

## Avaliação do comportamento cisalhante de misturas solo-emulsão com teores de emulsão variando de 16% a 28% em massa

Evaluation of the shear behavior of soil-emulsion mixtures with emulsion contents ranging from 16% to 28% by mass

Paulo Mateus Barros Rodrigues<sup>1</sup> , Silvrano Adonias Dantas Neto<sup>1</sup>,  
Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade 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.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil. Campus do Pici, Bloco 733, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil.

e-mail: paulombrodrigues@alu.ufc.br, silvrano@ufc.br, babadopulos@ufc.br

### RESUMO

Neste artigo avaliou-se o efeito nos parâmetros de resistência de um solo SM estabilizado com teores de emulsão asfáltica variando entre 16% e 28% em massa. A metodologia consistiu na coleta e caracterização do solo, mistura dos materiais e exposição ao ar por 24 horas, compactação no teor ótimo pela energia Marshall (22%), e em teores acima (28%) e abaixo (16%) do ótimo, e realização de ensaios de compressão triaxial CIU em condições saturadas. O solo apresentou comportamento típico ao de um material elastoplástico com endurecimento, enquanto que as misturas apresentaram comportamento semelhante ao de um material elástico perfeitamente plástico. À medida em que o teor de emulsão foi aumentado, menores foram os ângulos de atrito e, para as misturas com 16% e 22%, maiores foram os interceptos coesivos. A mistura 28% de emulsão teve uma redução em sua coesão, devido ao excesso de ligante, o que prejudicou o contato grão a grão. Constatou-se que após determinado nível de deformação axial as misturas obtiveram um leve ganho de resistência, justificado pelo deslocamento da película de asfalto.

**Palavras-chave:** Solo-emulsão; asfalto; resistência ao cisalhamento.

### ABSTRACT

In this article, the effect on the resistance parameters of a stabilized SM soil with asphalt emulsion contents varying between 16% and 28% by mass was evaluated. The methodology consisted of collecting and characterizing the soil, mixing the materials and exposing them to air for 24 hours, compacting at the optimal level by Marshall energy (22%), and at levels above (28%) and below (16%) the optimum, and carrying out CIU triaxial compression tests under saturated conditions. The soil presented behavior typical of an elastic-plastic material with hardening, while the mixtures presented behavior similar to that of an elastic perfectly plastic material. As the emulsion content was increased, the friction angles were smaller and, for mixtures with 16% and 22% of content, the cohesive intercepts were higher. The mixture with 28% content of asphalt emulsion had a reduction in its cohesion, due to the excess of binder, which impaired the grain-to-grain contact. It was found that after a certain level of axial deformation, the mixtures obtained a slight gain in resistance, justified by the displacement of the asphalt film.

**Keywords:** Soil-emulsion; asphalt; shearing strength.

### 1. INTRODUÇÃO

A utilização de misturas solo-emulsão asfáltica para a construção de pavimentos já foi objeto de estudo de diversas pesquisas, onde os teores de emulsão asfáltica estudados não costumam passar de 10% em massa [1–4].

Nesses estudos, as principais melhorias proporcionadas ao comportamento mecânico dos solos são a diminuição da permeabilidade, aumento da resistência mecânica, maior flexibilidade, formação de um filme betuminoso em torno dos grãos de solo para melhoria da parcela coesiva da resistência ao cisalhamento, maior resistência contra ação de ácidos, álcalis e sais, dentre outras.

Os estudos de misturas solo-emulsão em outras áreas da Geotecnia ainda são muito incipientes, destacando-se algumas aplicações para uso na construção de barragens de terra como os trabalhos JACINTHO [5], LIMA [6], PEREIRA [7], LIMA e DANTAS NETO [8], BRITO [9], DANTAS NETO *et al.* [10] e BRITO *et al.* [11].

JACINTHO [5] misturou três tipos de solo, sendo eles uma areia siltosa (SM), uma areia argilosa (SC) e uma argila (CL), com teores de emulsão variando entre 0% até 8% em massa. Os resultados obtidos por esses autores foram ainda inconsistentes uma vez que indicaram um aumento nos coeficientes de permeabilidade e não houve aumento de coesão das misturas de solo – emulsão estudadas, indo de encontro ao comportamento esperado quando da adição de um ligante asfáltico aos solos. Uma possível explicação desses resultados se deu pelos teores de emulsão utilizados serem considerados muito baixos para tal fim, ocasionando o surgimento de macro poros no material.

Tendo em vista a macroporosidade observada nos estudos de Jacintho com teores de emulsão de até 8% em massa, LIMA [6] e LIMA e DANTAS NETO [8] avaliaram o processo de compactação em misturas de uma areia siltosa (SM) com teores mais elevados de emulsão, variando entre 13% até 31% em massa, nas energias Proctor Normal, Proctor Modificado e Marshall. O aumento dos teores de emulsão asfáltica nas misturas estudadas por LIMA [6] e LIMA e DANTAS NETO [8] teve por objetivo a obtenção de uma mistura mais homogênea que não apresentasse a elevada macroporosidade obtidas nas misturas estudadas por JACINTHO [5].

PEREIRA [7] e DANTAS NETO *et al.* [10] analisaram o comportamento hidráulico de misturas de uma areia siltosa (SM) com teores de emulsão variando de 13% até 28% em massa, compactadas nas energias Proctor Modificado e Marshall, bem como o comportamento dessas misturas em seus respectivos teores ótimos de compactação. Nestes estudos foi observado que a adição da emulsão asfáltica levou a um aumento no intercepto coesivo do solo, que inicialmente apresentou um valor de 3,2 kPa e chegou a 14,2 kPa para misturas com o teor ótimo de 22% de emulsão, e uma diminuição no ângulo de atrito deste, que inicialmente possuía valor de 38°, enquanto nas misturas chegaram a valores de 10,9° para baixos níveis de tensão confinante. Além disso, observou-se uma diminuição do coeficiente de permeabilidade ( $k_{20}$ ) das misturas à medida que se aumentou os teores de emulsão asfáltica chegando a valores da ordem de  $10^{-8}$  cm/s nas misturas com 28% de teor de emulsão asfáltica em massa.

BRITO [9] e BRITO *et al.* [11] estudaram a influência do tempo de cura nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas de uma areia siltosa (SM) com teores emulsão asfáltica variando entre 10% e 25% em massa, compactadas na energia Marshall. De forma semelhante ao obtido nos estudos de PEREIRA [7] e DANTAS NETO *et al.* [10], esses autores obtiveram que o aumento do teor de emulsão levou a um aumento do intercepto coesivo e a uma diminuição do ângulo de atrito. Avaliou-se a influência do tempo no processo de cura induzido aos corpos-de-prova confeccionados, deixando-os expostos ao ar livre por 1, 7 e 28 dias antes de proceder ao ensaio triaxial e, em todos os casos estudados, não houve influência desse tempo de cura nos valores obtidos dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Diante o exposto, observa-se que a maior parte dos estudos existentes foram desenvolvidos considerando-se misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas somente nas condições ótimas de compactação, que geralmente correspondem aos teores de emulsão que levam à maior massa específica aparente e menor volume de vazios. Em função da pequena quantidade de estudos desse tipo de mistura com elevados teores, torna-se necessário um maior entendimento sobre a influência do teor de emulsão, e conseqüentemente do volume de vazios, no comportamento cisalhante das misturas. Até o presente momento não há estudos que definam o ganho, ou perda, nos valores dos parâmetros de resistência para misturas com elevados teores de emulsão asfáltica e em condições distintas do teor ótimo de compactação.

Assim sendo e levando-se em consideração a metodologia de compactação definida por LIMA [6] e LIMA e DANTAS NETO [8], este trabalho tem por objetivo o estudo do comportamento cisalhante de misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas com teores de emulsão de 16%, 22% e 28%, em massa. A adoção destas quantidades de emulsão se deu pelo fato de representarem não somente a condição ótima de compactação (teor de 22%), já estudada por outros autores, mas também as condições, ainda pouco avaliadas, com menores e maiores teores em relação ao teor ótimo, que levam as misturas a condições de compactação mais desfavoráveis, e conseqüentemente, a maiores volumes de vazios.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Solo empregado

Para a realização deste trabalho, foi feita a coleta de duas amostras de solo dentro dos limites do Campus da Universidade Federal do Ceará – UFC, na cidade de Fortaleza, no sítio de coordenadas UTM 3°45'7,5"S e 38°34'21,9"W. Foram empregadas as seguintes normas técnicas para a caracterização do material: NBR 6457 [12], NBR 6459 [13], NBR 7180 [14], NBR 7181 [15], NBR 7182 [16], DNER – ME 093 [17].

O solo em questão foi identificado como uma areia siltosa (SM), segundo os critérios do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). A Figura 1 apresente a curva granulométrica das duas amostras coletadas. Escolheu-se esse tipo de solo pelo fato deste apresentar propriedades e características similares ao de solos aluvionares, os quais costumam ser encontrados em abundância próximos às localidades de obras de barragens de terra. A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores médios dos parâmetros geotécnicos calculados para as duas amostras.

### 2.2. Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica escolhida nesta pesquisa foi uma emulsão de ruptura lenta do tipo catiônica (RL-1C). Foi utilizada uma emulsão de ruptura lenta, que leva até 4 horas para completar o processo de ruptura, a fim de que houvesse tempo hábil para a completa realização da sua mistura com o solo. A Tabela 2 apresenta um resumo das características da emulsão asfáltica RL – 1C utilizada, foram empregadas as seguintes normas técnicas para a caracterização da emulsão: NBR 14950 [18], NBR 14393 [19], NBR 14376 [20].

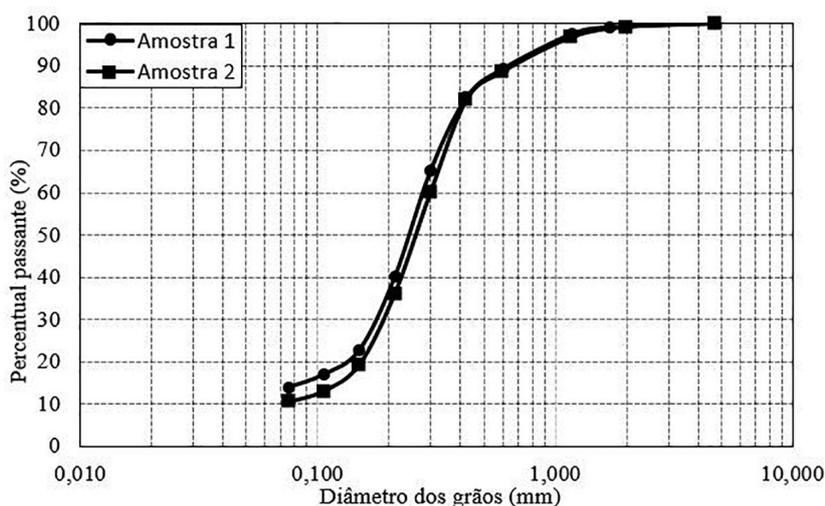


Figura 1: Curva de compactação da mistura solo e emulsão.

Tabela 1: Resumo parâmetros geotécnicos do solo estudado.

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO SOLO	VALOR	UNIDADE
Massa específica aparente seca máxima – Proctor Normal	1,87	g/cm <sup>3</sup>
Umidade ótima	9,74	%
Limite de liquidez	NL	%
Limite de plasticidade	NP	%
Densidade relativa dos grãos	2,64	adimensional

Tabela 2: Propriedades da emulsão asfáltica RL-1C.

ENSAIOS REALIZADOS	ESPECIFICAÇÕES - IBP/ABNT	RESULTADOS
Viscosidade “Saybolt-Furol”, sSF, a 50°C	Máx. 70	44
Peneiração, 0,84 mm, % em peso	Máx. 0,10	0,01
Resíduo, % em peso	Mín. 60	63,2

### 2.3. Determinação dos teores de emulsão asfáltica

A determinação dos teores de emulsão foi feita de modo a confeccionar um corpo de prova no teor ótimo da curva de compactação do material e mais um teor acima e abaixo deste ponto, obtidos nos ensaios de compactação das misturas solo-emulsão com 24 horas de aeração e aplicando-se a energia de compactação Marshall (M24) conforme o procedimento apresentado em PEREIRA [7]. A energia Marshall foi escolhida como objetivo de estudo pelo fato de proporcionar misturas mais homogêneas entre o solo e a emulsão asfáltica e uma menor quantidade de macroporosidade [6, 8].

Assim, adotou-se os teores de emulsão asfáltica de 16%, 22% e 28%, em massa total da mistura antes do processo de perda de água da emulsão. Tais teores foram escolhidos, a fim de se entender o comportamento cisalhante das misturas entre solo e diferentes teores de emulsão asfáltica definidos de modo a se ter corpos-prova em diferentes condições de volume de vazios ao longo da curva de compactação obtida (Figura 2).

O tempo de 24 horas de aeração foi adotado a fim de favorecer a ruptura da emulsão e a formação do filme asfáltico ao redor das partículas de solo antes da compactação dos corpos-de-prova. Vale salientar que uma das vantagens em se trabalhar com misturas confeccionadas segundo este procedimento (M24) se dá pela possibilidade armazenagem do material, antes de sua utilização facilitando assim o processo de execução e aumentando a produtividade do processo de aplicação da mistura [6].

### 2.4. Mistura entre o solo e a emulsão asfáltica

O procedimento para a mistura dos materiais foi o mesmo utilizado nos estudos de Lima [6], Pereira [7] e Brito [9] e obedeceu às seguintes etapas:

- (i) Destorroamento do solo – procedeu-se com uso de almofariz e mão de gral, até que não tivessem mais torrões de solo;
- (ii) Utilização de um repartidor de amostras até que o material fosse reduzido de forma representativa;
- (iii) Secagem em estufa à 100°C por 24 horas – utilizou-se estufa não-aerada e sem ventilação;
- (iv) Resfriamento do solo à temperatura ambiente de cerca de 25°C – executado em laboratório em local com umidade aproximada de 70% (média da cidade de Fortaleza, Brasil);
- (v) Pesagem e mistura do solo com a emulsão asfáltica -por aproximadamente 5 minutos, de forma manual, utilizando-se de espátula e recipiente metálico, com mistura contínua;
- (vi) Exposição do material misturado ao ar livre por 24 horas (aeração) em camada de cerca de 10 cm de espessura e sem compactação;
- (vii) Compactação compactador MCT.

### 2.5. Confeção dos corpos de prova (CP)

As condições de compactação foram determinadas a partir dos resultados apresentados na Figura 2, sendo o controle dos corpos de prova (CP) feito a partir da sua massa específica aparente máxima. A compactação se

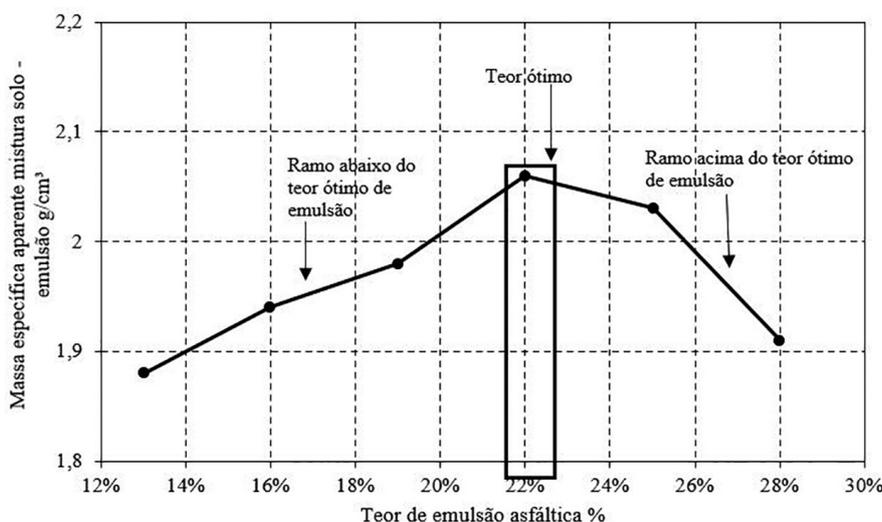


Figura 2: Curva de compactação da mistura solo e emulsão – M24 [7].

deu com o auxílio do compactador MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), o qual, segundo a DNER-ME 258 [21], utiliza um martelo cilíndrico com peso de 2270 g e uma altura de queda de 305 mm, e 50 mm de diâmetro. Os corpos de prova possuíam massa de 375,02 g e grau de compactação de 98,4% para a amostra com teor de emulsão asfáltica de 16%, 392,69 g e grau de compactação de 97,1% para a amostra com teor de 22% e 371,10 g e grau de compactação de 98,9% para o teor de 28%, correspondentes as respectivas massas específicas encontradas na construção da curva de compactação (Figura 2).

De modo a compatibilizar a energia empregada no estudo de dosagem (Ensaio Marshall) com aquela utilizada na confecção dos corpos de prova, a compactação foi feita em 2 camadas com 50 mm de espessura, aplicando-se 75 golpes em cada uma.

Para a moldagem dos corpos de prova somente de solo, utilizou-se o mesmo equipamento adotando duas camadas de compactação com 50 golpes em cada uma delas. Essa diferença de energia aplicada entre o solo SM e as misturas com emulsão foi escolhida de maneira a reproduzir corpos de prova de emulsão asfáltica com energia de compactação semelhante à Marshall e corpos de prova de solo com energia semelhante à Proctor Normal. A Figura 3 apresenta corpos de prova da mistura solo-emulsão após a compactação.

## 2.6. Cura dos corpos de prova solo – emulsão asfáltica

Os corpos de prova de solo SM foram ensaiados logo após sua moldagem. Já os corpos de prova de mistura solo-emulsão passaram por um tempo de exposição ao ar antes da saturação. Sendo assim, a mistura solo – emulsão, após as 24 horas de aeração e posterior compactação, foi deixada exposta ao ar livre, em temperatura ambiente de cerca de 25°C e com umidade aproximada de 70% (média da cidade de Fortaleza, Brasil), pelo período mínimo de 07 dias, uma vez que após este período havia uma maior rigidez destes, principalmente nos que continham maiores teores de emulsão, o que facilitou o manuseio para a preparação do ensaio triaxial e, segundo BRITO [9], a utilização de períodos de cura não influencia nos parâmetros de resistência ao cisalhamento para o tipo de ensaio avaliado neste artigo.

## 2.7. Ensaio de compressão triaxial

Os ensaios de compressão triaxial realizados foram do tipo consolidado isotropicamente e não drenado (CIU). Esse tipo de análise foi priorizado por permitir determinar os parâmetros de resistência totais e efetivos do material e em função dos valores muito baixos de permeabilidade dessas misturas (da ordem de  $10^{-8}$  m/s) conforme determinado por Pereira [7].

O ensaio foi conduzido em deformações controladas a uma velocidade de 0,0813 mm/minuto. Esta velocidade foi adotada, segundo procedimento descrito por HEAD [22], a fim de que fosse possível a equalização de poropressões geradas internamente no CP, durante a ruptura.

O controle da etapa de adensamento das misturas com 16% e 22% de teor de emulsão foi feita a partir da quantidade de volume de água que saía do corpo de prova, valores estes auferidos com o auxílio de uma bureta

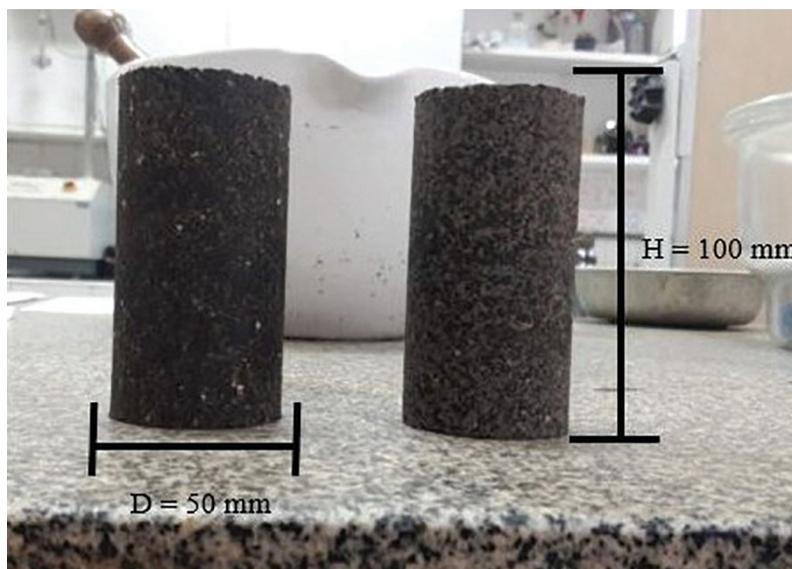


Figura 3: Corpos de prova após compactação.

graduada. Já o controle do adensamento da mistura com 28% de emulsão foi feito a partir da equalização das poropressões, tendo em vista que para este teor houve um descompasso entre o tempo de dissipação da poropressão e de expulsão de água do interior dos corpos de prova. O controle da dissipação do excesso de poropressão interna foi feito com o auxílio de um transdutor eletrônico para medição de poropressões, conectado pela célula de carga.

As tensões de confinamento adotadas para a construção das envoltórias de ruptura foram de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, tanto para os corpos de prova de solo, quanto para os de solo-emulsão. Os procedimentos de montagem das células de carga e realização do ensaio seguiram as recomendações dadas por HEAD [22] e pela ASTM D4767.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Adensamento dos corpos de prova

Ao analisar os resultados dos ensaios triaxiais, o adensamento do solo e das misturas somente foram considerados concluídos, e o corpo de prova considerado estabilizado, após o fim da expulsão de água deste. A Figura 4 apresenta as curvas de adensamento, com o eixo x na escala de raiz quadrada do tempo, do solo SM e das misturas com 16% e 22% de teor de emulsão asfáltica em massa na tensão confinante de 200 kPa, considerada a com condições mais desfavoráveis para estabilização do corpo de prova.

Analisando os resultados da Figura 4, observa-se uma consonância entre os tempos de adensamento e da completa dissipação do excesso de poropressão. Constatou-se uma semelhança nas curvas do solo SM e da mistura com 16%, mesmo quando os corpos de prova eram submetidos a elevadas tensões confinantes. Para ambos os casos, o adensamento ocorreu no primeiro minuto de ensaio. Tal comportamento já era esperado, uma vez que tanto para este teor de emulsão, como para o solo SM, o coeficiente de permeabilidade é da ordem de  $10^{-5}$  cm/s [7], valor este que propicia uma maior facilidade em permitir a saída d'água do interior dos corpos de prova.

Já para os corpos de prova com 22% de emulsão foram necessários 240 minutos para cessarem as variações volumétricas e de poropressão, na confinante de 200 kPa. Este tempo, superior aos obtidos com o solo SM ou com o solo misturado com 16% de emulsão, pode ser justificado em função da reduzida permeabilidade para o teor de 22% de emulsão na mistura, da ordem de  $10^{-6}$  cm/s [7], o que torna mais difícil a saída de água do corpo de prova.

A Figura 5 apresenta os resultados de adensamento dos corpos de prova com teor de 28% de emulsão asfáltica em massa. Observou-se que mesmo com uma constância de variação volumétrica ainda havia mudança significativa das poropressões. Nesses casos, em virtude de haver um descompasso entre o tempo de dissipação do excesso de poropressão e de expulsão de água do interior do corpo de prova, definiu-se que a ruptura do material ocorreria após a equalização das poropressões, diferentemente do critério utilizado nos demais corpos de prova.

Outra constatação durante a análise do adensamento dos corpos de prova com 28% de emulsão asfáltica foi que, após cessada a variação de volume, restou ainda uma clara mudança em sua geometria enquanto eram dissipadas as poropressões. Essa alteração de geometria, apresentada na Figura 6, pode ser justificada pela elevada espessura do filme asfáltica formada ao redor dos grãos, que quando submetido a elevadas tensões confinantes iniciou um processo de fluxo viscoso, ocasionando modificações na sua estrutura do material.

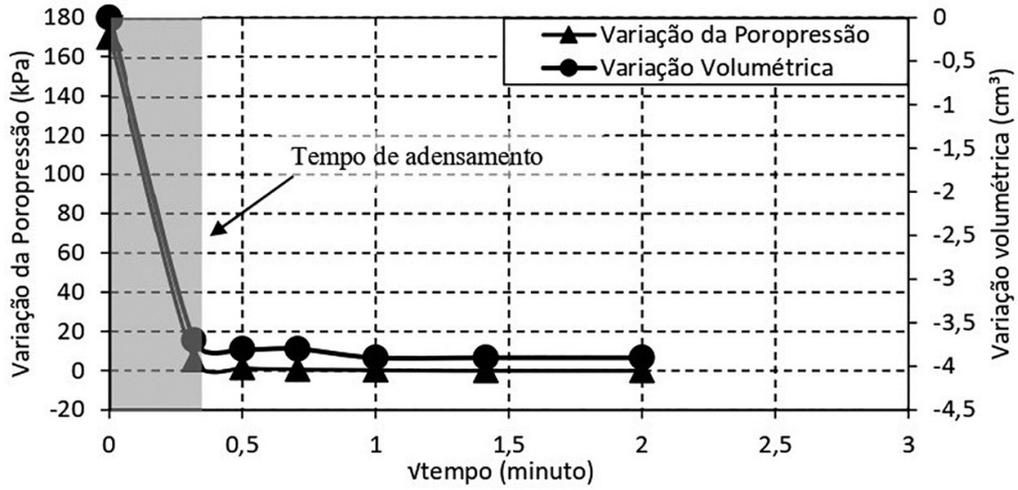
#### 3.2. Ruptura dos corpos de prova

A Figura 7 apresenta as curvas de variação da tensão desviadora com a deformação axial obtidas, para as tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, com o solo compactado e com as misturas de solo-emulsão nos teores de 16%, 22% e 28% ensaiados sempre em condições saturadas.

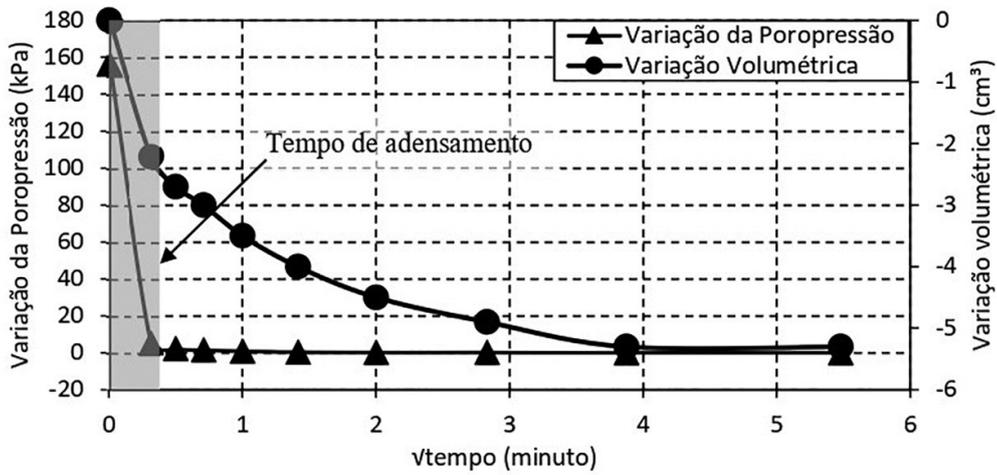
De acordo com os resultados da Figura 7, observa-se que para o solo SM não há uma definição clara de uma tensão de pico, para os níveis de tensão investigados, indicando que o material apresenta um comportamento semelhante ao de um material elastoplástico com endurecimento [23]. A ruptura dos corpos de prova de solo SM foi considerada sempre que as curvas  $p^*-q^*$ , obtidas pelos resultados dos ensaios triaxiais, tocavam na linha k-f conforme apresentado na Figura 8.

Esta semelhança com um material elastoplástico com endurecimento pode ser justificada pela composição granulométrica do solo em questão, uma vez que este possui um grande percentual de areia fina e silte. Outro aspecto que influencia nesse endurecimento do solo é a energia de compactação Proctor Normal, que reflete em uma maior quantidade de vazios no corpo de prova quando comparado com outras energias de compactação.

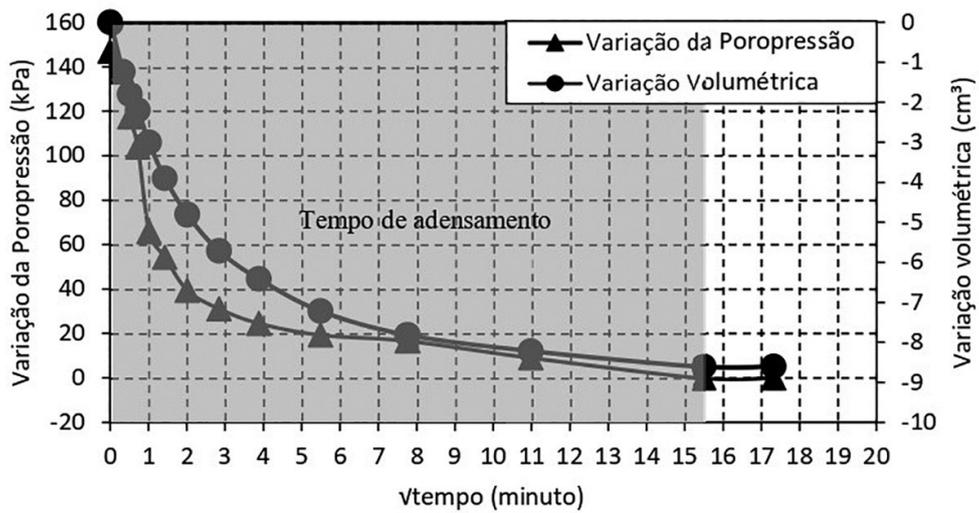
Fica evidente, também, que os níveis de tensão aplicados nos ensaios com solo compactado foram muito maiores quando comparados com os das mistura solo-emulsão. Segundo PEREIRA [7], isso pode ser atribuído



a)

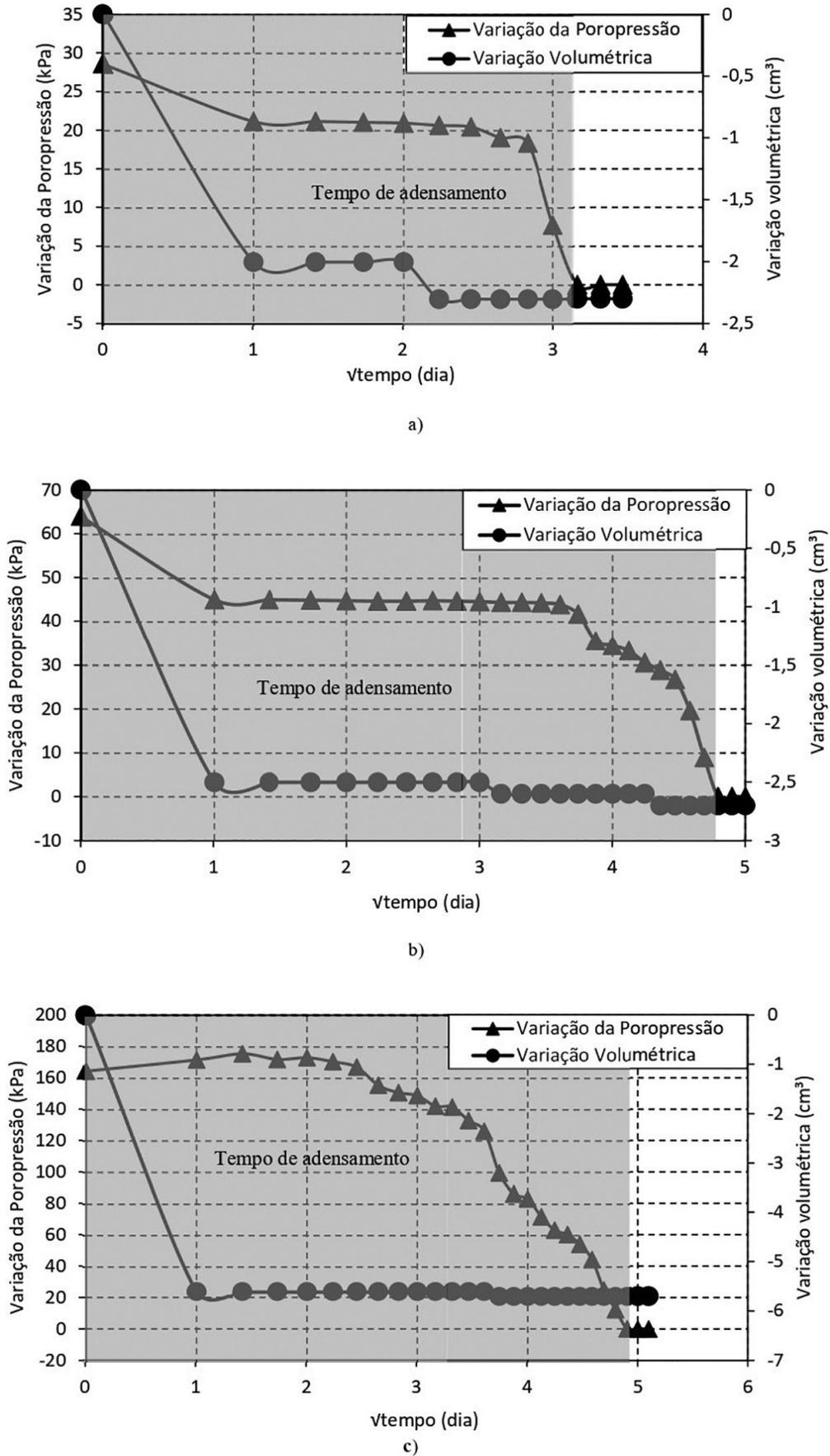


b)



c)

Figura 4: Adensamento e dissipação da poropressão – a) Solo SM; b) Solo com 165 de emulsão asfáltica; c) Solo com 22% de emulsão asfáltica.



**Figura 5:** Adensamento e dissipação da poropressão – solo com 28% de emulsão – a) Ensaio com tensão confinante  $\sigma_3 = 100$  kPa; b) Ensaio com tensão confinante  $\sigma_3 = 100$  kPa; c) Ensaio com tensão confinante  $\sigma_3 = 200$  kPa.



**Figura 6:** Mudança de geometria do corpo de prova após cessada variação volumétrica.

à natureza viscosa do filme asfáltico residual formado ao redor das partículas de solo nos corpos de prova de mistura solo-emulsão que, quando submetido a elevadas tensões, entrem em regime de fluxo.

De forma diferente ao que ocorreu com o solo compactado, em todas as trajetórias observadas nos diagramas tensão-deformação das misturas observou-se um enrijecimento inicial e em seguida um regime de fluxo com a ocorrência de um patamar de tensão, fazendo com que esses materiais tivessem um comportamento tensão – deformação muito mais próximo ao de um material elástico perfeitamente plástico [24]. O critério de ruptura foi considerado imediatamente após a observação dessa mudança na trajetória de tensões.

A tendência em deformar-se continuamente sem praticamente nenhum incremento de tensão pode ser atribuído à menor interação entre os grãos do solo devido à maior camada de asfalto residual formada. Dessa forma, após alcançado o patamar de plastificação, a mistura não consegue mais aumentar o valor do carregamento a ela imposta, conforme também observado por Brito [9, 11].

Esse comportamento elástico perfeitamente plástico observado é mais expressivo nas misturas com maior teor de emulsão tendo em vista que, para os teores de 16% e 22%, observou-se uma pequena inclinação na trajetória após alcançado este patamar de tensão. Já nas misturas com 28% de teor de emulsão esse patamar de tensão permaneceu praticamente inalterado até o final do ensaio. Constata-se ainda que nas misturas com 16% e 22% de emulsão, até 2% a 3% de deformação axial, o mecanismo de resistência é dado pelo intertravamento dos grãos envolvidos com asfalto residual, promovendo inclusive uma deformação deste filme betuminoso.

Aparentemente em elevados níveis de deformações há um deslocamento do filme em relação as partículas de solo, favorecendo algum contato grão – grão, que promove um leve acréscimo nas tensões confinantes. Esse comportamento é mais expressivo nas misturas com teores de 16% de emulsão, pois o filme asfáltico residual tem uma menor espessura conforme representado esquematicamente pela Figura 9. Comportamento semelhante a este é encontrado por PEREIRA [7] e DANTAS NETO *et al.* [10] que realizaram ensaios de cisalhamento direto em misturas solo – emulsão asfáltico nos seus teores ótimos de compactação e em tensões confinantes de 50 kPa até 400 kPa.

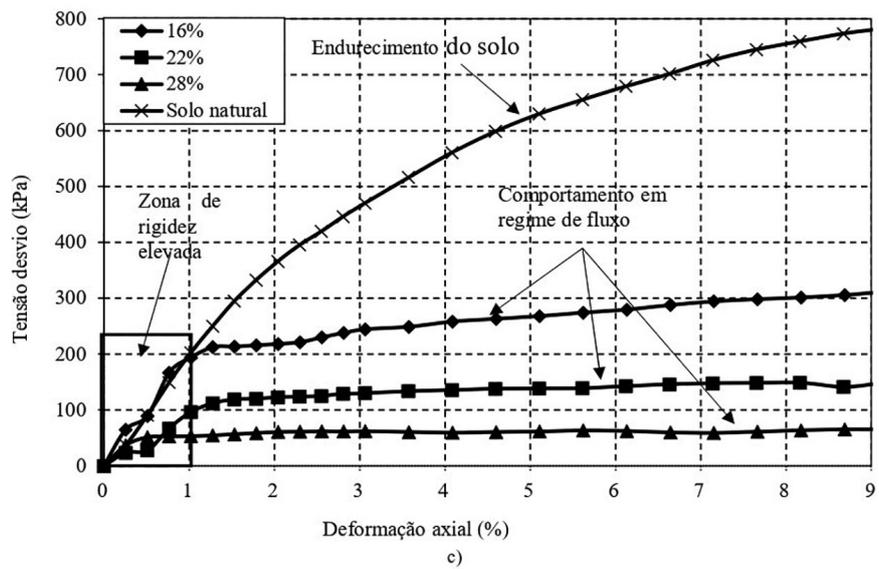
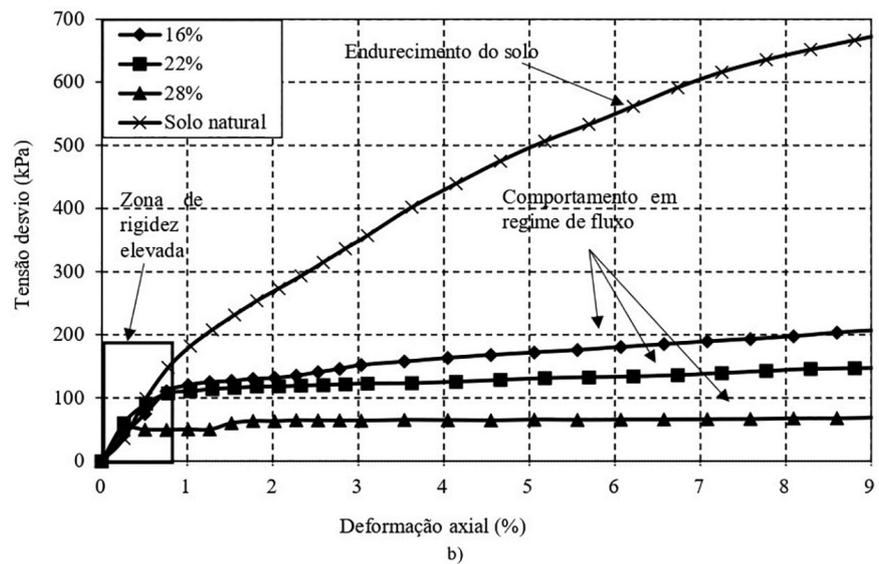
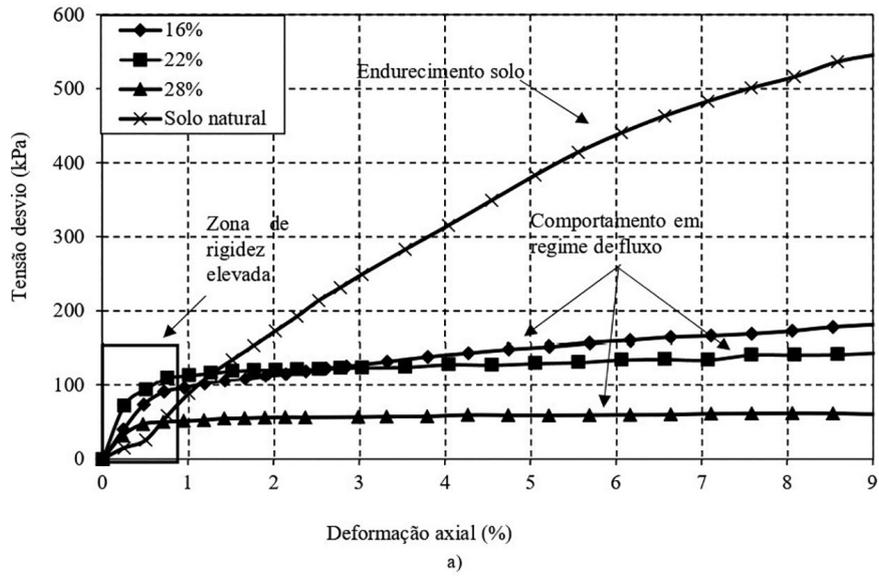


Figura 7: Curva de ruptura mistura M24 e solo SM – a) Ensaio com tensão confinante  $\sigma_3 = 100$  kPa; b) Ensaio com tensão confinante  $\sigma_3 = 100$  kPa; c) Ensaio com tensão confinante  $\sigma_3 = 200$  kPa.

A Figura 10 apresenta os resultados das envoltórias de tensão calculadas para o solo compactado e para as misturas com os 3 teores de emulsão estudados. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de resistência, ângulo de atrito e intercepto coesivo, para cada uma das amostras analisadas.

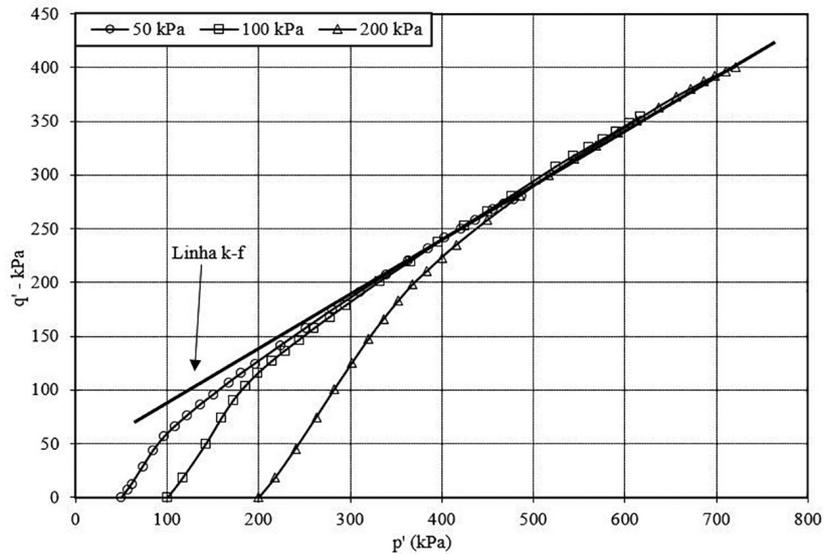


Figura 8: Diagrama p'-q' e linha k-f do solo SM.

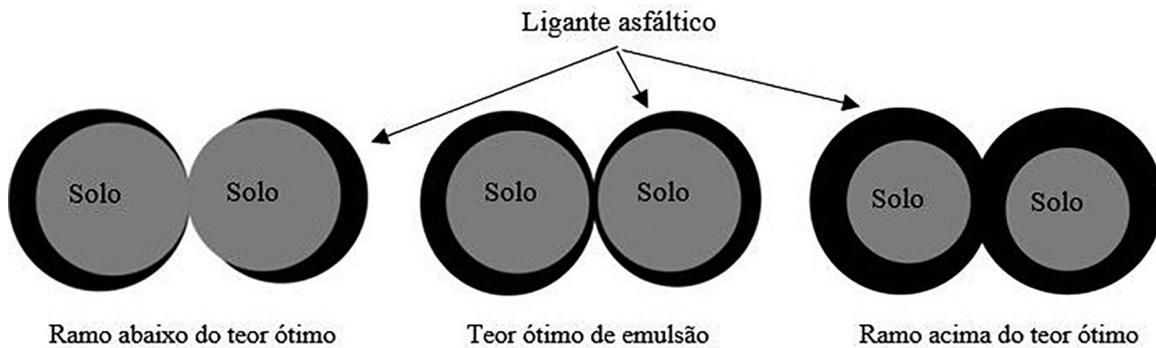


Figura 9: Representação do filme asfáltico ao redor de um grão de solo.

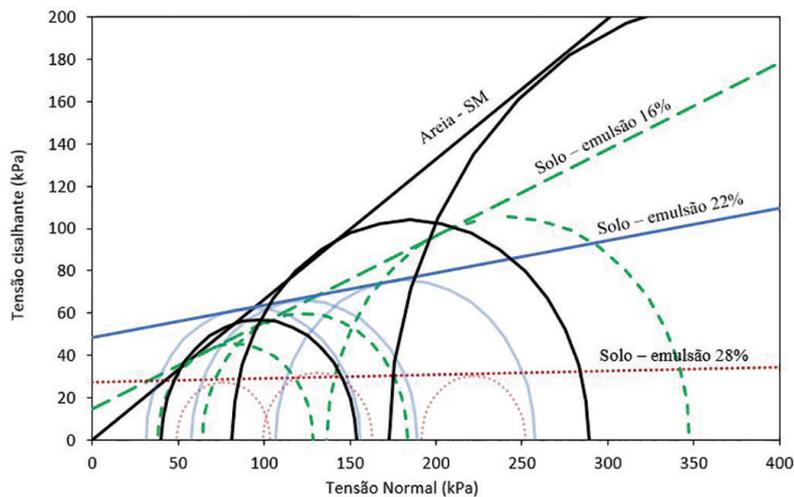


Figura 10: Envoltórias de ruptura – Parâmetros efetivos.

**Tabela 3:** Parâmetros de resistência.

MISTURAS SOLO - EMULSÃO	PARÂMETROS EFETIVOS		PARÂMETROS TOTAIS	
	COESÃO'(kPa)	ANG. ATRITO'(°)	COESÃO(kPa)	ANG. ATRITO(°)
Solo - SM	0,00	33,60	0,00	30,90
Solo - emulsão M24 16%	14,40	22,30	16,60	16,90
Solo - emulsão M24 22%	48,20	8,70	52,80	4,70
Solo - emulsão M24 28%	27,40	1,00	27,50	0,90

O solo SM tem sua parcela de resistência conferida só pelo ângulo de atrito e por isso à medida que se aumentam os valores de tensões confinante, maiores são as tensões necessárias para ruptura. Esse ganho de resistência pode ser explicado pelo favorecimento do contato entre os grãos com o aumento da tensão confinante.

Enquanto isso, ao analisar as envoltórias de ruptura, sob condições saturadas, das misturas de 16% e 22%, observou-se uma consonância com os resultados já obtidos por outros autores em pesquisas semelhantes [2, 10, 11, 25, 26], pois, à medida que se aumentou a quantidade de asfalto na mistura, houve um ganho expressivo no valor do intercepto coesivo e uma redução no ângulo de atrito interno em relação ao solo compactado. Essa variação nos parâmetros de resistência é atribuída à formação do filme de asfalto residual a ao consequente preenchimento dos espaços vazios, entre os grãos de solo, pelo ligante betuminoso. Essa película asfáltica funciona como uma superfície de colagem entre os grãos do solo, promovendo o aumento do seu intercepto coesivo justificado pelo efeito de confinamento. O filme asfáltico fez com que o contato entre grãos fosse diminuído, mesmo em maiores níveis de tensões confinantes, prejudicando o intertravamento destes, justificando a redução do ângulo de atrito interno.

De acordo com os resultados das trajetórias de tensão e envoltória de ruptura das misturas com 28% de emulsão asfáltica, constatou-se uma redução no ângulo de atrito para um valor próximo de zero, em linha com o que foi observado nos teores de 16% e 22%. Entretanto, ao avaliar o intercepto coesivo, identificou-se uma diminuição em seu valor, quando comparado com o valor da mistura com 22% de emulsão asfáltica.

Uma das justificativas para essa redução da coesão se deve ao fato de que, conforme expresso na curva de compactação dessas misturas, a adição de ligante após o teor de 22% de emulsão não está mais preenchendo um espaço entre um grão de solo e outro, desse teor em diante está sendo criado um volume de emulsão em excesso, prejudicando essa superfície de colagem. À medida que se aumenta a espessura do filme asfáltico residual, o efeito de confinamento anteriormente citado vai diminuindo e a película começa a se deformar de maneira semelhante a um fluido. Assim, para o teor de 28%, a ruptura não mais ocorre entre o contato grão – grão ou grão-asfalto e passa a ocorrer dentro do próprio volume de asfalto residual.

Esse afastamento das partículas de solo pelo excesso de ligante asfáltico faz com que não haja mais uma estrutura sólida dos agregados minerais bem definida, de modo que as leis de mecânica dos solos passam a não ter mais validade para as misturas com 28% de emulsão. Isso também justifica o comportamento anômalo do material identificado durante seu adensamento.

A Figura 11 mostra como o volume de vazios da mistura ( $V_v$ ) e a relação de betume vazios (RBV) variam para os diferentes teores de emulsão. Observa-se que nas misturas com teor de 28% o volume de vazios reduz drasticamente quando comparado com as de 16% de teor de emulsão. Além disso, mais de 70% dos vazios do agregado mineral estão sendo preenchidos por betume. Isso reforça a hipótese de que neste teor de 28% o excesso do volume de emulsão acaba por afastar as partículas de agregado mineral, tornando o seu contato menos eficiente.

Além da possibilidade de afastamento dos grãos pelo excesso de ligante, outra justificativa para a diminuição da coesão das misturas com teor de 28% pode ser dada em função da perda da estrutura interna do corpo de prova, antes do início do procedimento de ruptura, tendo em vista que estes chegaram a precisar de 24 dias para garantir a completa dissipação do excesso de poropressão, conforme apresentado na Figura 5. Esse tempo excessivo para a equalização das poropressões, onde o corpo de prova fica submetido a elevadas tensões confinantes efetivas, pode ter produzido deformações plásticas ou viscosas, caracterizando o fenômeno de fluência. Quando o material asfáltico é submetido a níveis de tensão por um longo prazo, este pode se deformar continuamente e resultar em falhas estruturais internas ao material o que é conhecido como ruptura por fluência [27].

A ruptura por fluência ocorre em virtude da interação de diversos eventos, como a ruptura de ligações internas do material, deformações de natureza viscoelásticas e o escoamento por cisalhamento [28]. Isso acaba por acarretar, no material, o crescimento de trincas e posteriormente sua ruptura final, o que justificaria a perda de coesão nas misturas com teor de 28% de emulsão asfáltica em massa.

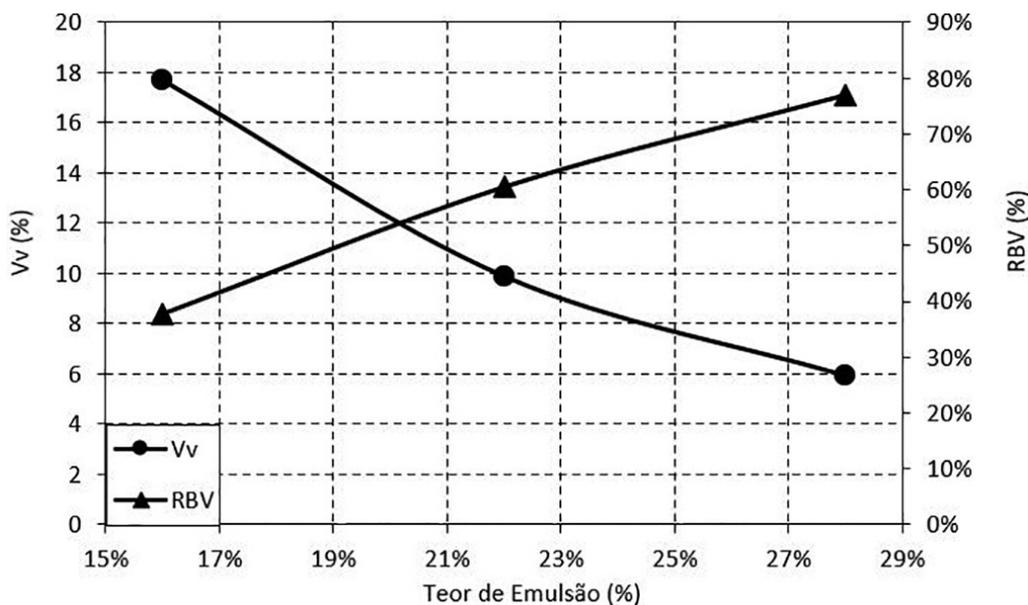


Figura 11: Variação do Vv e RBV nos diferentes teores de emulsão da mistura.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados apresentados neste artigo, é possível chegar às seguintes conclusões:

- Durante o adensamento, as misturas com 16% e 22% apresentaram um comportamento semelhante ao do solo, de modo que o tempo de dissipação do excesso de poropressão coincidiu com a variação volumétrica do corpo de prova. Nas misturas com 28% tal semelhança não foi observada, em virtude da perda de estrutura interna e pela possível ruptura por fluência do corpo de prova quando submetido aos esforços das tensões confinantes;
- O solo SM compactado com energia Proctor Normal apresentou comportamento típico de um material elastoplástico com endurecimento. Em todas as misturas solo – emulsão observou-se um comportamento semelhante ao de um material elástico perfeitamente plástico, caracterizando um regime de fluxo;
- Após um determinado nível de deformação axial as misturas com 16% e 22% tenderam a ter um leve ganho de resistência, justificado pelo provável deslocamento da película de asfalto e conseqüente maior contato entre os grãos minerais. Nas misturas com 28% esse fenômeno não foi observado pela maior espessura do filme asfáltico;
- Enquanto adiciona-se emulsão no ramo abaixo do teor ótimo de compactação das misturas, consegue-se um efeito de colagem entre grãos, favorecendo a adesividade entre eles. Teores acima do ótimo tendem a reduzir o valor de coesão dos corpos de prova, em função do excesso de ligante na mistura, afastando os grãos uns dos outros;
- À medida em que o teor de emulsão foi aumentado, menores foram os ângulos de atrito, e, para as misturas com 16% e 22%, maiores foram os valores de coesão. Com 28% de emulsão, a mistura teve uma redução em seu intercepto coesivo, devido ao excesso de ligante;
- Os melhores resultados, quanto à resistência mecânica ao cisalhamento, de solos estabilizados pela adição de emulsão asfáltica são obtidos para misturas no ramo abaixo do teor ótimo da curva de compactação.

Os resultados obtidos nesse estudo reforçam a técnica de estabilização de solos com emulsão asfáltica como uma alternativa viável para obras de geotecnia que demandem materiais com uma boa coesão e baixos coeficientes de permeabilidade.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, à empresa Asfalto Nordeste por fornecer a emulsão asfáltica utilizada nos ensaios e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] OLUYEMI-AYIBIOWU, B.D., “Stabilization of lateritic soils with asphalt-emulsion”, *Nigerian Journal of Technology*, v. 38, n. 3, pp. 603–608, Jul. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v38i3.9>
- [2] ANDAVAN, S., KUMAR, B.M., “Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions: a review”, *Materials Today: Proceedings*, v. 22, n. 3, pp. 1200–1202, Jan. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.121>
- [3] BUALUANG, T., JITSANGIAM, P., TANCHAISAWAT, T., “Sustainable flexible pavement base stabilization with pozzolanic materials incorporating sodium hydroxide and asphalt emulsion”, *Transportation Engineering*, v. 6, pp. 1–9, Dez. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.treng.2021.100094>
- [4] FERNANDES, L.F., SOUZA, B.M.M., FREITAS NETO, O., *et al.*, “Sandy soil stabilization with asphalt emulsion for paving purposes”, *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1, pp. e0711124274, Jun. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24274>
- [5] JACINTHO, E.C., “*Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicados a barragens*”, Tese de D.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- [6] LIMA, F.C., “*Estudo dos processos de compactação e dosagem de misturas entre solo arenoso e emulsão asfáltica*” Tese de M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- [7] 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*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- [8] LIMA, F.C., DANTAS NETO, S.A., “Estudo dos mecanismos de compactação em misturas entre solo arenoso e altos teores de emulsão asfáltica”, *Geotecnica*, no. 145, pp. 61–80, Oct. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2019.145.05>
- [9] BRITO, N.J.C.O., “*Estudo da influência do tempo de cura no comportamento mecânico das misturas entre solos e altos teores de emulsão asfáltica*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- [10] 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. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672019730118>
- [11] BRITO, N.J.C.O., DANTAS NETO, S.A., RODRIGUES, P.M.B., *et al.*, “Avaliação do tempo de cura na resistência ao cisalhamento de misturas solo-emulsão com teores de emulsão superiores a 10%”, *Revista Matéria*, v. 27, n. 2, pp. e20220088, Jun. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0088>
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS, *NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [17] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, *DNER ME 093: Solos - Determinação da densidade real*, Rio de Janeiro, DNER, 1994.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 14950: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol*, Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 14393: Emulsões asfálticas - Determinação de peneiração*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 14376: Ligantes asfálticos - Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas - Métodos expeditos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2019.
- [21] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, *DNER ME 258: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV*, Rio de Janeiro, DNER, 1994.

- [22] HEAD, K.H., *Manual of soil laboratory testing*, London, Pentech Press, 1986.
- [23] KIMOTO, S., SHAHBODAGH KHAN, B., MIRJALILI, M., *et al.*, “Cyclic elastoviscoplastic constitutive model for clay considering nonlinear kinematic hardening rules and structural degradation”, *International Journal of Geomechanics*, v. 15, n. 5, pp. A4014005, Out. 2015. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000327](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000327)
- [24] BRINSON, H.F., BRINSON, L.C., *Polymer engineering science and viscoelasticity an introduction*, New York, Springer, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-73861-1>.
- [25] LINSHA, R.D., DHARANYA, Y.P., VINODHINI, V., *et al.* “Improvement of shear strength of soil using bitumen emulsion”, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 7, no. 6, pp. 156–165. [https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal\\_uploads/IJCIET/VOLUME\\_7\\_ISSUE\\_6/IJCIET\\_07\\_06\\_017.pdf](https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJCIET/VOLUME_7_ISSUE_6/IJCIET_07_06_017.pdf), acessado em fevereiro de 2023.
- [26] MAHTO, A.K., KHAN, M.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.
- [27] DAI, Z., LAHERI, V., ZHU, X., *et al.*, “Experimental study of Compression-Tension asymmetry in asphalt matrix under Quasi-static and dynamic loads via an integrated DMA-based approach”, *Construction & Building Materials*, v. 283, pp. 122725, Maio. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122725>
- [28] FARINA, L.C., “*Caracterização viscoelástica por meio de ensaios de fluência e ruptura por fluência de compósitos poliméricos de matriz de resina epoxídica e fibra de carbono*”, Tese de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/D.85.2009.tde-16092009-151300>