de no campo haver o aquecimento da mistura sem grandes dispêndios no tocante à energia calorífica necessária, de forma a minimizar o custo de produção da mesma, e também pelas facilidades de aquecimento utilizando os equipamentos usuais existentes nos laboratórios (estufas).

No Quadro 5 são apresentados todos os procedimentos de compactação utilizados no presente trabalho para avaliação das misturas solo-emulsão estudadas.

**Quadro 5** – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão.

Metodologia de compactação	Código	Condições de compactação	Temperatura de compactação
Marshall	M24	Após 24 horas da confecção da mistura	Temperatura ambiente (aproximadamente 25°)
Marshall	MQ	Após 24 horas da confecção da mistura	100°C
Proctor normal	PN24	Após 24 horas da confecção da mistura	Temperatura ambiente (aproximadamente 25°)
Proctor modificado	PM24	Após 24 horas da confecção da mistura	Temperatura ambiente (aproximadamente 25°)

### 3.7 – Microscopia da estrutura das misturas solo-emulsão compactadas

Ensaio de microscopia na estrutura compactada das misturas solo-emulsão foram realizados com o objetivo de se analisar a influência dos parâmetros avaliados na distribuição dos materiais na massa das misturas solo-emulsão estudadas. Para a visualização da estrutura compactada das misturas solo-emulsão foi utilizado o estereoscópio de pesquisa *SMZ18* da *Nikon*, com zoom manual, taxa de zoom de 18:1, e uma alcance do zoom de 0,75-13,5x. As imagens foram capturadas utilizando o sistema de câmeras digital (*Digital Sight DS-R1*) com resolução de 12,7 megapixels.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

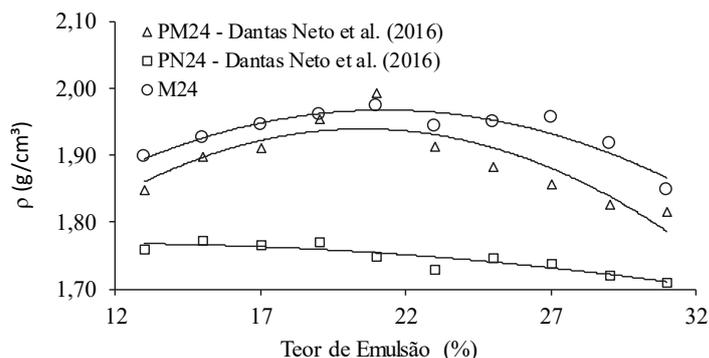
### 4.1 – Influência da metodologia de compactação

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros físicos das misturas solo-emulsão compactadas de acordo com a metodologia Marshall (75 golpes/face), 24 horas após a mistura dos materiais, conforme procedimento descrito anteriormente. Os resultados obtidos para todos os parâmetros físicos das misturas compactadas (massa específica aparente, percentagem de volume de vazios e percentagem de vazios em relação ao grão mineral) são comparados àqueles apresentados por Dantas Neto *et al.* (2016) que compactaram misturas entre solo e emulsão com os mesmos materiais e nas mesmas condições utilizando a metodologia Proctor com as energias normal e modificada.

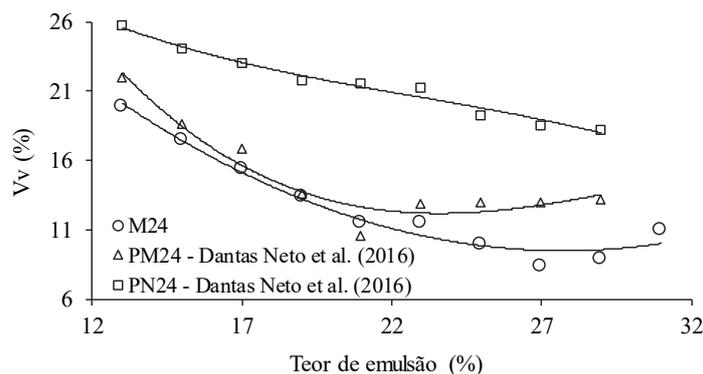
A Figura 12 apresenta a variação da massa específica aparente das misturas solo-emulsão compactadas 24 horas após a mistura dos materiais (solo e emulsão) utilizando a metodologia Marshall, e a comparação com os resultados de Dantas Neto *et al.* (2016). Estes resultados mostram que a compactação das misturas solo-emulsão utilizando a metodologia Marshall permitiu a definição de um valor máximo para a massa específica aparente, e um correspondente teor ótimo de ligante, assim como já havia ocorrido quando da compactação das misturas por Dantas Neto *et al.* (2016) na energia Proctor modificada. Isto mostra, que a energia de compactação aplicada pela metodologia Marshall foi também capaz de promover a compactação das misturas entre solo e emulsão por meio da deformação produzida no filme betuminoso que

envolve os grãos, o qual foi citado por Dantas Neto *et al.* (2016) como o mecanismo que controla a compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão.

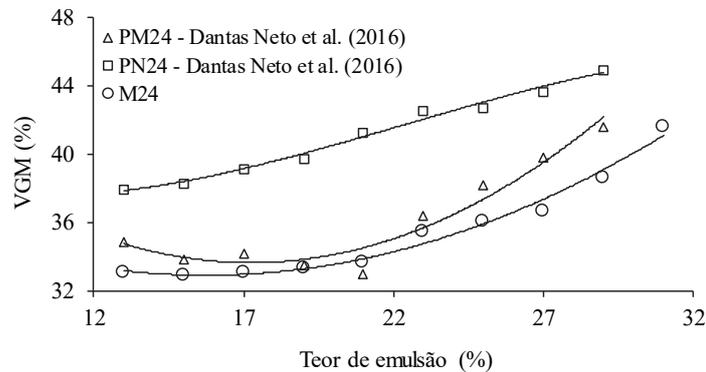
De uma forma geral, observa-se que a metodologia Marshall produziu uma compactação mais eficiente nas misturas entre solo e emulsão que a metodologia Proctor na energia modificada, conforme pode-se observar nos maiores valores de massa específica aparente (Figura 12), e nas menores percentagens de vazios na mistura (Figura 13) e de vazios em relação ao esqueleto mineral (Figura 14). Os resultados obtidos para a percentagens de vazios na mistura (Figura 13) e em relação ao grão mineral (Figura 14) mostraram as mesmas tendências descritas pelos resultados de Dantas Neto *et al.* (2016), ou seja, diminuição da percentagem de volume de vazios (Vv) na mistura até o teor de emulsão ótimo (correspondente à massa específica aparente máxima), e aumento da percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) para teores de emulsão superiores ao valor adotado como ótimo. A diminuição e posterior constância, ou leve crescimento, após o teor ótimo de emulsão observado para a percentagem do volume de vazios se dá pelo fato do aumento do teor de emulsão produzir um aumento da espessura do filme betuminoso envolvendo os grãos de solo, o qual acaba por ocupar o mesmo volume nos vazios. Por outro lado, no caso da percentagem de vazios em relação ao grão mineral, observa-se que ao se atingir a condição ótima de compactação, qualquer adição de emulsão asfáltica irá contribuir para o aumento da espessura do filme betuminoso residual, o qual devido à sua rigidez, tende a afastar os grãos minerais, aumentando assim, os vazios no esqueleto mineral.



**Fig. 12** – Influência da metodologia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas solo-emulsão.



**Fig. 13** – Influência da metodologia de compactação nos valores da percentagem do volume de vazios (Vv) das misturas solo-emulsão.

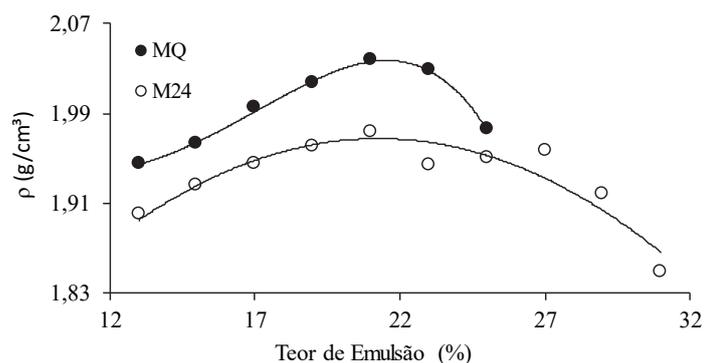


**Fig. 14** – Influência da metodologia de compactação nos valores da percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) das misturas solo-emulsão.

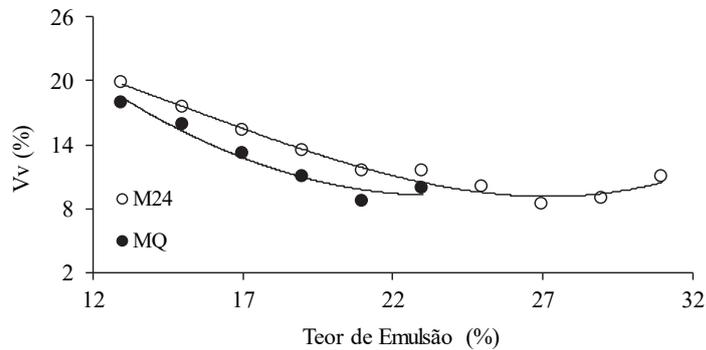
#### 4.2 – Influência da temperatura do filme betuminoso na compactação das misturas solo-emulsão

Na Figura 15 são apresentadas as curvas de compactação das misturas M24 e MQ. Observa-se que o aumento da temperatura do filme betuminoso, promovido pelo aquecimento da mistura em estufa a 100°C antes da compactação levou a um aumento da massa específica aparente das misturas entre solo e emulsão, e a uma pequena diminuição das percentagens dos volumes de vazios da mistura (Figura 16) e dos vazios em relação aos grãos minerais (Figura 17). Isto comprova a hipótese que a rigidez do filme betuminoso dificulta a compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica, pois, uma vez que a rigidez é diminuída pelo aumento da temperatura, as misturas atingiram uma condição mais compacta. Os resultados mostram ainda que apesar de o aumento da temperatura se refletir num ganho de eficiência na compactação, a condição ótima de compactação das misturas compactadas a 100°C é obtida aproximadamente com o mesmo teor de emulsão asfáltica da mistura compactada à temperatura ambiente.

Apesar de aparentemente o aquecimento das misturas entre solo e os elevados teores de emulsão se apresentar como um procedimento de laboratório, é importante se mencionar que no campo, caso necessário, tal procedimento pode ter também realizado, caso se haja necessidade de

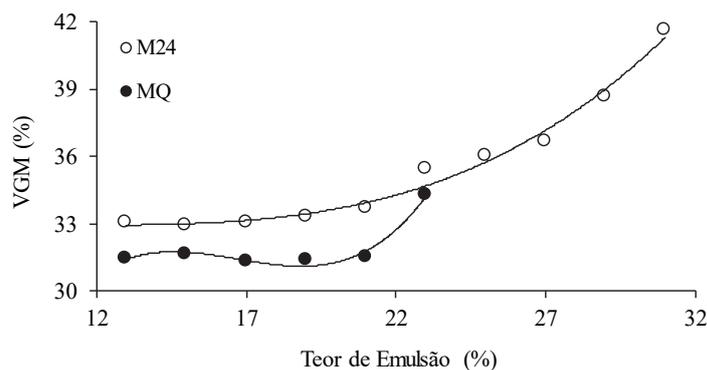


**Fig. 15** – Variação da massa específica aparente com o teor de emulsão asfáltica das misturas M24 e MQ.



**Fig. 16** – Variação da porcentagem de volume de vazios com o teor de emulsão asfáltica das misturas M24 e MQ.

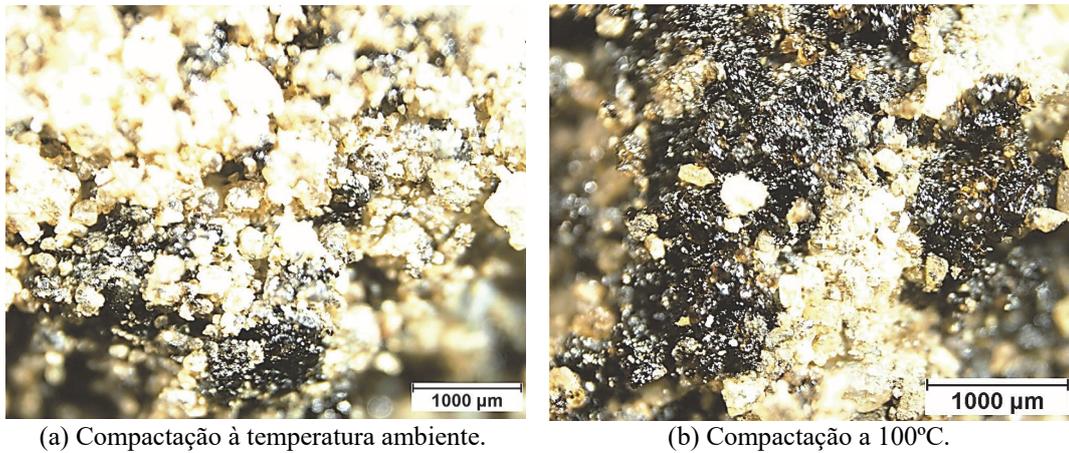
uma compactação mais eficiente. Neste caso, procedimentos tradicionais de usinagem de misturas asfálticas a quente poderiam ser utilizados, empregando-se menores energias que as usualmente utilizadas nas misturas usinadas a quente, o que não levaria a grandes aumentos de custos, e também a menores níveis de poluição.



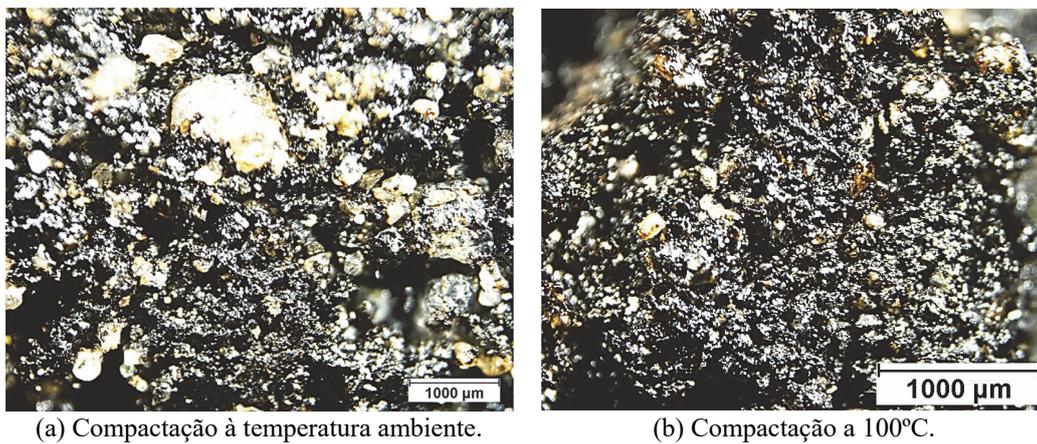
**Fig. 17** – Variação da porcentagem de volume de vazios em relação ao agregado mineral com o teor de emulsão asfáltica das misturas M24 e MQ.

#### 4.3 – Microscopia da estrutura das misturas solo-emulsão

As Figuras 18 e 19 mostram as estruturas das misturas entre solo e emulsão asfáltica compactadas na metodologia Marshall à temperatura ambiente (M24) e a 100°C (MQ), confeccionadas com teores de 13% e 31%, respectivamente. Os resultados mostram que houve um melhor envolvimento dos grãos de solo pelo asfalto residual nas misturas compactadas após período em estufa a 100°C quando comparadas com as compactadas à temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Observa-se que a colocação das misturas em estufa a 100°C antes da compactação, além de promover a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, contribuindo para uma melhor compactação, promoveu uma melhor distribuição do asfalto residual no interior da massa de solo. Isto pode levar a um melhor comportamento das misturas solo-emulsão, uma vez que estando a mistura solo-emulsão mais homogênea, a possibilidade da formação de grumos, conforme reportado por Jacintho (2010), é menor, levando o material a um melhor desempenho em termos de comportamento mecânico e hidráulico.



**Fig. 18** – Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 13%.



**Fig. 19** – Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 31%.

## 5 – CONCLUSÕES

Os resultados de caracterização do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão mostraram que se trata de uma areia siltosa, classificada segundo o SUCS como SM, constituída basicamente por elevadas proporções de quartzo e caulinita em menores proporções. Solos com tais características dificilmente apresentam propriedades de resistência ao cisalhamento, estanqueidade e deformabilidade quando compactados que sejam adequadas à execução de diferentes tipos de obras geotécnicas. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização química e mineralógica indicaram que este solo apresenta constituintes químicos que dificultam o processo de estabilização. Portanto, estudos adicionais além da definição da metodologia de compactação e dosagem das misturas solo-emulsão confeccionadas com este material granular são imprescindíveis, e serão realizados na continuidade do desenvolvimento deste trabalho.

No que se refere ao estudo da compactação das misturas solo-emulsão, observa-se que a utilização da metodologia Marshall produziu um aumento na massa específica aparente, e uma diminuição das percentagens de volume de vazios na mistura, e do volume de vazios em relação aos grãos minerais, se comparada com a metodologia Proctor com as energias normal e modificada. Além disto, outro fator importante mais uma vez na compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica foi a rigidez, ou a viscosidade, do filme betuminoso residual que envolve os grãos de solo na mistura.

Conforme também observado por outros autores, a diminuição da viscosidade do filme betuminoso provocou uma melhoria as características de compactação das misturas solo-emulsão, expressas pelo aumento da massa específica aparente e redução das percentagens do volume de vazios, seja, da mistura, seja em relação aos grãos minerais. No presente trabalho, a viscosidade do filme betuminoso foi diminuída pelo aumento da temperatura da mistura solo-emulsão em estufa a 100°C. Os resultados da microscopia realizada nas misturas compactadas mostraram que o aquecimento do material previamente à compactação produziu uma melhor distribuição do ligante betuminoso na massa de solo, o que pode resultar no aumento da homogeneidade da mistura, e consequentemente, na melhoria do seu comportamento, em comparação às misturas compactadas a temperatura ambiente, nas quais ainda é possível observar a formação de alguns grumos formados entre o ligante betuminoso e a fração mais fina do solo.

Assim sendo, a partir dos resultados obtidos pode considerar-se que a utilização da metodologia Marshall possibilitou uma maior compactação das misturas entre solo e a emulsão asfáltica compactadas à temperatura ambiente 24 horas após a realização da mistura, quando comparada às compactações feitas nas mesmas condições pela metodologia Proctor (normal e modificada). Além disto, o procedimento de aquecimento à 100°C das misturas possibilitou uma melhor compactação das misturas estudadas (metodologia Marshall) pela diminuição da viscosidade do filme betuminoso.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Asfalto Nordeste pelo fornecimento das amostras de emulsão asfáltica utilizadas, e à CAPES – Coordenação de Apoio à Pesquisa e Ensino Superior – pelo suporte financeiro dado durante a realização desta pesquisa.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984a). NBR 6459 – *Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 6 p.
- ABNT (1984b). NBR 7180 – *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p.
- ABNT (1984c). NBR 7181 – *Solo – Análise Granulométrica. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 p.
- ABNT (1984d). NBR 6508 – *Solo – Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 8 p.
- ABNT (1986). NBR 6508 – *Solo – Ensaio de Compactação. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 10p.
- ABNT (1999). NBR 14376 – *Emulsões Asfálticas – Determinação do Resíduo Asfáltico por Evaporação - Método Expedito. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p.

- ABNT (2000). NBR 14491 – *Emulsões Asfálticas – Determinação da Viscosidade Saybolt Furol. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p
- ABNT (2012). NBR 14393 – *Emulsões Asfálticas – Determinação da Peneiração. Método de Ensaio*, Associação Brasileiro de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 3 p
- ANDA (1992). *Interpretação de Análise do solo – conceitos e aplicações*. Associação Nacional Para Difusão de Adubos. Boletim técnico nº2. 3ª edição, 1992.
- Cavalcante, E. H.; Santos, W. J.; Stumpf, T. R. A.; Veiga, I. L. (2009). *Uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe*. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. Fortaleza/ CE, Brasil, 8 p.
- Dantas Neto, S. A.; Lima, F. C.; Leme, R. F. (2016). *Estudo da Compactação de Misturas Solo-Emulsão Para Emprego em Núcleo de Barragem Zoneadas*. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais, 8 p.
- DNER (1994). *DNER – ME 117 – Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente diametral. Método de Ensaio*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 4p.
- DNER (1995). *DNER – ME 043 – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Método de Ensaio*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 11p.
- EMBRAPA (1997). *Manual de Métodos de análise de solo*. Centro Nacional de Pesquisa do Solo, 2a edição, Rio de Janeiro, RJ, 212 p.
- Ferreira, A.M. (1980). *Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 99 p.
- Gondim, L. M. (2008). *Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do Agropólo do baixo Jaguaribe – Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ce, 219 p.
- Gouveia, L. T.; Fernandes Júnior, J. L.; Soares, J. B. (2007). Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. Transporte, volume XV, Nº 1, junho de 2007. ISSN: 1415-7713.
- Jacinto, E. C. (2005). *Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens*. Dissertação de Mestrado, Publicação Nº G.DM-132/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160 p.
- Jacinto, E. C. (2010). *Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicado a barragens*. Tese de doutorado. Publicação G.TD-063/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 279 p.
- Lima, F. C. (2016). *Misturas solo-emulsão para emprego em núcleo de Barragens zonadas*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ce, 78 p.
- Linsha R. D.; Dharanya Y. P.; Vinodhini V.; Pavithra C. (2016). *Improvement of Shear Strength of Soil Using Bitumen Emulsion*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 7(6), 2016, pp.156 – 165.
- Miceli Júnior, G. (2006). *Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 267 p.

- Nascimento, M. V.; Lucena, A. E. F. L.; Lucena, L. C. F. L.; Costa, S. C. F. E. (2003). *Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com uso de compactação por impacto e por amassamento*. Ciência & Engenharia, v. 22, n° 2, p. 115-120, jul – dez 2013.
- Pacheco, L. M. (2011). *Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: estudo laboratorial*. Trabalho de Diplomação. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 93 p.
- Pessoa, F. H. C. (2004). *Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário*. Dissertação de Mestrado, Publicação N° G.DM-117A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.
- Rebello, E. P. (2009). *Estudo de misturas solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 116 p.
- Rebello, E. P.; Ferreira, M. R. P.; Frota, C. A. (2014). *Comportamento da misturas solo-emulsão para o sistema viário de Urucu (Coari-AM)*. ENGEVISTA, V.16, n. 2. P. 180-190, junho 2014.
- Sampaio, M. G. (2008). *Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura, Campinas, SP, 157 p.
- Sant'ana, W. C. (2009). *Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, SP, 341 p.
- Silva, A. L. (2013). *Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 114 p.
- Soliz, V. V. P. (2007). *Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 166 p.
- Suarez, D. A. A. (2008). *Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 144 p.
- Thuller, R.B. (2005). *Estudo de solos do Estado do Rio de Janeiro para aplicação em baixo volume de tráfego*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005, 120 p.
- Verma, S.K.(2015). *A Laboratory Study On Use Of Bitumen Emulsion In Black Soil*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Vol. 02, 2015, pp 548- 553