

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS DE TECNOLÓGICAS**

**BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DO MASSAPÊ COM AREIA  
PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO SEU USO COMO CAMADA DE  
SUBLEITO DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

**ÍTALO MILLER MACHADO PEREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DO MASSAPÊ COM AREIA  
PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO SEU USO COMO CAMADA DE  
SUBLEITO DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

**ÍTALO MILLER MACHADO PEREIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador: Prof.º. DSc. Mario Sergio de Souza Almeida**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DO MASSAPÊ COM AREIA PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO SEU USO COMO CAMADA DE SUBLEITO DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO

ÍTALO MILLER MACHADO PEREIRA



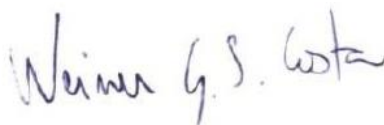
---

**Prof.º DSc. Mario Sergio de Souza Almeida**  
**Universidade Federal do Recôncavo da Bahia**  
**Orientador**



---

**Prof.ª DSc. Caroline Dias Amancio de Lima**  
**Universidade Federal da Bahia**  
**Membro da banca (Externo)**



---

**Prof.º MSc. Weiner Gustavo Silva Costa**  
**Universidade Federal do Recôncavo da Bahia**  
**Membro da banca (Interno)**

Cruz das Almas, 18 de março de 2022.

# **CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DO MASSAPÊ COM AREIA PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO SEU USO COMO CAMADA DE SUBLEITO DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO**

**Ítalo Miller Machado Pereira<sup>a</sup>, Mario Sergio de Souza Almeida<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Rua Rui Barbosa, 710 – Centro, Cruz das Almas, BA, Brasil.

## **RESUMO**

A adoção de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), configura um grande avanço para o Brasil. Entretanto, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDina), oficializado em 2020, demanda, dentre outras exigências, ensaios dinâmicos de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP) para solos que, em estudos de estabilização e dosagem de misturas diversas, pode levar a uma extensa campanha experimental. Os ensaios de MR que são realizados em triplicata, juntamente com os de DP que utilizam, no mínimo, seis corpos de prova (CP) para cobrir seis diferentes pares de tensão, exigem nestes estudos nove CP para cada teor de material estabilizante ou componente de misturas. Desta forma, uma caracterização preliminar para determinar misturas promissoras, envolvendo ensaios convencionais, pode configurar uma estratégia consistente na busca da otimização destes ensaios dinâmicos. No presente estudo foram caracterizadas onze misturas entre o Massapê, solo expansivo típico do estado da Bahia, e uma areia comercial. Esta caracterização consistiu em análises granulométricas, limites de consistência, Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), expansão, resistência a compressão simples, resistência à tração, equivalente de areia e pressão de expansão. Os resultados indicaram que a adição da areia ao Massapê proporcionou aumento nos valores de massa específica seca máxima, CBR e equivalente de areia, bem como redução no teor de umidade ótimo, nos índices de consistência, na expansão (livre e com sobrecarga) e na pressão de expansão. Os resultados indicaram, ainda, que as misturas contendo 60%, 70% e 80% de areia se mostraram promissores para estabilização do Massapê a níveis de expansão aceitáveis para uso como subleito, permitindo direcionar e otimizar a campanha experimental com testes de MR e DP exigidos no MeDiNa.

Palavras-chave: solos expansivos; estabilização granulométrica; taxa de expansão; ensaios dinâmicos.

## 1. INTRODUÇÃO

A Engenharia Rodoviária brasileira vem passando, nos últimos anos, por transformações significativas, sobretudo em relação aos critérios de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Enquanto a utilização de métodos Mecânico-Empíricos de dimensionamento já é uma realidade em países como Estados Unidos, Austrália, África do Sul, França, dentre outros [23, 28], somente em 2020 foi lançado no Brasil o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), no qual conceitos consagrados da Mecânica dos Pavimentos são utilizados [24]. O MeDiNa inova ao permitir a racionalização do dimensionamento de pavimentos asfálticos, viabilizando a utilização de materiais locais, ou seja, próximos da obra.

Esta característica do MeDiNa possibilita a utilização de solos de comportamento anômalo, como é o caso dos expansivos, desde que adequadamente estabilizados para uso em camada de subleito. Para isso, o novo método (MeDiNa) exige que o material estabilizado atinja requisitos mínimos quanto à Deformação Permanente (DP) e Módulo de Resiliência (MR) [20,21].

Culturalmente no Brasil as técnicas empregadas para tratar solos expansivos incluem a substituição do material por outro que atenda às necessidades da obra e a modificação dos parâmetros geotécnicos destes solos por meio da estabilização [3]. Os métodos mais empregados na estabilização de solos expansivos incluem a estabilização mecânica, química e granulométrica [26].

Vieira et al. [38] estudaram a estabilização mecânica do Massapê, solo expansivo clássico de grande ocorrência na região do Recôncavo do Estado da Bahia. Os Autores utilizaram amostras do Massapê coletadas no canteiro central da rodovia BR-324/BA, km 565. Inicialmente o solo foi caracterizado, com ensaios de granulometria (100% passantes na # 10, 99% passante na # 40 e 96% passante na # 200), Limite de Liquidez (LL = 93%) e Índice de Plasticidade (IP = 46). Adicionalmente, foram realizadas análises químicas, ensaios para determinação da capacidade de troca catiônica e pH, além da avaliação dos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Com essas análises identificou-se a montmorilonita como argilomineral predominante no solo. A taxa de expansão do solo foi determinada em corpos de prova (CP) do ensaio de CBR (California Bearing Ratio), compactados nas energias normal, intermediária e modificada, submersos por 4 dias, com leituras de expansão com 24h, 48h, 72h e 96h. Os Autores constataram que a estabilização mecânica do Massapê, por meio da compactação convencional, não foi capaz de reduzir o potencial expansivo de maneira significativa. Por outro

lado, Chagas et al. [9] estudaram os efeitos da compactação de um solo argiloso do estado do Ceará sobre a expansão livre na condição natural e compactada. O solo estudado apresentou granulometria com 97% passantes na peneira #10, 95% na #40, 86% na #200, LL=40% e IP=29. Os resultados indicaram queda da expansão livre do solo, de 5% quando testado no estado natural, para 1,08%, quando ensaiado após compactado na energia Proctor normal.

São diversos os estudos que buscaram avaliar os efeitos da estabilização química de solos expansivos brasileiros [3,4,6,36]. Kawahashi et al. [27] utilizaram o cimento Portland, do tipo CP-III, na estabilização de um solo expansivo do estado de São Paulo. O solo estudado apresentou 95% passantes na #10, 92% na # 40 e 90% na # 200. Foram utilizados 2% e 4% de cimento, em relação a massa seca do solo. A expansão com sobrecarga no ensaio mini-CBR, pertencente à metodologia MCT (*Miniatura Compactada Tropical*), medida pelos autores, foi de 10%. Após a incorporação do cimento os valores de expansão foram reduzidos, para 2%, com 2% de cimento, e 0,8%, para 4% de cimento.

Paiva et al. [34] estudaram a estabilização de um solo expansivo da região de Ipojuca-PE utilizando cal hidratada. As características granulométricas do solo apontaram: 100% passantes na peneira #10, 95% na #40 e 83% na #200. Além de LL=81% e IP=37. Foram usados teores de 1%, a 11% de cal. Os resultados demonstraram que o teor de 11% se destacou por ocasionar reduções nos valores de expansão livre de 14% para 0%, bem como reduzir a tensão de expansão de 240 kPa até valores nulos. Oliveira et al. [33] também realizaram estudos com o objetivo de reduzir o potencial de expansão do Massapê e para isso foram utilizados produtos químicos como cal e um produto comercial para estabilização de solo. Os autores observaram uma redução de 90% no valor de tensão de expansão, variando de 100kPa, no estado natural do solo, para 10kPa, com adição 1% de cal e 0,1% de estabilizante.

Uma alternativa promissora de estabilização destes materiais é a granulométrica, com a dosagem de misturas dos solos expansivos com areia e/ou agregados [5,30,31,35]. Ataíde [2] testou teores de areia com 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75%, na tentativa de estabilizar o potencial expansivo do solo de Ipojuca-PE. A caracterização do solo apontou 100% passantes nas peneiras #10 e #40 e 95% passantes na #200, além de LL=72% e IP=16. O autor observou redução de 94% nos valores de tensão de expansão, variando de 55,8 kPa para 3,3 kPa, e também na expansão livre com variação de 20,5% para 1,9% para mistura com 75% de areia.

Cunha [8] propôs um método de estabilização do Massapê. A técnica consistiu em misturar o solo com teores de 40%, 50% e 60% de agregado fino, oriundo de resíduos de construção e demolição (RCD). No entanto, os resultados não se mostraram eficazes. Morais [29] demonstrou que a adição de polímero industrial também não foi suficiente para reduzir os

valores de expansão do Massapê para valores próximos a limites aceitáveis para uso como subleito.

Contudo, com a chegada do MeDiNa, a determinação de misturas adequadas para a estabilização de solos expansivos, através de ensaios de MR e DP diretamente, torna-se uma tarefa pouco produtiva, em função da quantidade de testes e tempo necessário para realiza-los, de acordo com a instrução de serviço do DNIT 247 [22], além das normas DNIT 134 [16] e DNIT 179 [19]. Desta forma, uma caracterização preliminar para determinar misturas promissoras, envolvendo análises de granulometria, limites de consistência, Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), expansão, resistência a compressão simples, resistência à tração, equivalente de areia e pressão de expansão, pode apontar para uma estratégia eficiente de otimização dos ensaios dinâmicos (MR e DP). Dessa forma, após a determinação de misturas candidatas, a realização dos ensaios dinâmicos poderá ser bem mais agilizada. Nesse contexto, o presente estudo busca estabelecer uma rotina de ensaios geotécnicos para a estabilização granulométrica do Massapê, com uso de diferentes teores de areia, de forma a obter misturas candidatas para uso como camada de subleito.

## **2. MATERIAIS DE MÉTODOS**

### **2.1 SOLOS E MISTURAS**

As amostras de Massapê foram coletadas no canteiro central da BR 324/BA, trecho do km 564, na ligação entre os municípios de Feira de Santana e Salvador, sendo estas amostras representativas de um vertissolo. A areia comercial lavada utilizada para compor as misturas é proveniente do Capão, distrito de Laje-Bahia, situado a 62 km do município de Cruz das Almas/BA. Para a composição das misturas com o Massapê foram definidos teores de areia variando de 0% a 100%, com incrementos de 10% entre as amostras, totalizando onze misturas, onde essas porcentagens foram calculadas em relação à massa seca total da amostra.

### **2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

O preparo das amostras para todos os ensaios realizados nesta pesquisa seguiu o método de ensaio DNER 41 [10]. Foram realizados ensaios de análise granulométrica por sedimentação e peneiramento [11], densidade real dos grãos das amostras de areia e Massapê [14]. Os ensaios de limites de liquidez [15] e limites de plasticidade [13] foram determinados para todas as misturas com Massapê e Areia. Após obtenção dos dados, os solos foram classificados pelas metodologias do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e *Transportation*

*Research Board* (TRB). A Figura 1 ilustra parte dos ensaios de caracterização realizados no presente estudo.

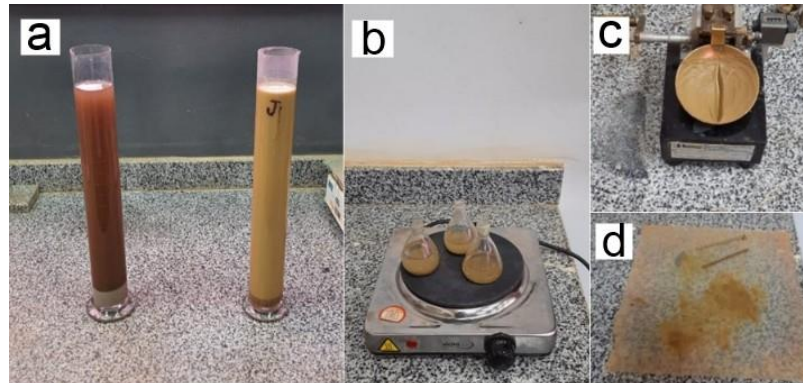


Figura 1 – Ensaio de granulometria por sedimentação (a); densidade real dos grãos (b); limite de liquidez (c); limite de plasticidade (d).

### 2.3 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO, CBR E EXPANSÃO

Seguindo o método de ensaio DNIT 164 [17], onze amostras foram compactadas na energia normal para determinação da umidade ótima ( $w_{ot}$ ) e massa específica seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ), bem como expansão livre. Inicialmente, para cada um dos teores de areia, foram compactados 5 CP com teores distintos de umidade. Importante destacar que na preparação destas misturas, devido à elevada capacidade de retenção de água do Massapê [37], optou-se por adicioná-lo somente após o umedecimento e homogeneização da areia. Para cada CP foi preparada uma mistura com massa total de, aproximadamente, 6 kg. Após a compactação, os CP receberam a haste de expansão sem sobrecarga, como adaptação do método de ensaio DNIT 172 [18], e foram totalmente imersos em água por um período total de 96 h (4 dias) para determinação da expansão livre (sem sobrecarga). A expansão livre foi medida com auxílio de relógios extensômetros analógicos com precisão de 0,01 mm, com leituras realizadas com 0, 1, 2, 5, 10, 30 min e 1, 2, 5, 24, 48, 72 e 96h. Com os dados obtidos nesta fase experimental foi possível determinar os valores de umidade ótima ( $w_{ot}$ ), massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e expansão livre de cada mistura.

Com os parâmetros ótimos de compactação definidos para as misturas, foram compactados outros 3 CP para cada teor de areia, os quais foram imersas em água por 96 h para medição de suas respectivas expansões, dessa vez com sobrecarga de, aproximadamente, 4,536 kg, conforme o método de ensaio DNIT 172 [18]. Após o período de imersão, estas amostras foram levadas a prensa para determinação dos valores de CBR de cada mistura (em triplicata). Na Figura 2 são apresentadas as fases experimentais entre o início da preparação da amostra,



passando pela compactação propriamente dita, até a imersão do CP para determinação da expansão, neste caso sem sobrecarga (expansão livre).



Figura 2 – Mistura e umedecimento da amostra (a); compactação do corpo de prova (b); imersão dos corpos de prova (c).

#### 2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO

Para a realização do ensaio, as amostras utilizadas foram secas ao ar até atingir a umidade higroscópica, posteriormente foram destorroadas e quarteadas para obtenção de amostras homogêneas. O material passante na peneira #10 foi utilizado na elaboração dos CP, assim como preconiza a norma DNER-ME 41 [10] Após a determinação da umidade higroscópica, os teores de areia e Massapê foram calculados, misturados com as suas respectivas umidades ótimas e compactados. Foram separados 500 g da mistura úmida para cada CP, a compactação foi realizada na energia normal em moldes com pequenas dimensões de Proctor adaptado, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, como mostra a Figura 3 (b). A fim de que as amostras apresentassem parâmetros ótimos, a compactação ocorreu em 3 camadas com 6 golpes para cada camada. Após isso, os CP foram desmoldados, pesados, medidos, embrulhados em plástico-filme e acondicionados em um dessecador de vidro, com umidade e temperatura controlados, por 24 h para evitar a perda significativa de umidade. Os CP apresentaram graus de compactação na moldagem entre 95% e 100 % em relação aos respectivos valores de  $\rho_{dm\acute{a}x}$ , determinados nos ensaios de compactação.

O ensaio foi realizado em triplicata, ou seja, foram preparados 3 CP para cada teor de areia, tanto para o ensaio de resistência à compressão simples (RCS) quanto para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT), tendo sido utilizada a Máquina Universal Times Group para ambos os ensaios. No primeiro caso os CP foram submetidos a uma força axial até apresentar ruptura, como mostra a Figura 3 (e). No ensaio de tração, o CP foi posicionado no dispositivo mostrado na Figura 3 (f) e em seguida submetido à compressão

diametral. Após a ruptura, de forma a obter o teor de umidade de cada CP com maior precisão, as amostras foram divididas em três partes e levadas para a estufa à temperatura de 105°C por 24 h. O valor de carga máxima de cada mistura testada foi determinado pela média dos valores de ruptura de três CP.

Na Figura 3 mostra-se a sequência do procedimento experimental adotado para determinação da RCS e RT.

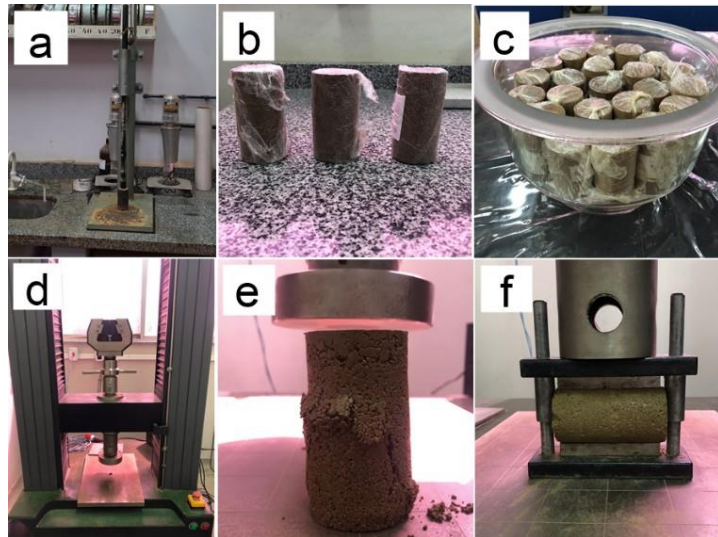


Figura 3 – Ensaio de compactação com Proctor adaptado para determinação dos parâmetros RCS e RT: Compactador (a); amostras compactadas e envoltas em plástico filme (b); amostras armazenadas em ambiente com umidade e temperatura controladas (c); Máquina Universal Times Group (d); corpo de prova ao final do ensaio de RCS (e); corpo de prova posicionado no molde para o ensaio de RT (f).

## 2.5 DETERMINAÇÃO DO EQUIVALENTE DE AREIA

Com o objetivo de prever o efeito do aumento da participação da areia no comportamento geotécnico das misturas com o Massapê, realizou-se para as 11 misturas estudadas o ensaio de equivalente de areia (EA), de acordo com as exigências do método de ensaio DNER 54 [12]. Embora este ensaio tenha sido desenvolvido com o objetivo de avaliar a presença de material fino, considerado como contaminante em agregados miúdos, utilizados em misturas asfálticas, tem-se a expectativa de que este teste seja um indicador da alteração de comportamento de solos argilosos quando estabilizados granulometricamente com materiais granulares (areia e brita). A vantagem de se utilizar testes com o de EA para esse fim, é sua praticidade e rapidez de execução, quando comparado a outros mais sofisticados. A sequência do ensaio está registrada na Figura 4.

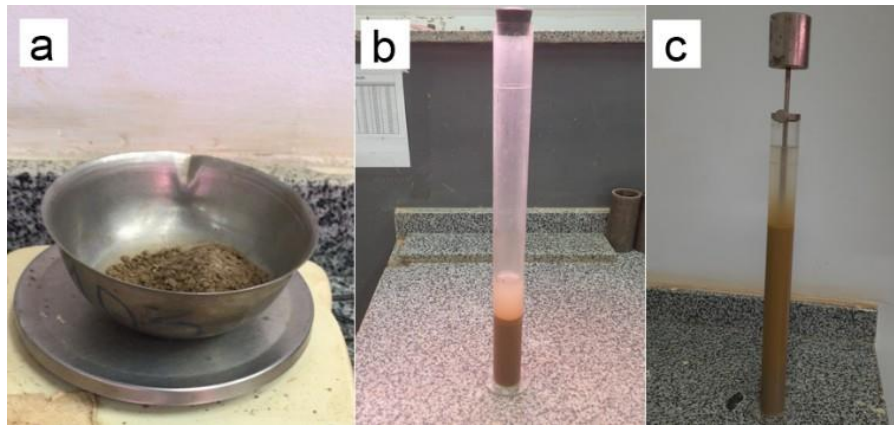


Figura 4 – Preparação da amostra (a); amostra em repouso (b); determinação das alturas de argila e areia (c).

## 2.6 PRESSÃO DE EXPANSÃO

Inicialmente, as amostras de massapê e areia foram preparadas de acordo com o método de ensaio DNER 41 [10]. Em seguida, o solo foi destorroado e quarteado para obtenção de amostras representativas e depois passado na peneira com abertura de 2,0 mm. Cada um dos onze teores de areia foi compactado estaticamente utilizando a prensa de CBR um CP de, aproximadamente, 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura, na umidade ótima. As etapas para compactação são mostradas na Figura 5. O molde metálico de compactação utilizado nesta etapa, composto por um anel de 7 mm de espessura e um colarinho de 96 mm de altura, foi desenvolvido e fabricado especificamente para esse estudo (Figura 5 b, d).

Neste aparato, a premissa utilizada para o controle de compactação das amostras foi o atingimento da massa específica seca máxima, obtida do ensaio de compactação realizado ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ). Para isso, utilizou-se uma massa de solo superior a capacidade do molde fabricado e, conhecendo-se seu volume e  $\rho_{dm\acute{a}x}$ , bastou controlar a altura final da compactação estática, com auxílio de relógio extensômetro de 0,01 mm de precisão, para se obter uma massa específica bem próxima ao  $\rho_{dm\acute{a}x}$ . Logo após a compactação, o colarinho foi removido e o solo excedente foi retirado e utilizado para determinação do teor de umidade, foi possível observar que a variação entre a massa específica de cada mistura compactada e seu respectivo  $\rho_{dm\acute{a}x}$  foi, em média, de 0,82%.

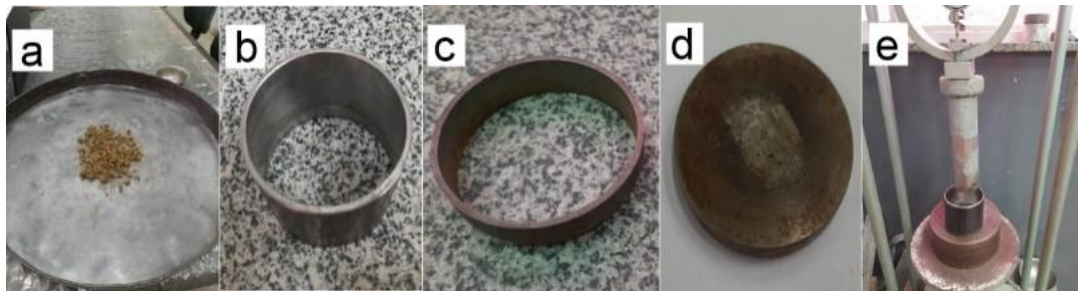


Figura 5 – Preparo da amostra (a); colarinho metálico (b); anel-molde (c); tampa metálica (d) prensa estática manual (e).

Posteriormente cada CP compactado foi posicionado na base prensa de determinação de pressão de expansão (Figura 6), em recipiente contendo água, permanecendo por 4 horas. Neste período, com o auxílio de um anel dinamométrico e relógio extensômetro de 0,001 mm de precisão, devidamente calibrados, pôde-se registrar o deslocamento do conjunto em função da carga exercida pela expansão da amostra. Utilizando-se a curva de calibração do conjunto anel-extensômetro foi possível determinar a pressão de expansão de cada mistura.

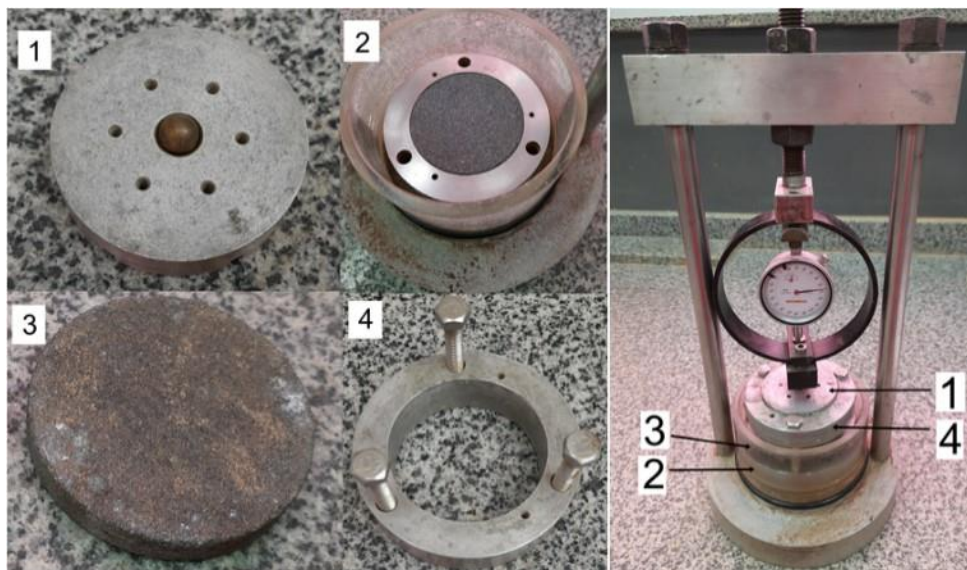


Figura 6 – Componentes da prensa e Prensa com peças integradas.

Ao final, os resultados obtidos, em relação à avaliação do comportamento expansivo, foram comparados com os parâmetros do Guia de ensaio de potencial de expansão volumétrica em solos (*Guide to use of the FHA soil pvc meter*) [25].

### 3. RESULTADOS DE ANÁLISES

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do Massapé e da areia, com destaque para as frações granulométricas de cada material, limites de consistência

(LL, LP e IP), massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), parâmetros ótimos de compactação na energia do Proctor normal ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ,  $w_{ot}$ ), respectivas porosidades (n) e classificações pelos sistemas TRB e SUCS. Para melhor visualização, apresentam-se na Figura 7 as curvas granulométricas dos dois solos.

Tabela 1 – Resultados de caracterização do Massapê e areia.

Parâmetro	Massapê	Areia
% argila ( $\varphi < 0,002\text{mm}$ )	57,90	0,40
% silte ( $0,002\text{mm} < \varphi < 0,06\text{mm}$ )	34,30	3,30
% areia ( $0,06\text{mm} < \varphi < 2\text{mm}$ )	7,90	96,40
% pedregulho ( $2\text{mm} < \varphi < 60\text{mm}$ )	0	0
LL (%)	110	NP
LP (%)	41	NP
IP	69	-
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,72	2,63
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,34	1,66
$w_{ot}$ (%)	25,48	10,66
n (%)	50,74%	36,88%
TRB	A-7-5	A-3
SUCS	CH	SP

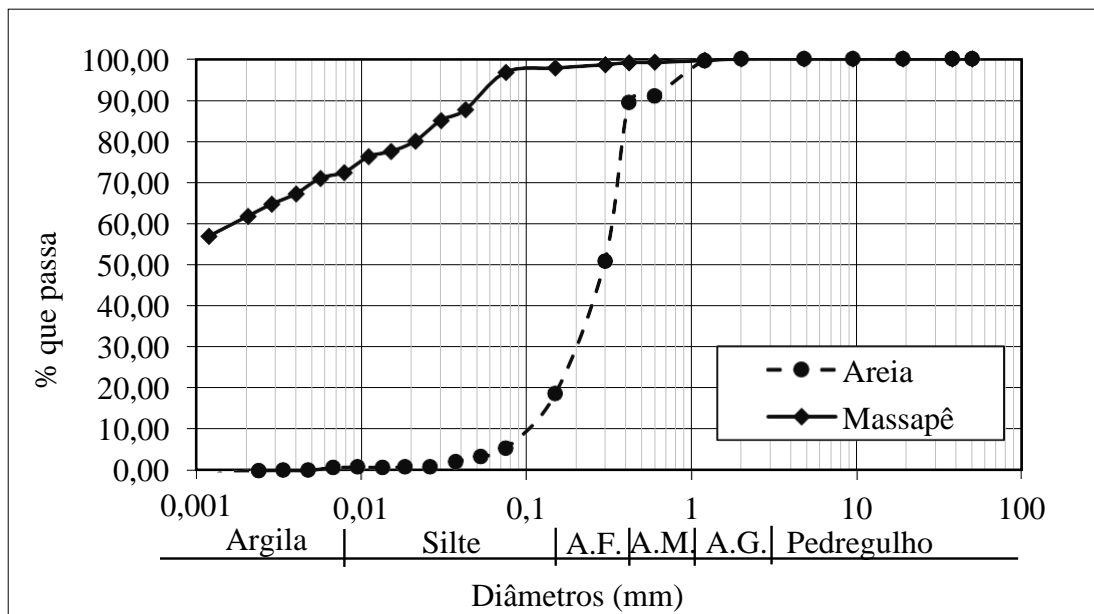


Figura 7 – Distribuição granulométrica dos solos.

Em relação ao Massapê, nota-se a predominância de partículas finas na sua granulometria. Segundo a norma NBR 6502 [1], cerca de 92,2% do Massapê é composto por silte e argila, enquanto apenas 7,90% correspondem à porcentagem de areia grossa, média e fina. A areia, entretanto, possui 96% do seu total constituído por areia (7,3% de areia grossa, 64,5% de areia média e 24,6% de areia fina). Quanto aos limites de Atterberg, enquanto o Massapê apresenta  $LL = 110\%$  e  $IP = 69\%$ , ambos considerados bastante elevados, característica típica de argilas [7], a areia é não plástica (NP). De acordo com o sistema SUCS, o Massapê é classificado como CH, ou seja, argila inorgânica de alta plasticidade, e a areia é SP, uma areia mal graduada. De acordo com a TRB o Massapê é enquadrado como A-7-5, sendo um solo argiloso com um comportamento sofrível a mau como subleito. Por outro lado, ainda de acordo com a TRB, a areia testada é pertencente ao grupo A3 e classificada como areia fina de comportamento tido como excelente a bom para utilização como subleito.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das misturas entre Massapê e areia, contemplando as frações de argila, silte e areia de cada mistura, massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), limites de consistência ( $LL$ ,  $LP$  e  $IP$ ), parâmetros ótimos de compactação ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ,  $w_{ot}$ ) e a porosidade ( $n$ ) para cada teor de areia misturado ao Massapê, além das respectivas classificações pelos sistemas TRB e SUCS. As variações dos limites de liquidez ( $LL$ ), de plasticidade ( $LP$ ) e índice de plasticidade ( $IP$ ), apresentados na Tabela 2, em função dos diferentes teores de areia na mistura com o Massapê, estão dispostos na Figura 8.

Tabela 2 – Variação dos índices físicos das misturas.

Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{ot}$ (%)	n (%)	TRB	SUCS
0	57,90	34,30	7,90	2,72	110	41	69	1,34	25,48	50,73	A-7-5	CH
10	52,15	31,20	16,75	2,71	86	35	51	1,46	25,41	46,20	A-7-5	CH
20	46,40	28,10	25,60	2,70	74	34	41	1,47	25,04	45,76	A-7-5	CH
30	40,65	25,00	34,45	2,69	62	31	31	1,49	24,49	44,77	A-7-5	CH
40	34,90	21,90	43,30	2,68	59	24	35	1,59	22,13	40,64	A-7-6	CH
50	29,15	18,80	52,15	2,68	48	22	26	1,62	17,57	39,57	A-7-6	CL
60	23,40	15,70	61,00	2,67	32	15	17	1,72	17,34	35,53	A-6	SC
70	17,65	12,60	69,85	2,66	31	15	16	1,83	13,87	31,05	A-2-6	SC
80	11,90	9,50	78,70	2,65	0	0	0	1,84	13,48	30,39	A-2-4	SM
90	6,15	6,40	87,55	2,64	0	0	0	1,81	11,92	31,52	A-3	SM
100	0,40	3,30	96,40	2,63	0	0	0	1,66	10,66	36,91	A-3	SP

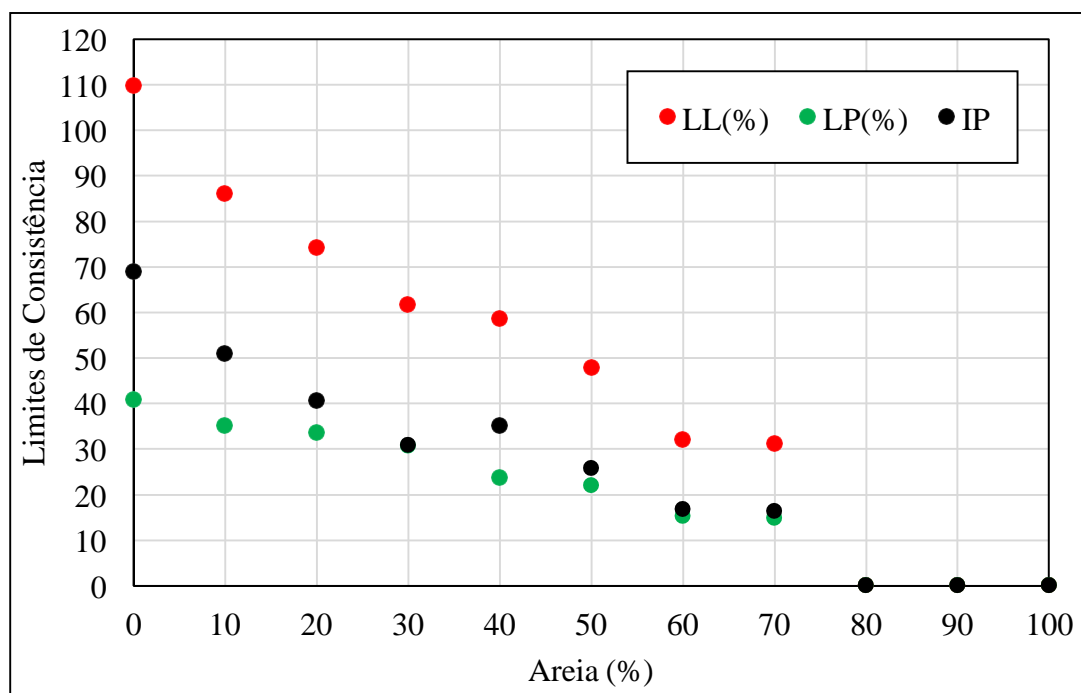


Figura 8 – Limites de Atterberg e índices de plasticidade.

Observa-se na Figura 8, conforme esperado, a diminuição da plasticidade do Massapê com o aumento do percentual de areia na mistura. A plasticidade apresentada pelo Massapê puro, da ordem de LL = 110%, LP = 40% e IP = 70, decresceu de forma não linear, chegando a valores praticamente estáveis para as misturas com 60% e 70% de areia e, a partir de 80% de

areia, as misturas passaram a não apresentar mais plasticidade, ou seja, classificadas como não plásticas (NP).

Na Figura 9 são apresentados os resultados de massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{dm\acute{a}x}$ ) e umidade ótima ( $w_{ot}$ ) em função dos teores de areia. Esses parâmetros foram obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal.

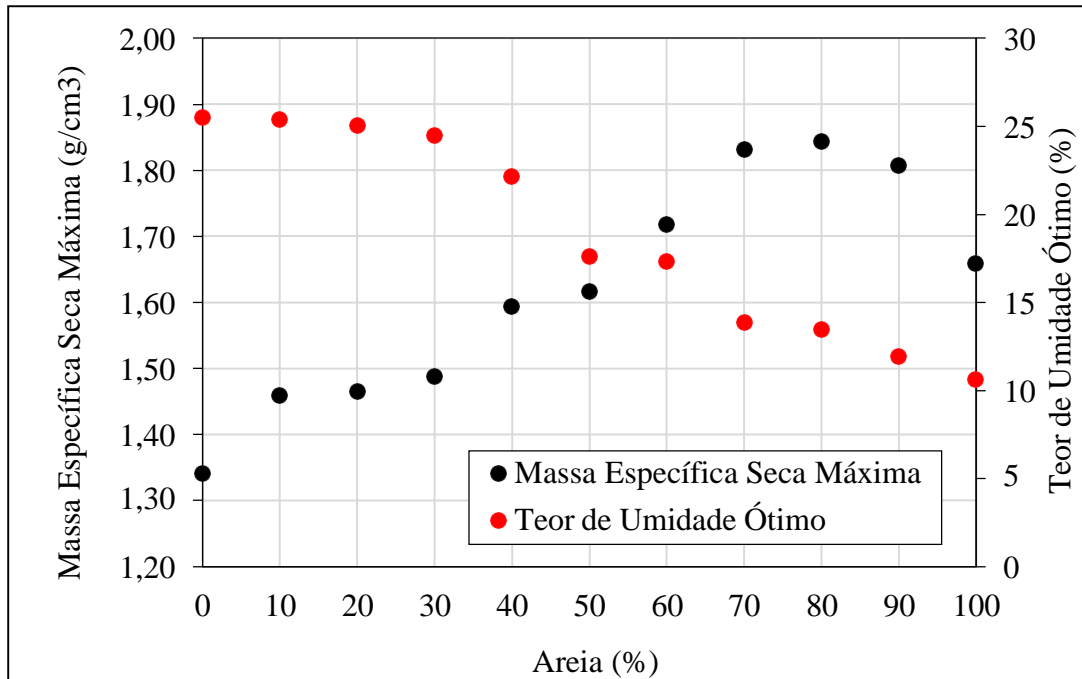


Figura 9 – Relação entre teor de areia, massa específica aparente seca e umidade ótima.

Nota-se na Figura 9 que o teor de umidade ótimo diminui de forma consistente com o aumento do teor de areia, em função da diminuição da superfície específica inicial do Massapê puro com o aumento da participação do material granular na mistura. Por outro lado, o aumento do teor de areia fez aumentar a massa específica seca máxima das misturas até 80% de areia, de  $1,34 \text{ g/cm}^3$  até  $1,84 \text{ g/cm}^3$ , por conta, muito provavelmente, da melhoria no entrosamento granulométrico apresentado com a incorporação da areia. A partir de 80% de areia em diante a massa específica cai até  $1,66 \text{ g/cm}^3$ . Dessa forma, os ensaios de compactação podem ser um eficiente indicador das misturas candidatas, entre 70% e 80% de areia, a apresentarem as melhores características de resistência e deformabilidade. Esta tendência é corroborada tanto pelos dados de porosidade (Tabela 2), que alcançou seu valor mínimo com 70% de areia, quanto pelos valores de Equivalente de Areia (EA) obtidos (Figura 10). Na Figura 10 é possível notar que justamente a partir do teor de areia de 70% passa-se a observar valores de EA maiores que zero, ou seja, através deste ensaio visualiza-se que deste teor em diante a areia começa a impor sua presença na mistura. Considerando as classificações TRB e SUCS das misturas, nota-se que



a partir de 60% de areia as misturas deixam de apresentar características de argila e passam a ser classificadas como areia.

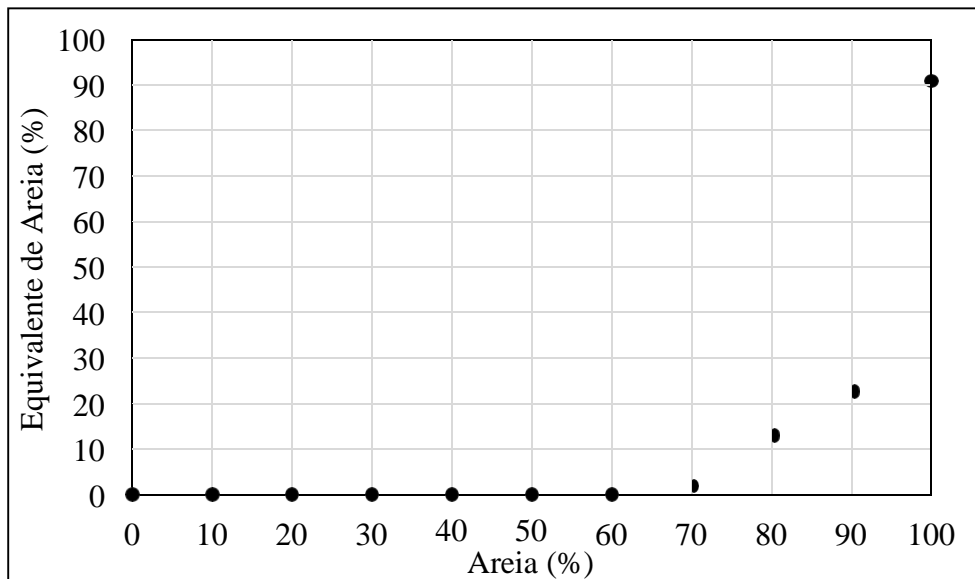


Figura 10 – Variação do equivalente de Areia das misturas.

### 3.3 RCS, RT E CBR DAS MISTURAS

Os valores médios dos ensaios em triplicata de resistência a compressão simples (RCS), resistência à tração (RT) e CBR das misturas, bem como os respectivos coeficientes de variação (CV), estão apresentados na Tabela 3. A variação destes parâmetros, em termos de valores médios, está demonstrada na Figura 11.

Tabela 3 – Valores médios e CV de RCS, RT e CBR das misturas.

Areia (%)	RCS <sub>m</sub> (kPa)	CV - RCS (%)	RT <sub>m</sub> (kPa)	CV - RT (%)	CBR <sub>m</sub> (%)	CV - CBR (%)
0	319,49	8,83	56,06	3,17	0,93	11,95
10	312,25	8,01	80,21	9,79	1,10	15,67
20	346,15	8,73	74,16	9,34	1,73	16,67
30	291,65	9,61	59,49	8,49	2,50	6,66
40	271,15	9,59	64,62	6,51	2,93	10,23
50	304,12	9,36	51,35	3,66	2,16	0,00
60	199,95	3,12	42,55	2,90	3,46	11,02
70	217,56	0,21	32,88	15,11	4,54	8,79
80	102,25	6,91	14,09	8,70	3,14	3,53
90	-	-	-	-	12,70	10,80
100	-	-	-	-	9,22	35,64

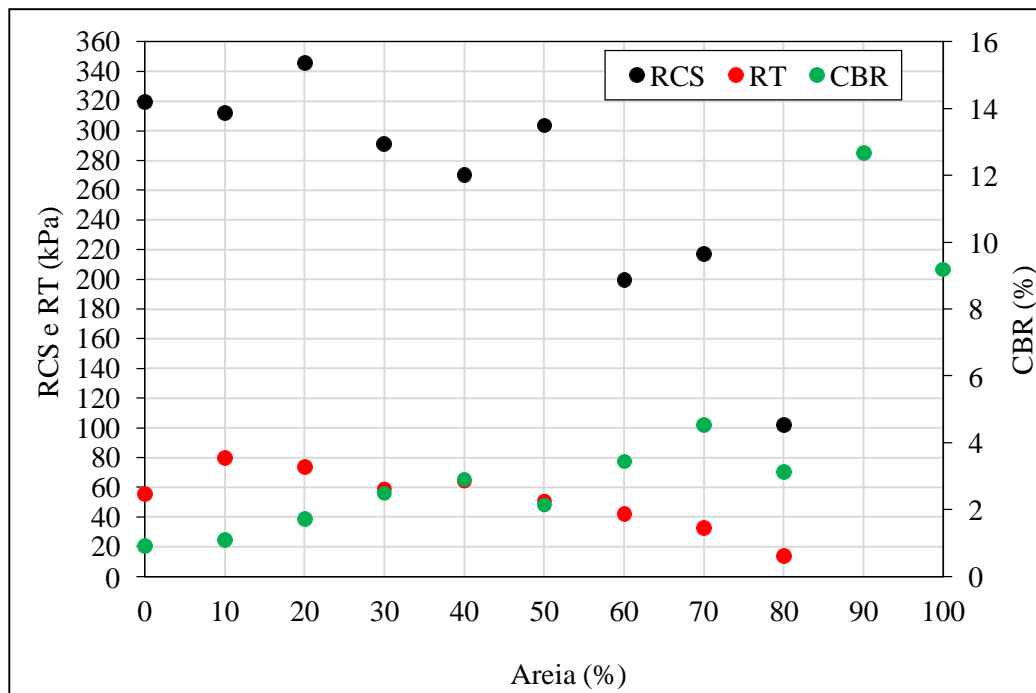


Figura 11 – Valores de RCS, RT e CBR.

A variabilidade dos ensaios em triplicata, caracterizada pelo coeficiente de variação (CV) na Tabela 3, pode ser considerada baixa por ter ficado abaixo de 10% para RCS e RT em todos os teores de areia analisados, com exceção do RT no teor de 70% de areia que ficou em 15,11%. Entretanto, com relação ao CBR, seis dos onze teores de areia ensaiados apresentaram CV acima de 10%, sendo que em cinco deles essa defasagem não foi tão significativa, entre 11,02% e 16,67%, mas para a areia pura (100% de areia) o CV foi de 35,64%. Isto se deve as dificuldades encontradas para manter a integridade das amostras após a imersão em água por 96 h, onde ocorreu, corriqueiramente, perda de solo comprometendo o ensaio de penetração propriamente dito na prensa CBR.

A variação destes parâmetros, em função do teor de areia, mostrada na Figura 11, indica que a RCS, em linhas gerais, diminui com o aumento do teor de areia, partindo de 320 kPa, para o Massapê puro, aumentando para 340 kPa com 20% de areia, até 100 kPa com 80% de areia, ou seja, uma redução de mais de 70%. A RT obedeceu a mesma tendência partindo de 60 kPa, para o Massapê puro, aumentando para 80 kPa com 10% de areia, até 15 kPa com 80% de areia. No caso do CBR, o comportamento foi o inverso, com aumento deste parâmetro com incremento da participação da areia nas misturas. Essa diferença de comportamento entre a RCS, RT e CBR pode estar relacionado às especificidades de cada ensaio: aplicação de solicitação (duração e carga), procedimento de preparação das amostras, objetivo de aplicação dos ensaios e às condições de confinamento da amostra no ensaio CBR em comparação aos outros dois testes (RCS e RT).

### 3.4 EXPANSÃO LIVRE E COM SOBRECARGA

A Tabela 4 apresenta os dados referentes aos valores medidos de expansão livre e com sobrecarga, para as amostras de Massapê e os teores de areia de 60%, 70% e 80%, considerados, até aqui, os promissores para estabilização, com leituras realizadas com 0, 1, 2, 5, 10, 30 min e 1, 2, 5, 24, 48, 72 e 96h.

Tabela 4 – Expansão do Massapê e misturas consideradas promissoras.

Tempo	Expansão livre (%)				Expansão com sobrecarga (%)			
	Teor de areia				Teor de areia			
	0%	60%	70%	80%	0%	60%	70%	80%
0 min	0	0	0	0	0	0	0	0
1 min	0,12	0,06	1,11	0,01	0,83	0,01	0	0
2 min	1,94	0,07	1,33	0,01	1,2	0,02	0	0
5 min	3,04	0,08	1,38	0,02	1,69	0,04	0	0
10 min	3,89	0,1	1,42	0,02	2,02	0,06	0,1	0
30 min	5,61	0,19	1,7	0,02	2,55	0,14	0,2	0
1 h	7,45	0,32	2,4	0,03	2,92	0,23	0,3	0
2 h	11,49	0,58	3,72	0,03	3,39	0,33	0,4	0
5 h	15,68	1,2	0,83	0,03	4,52	0,53	0,6	0
24 h	20,86	2,32	1,3	0,11	8,88	1,07	1	0
48 h	22,85	3,12	1,73	0,42	10,9	1,46	1,1	0,1
72 h	23,2	3,44	1,99	0,46	11,7	1,7	1,2	0,2
96 h	23,61	3,8	2,2	0,48	12,2	1,83	1,3	0,2

Os valores de expansão total livre e com sobrecarga do Massapê, da ordem de 23,61% e 12,21%, respectivamente, apresentados na Tabela 5, estão próximos dos valores medidos por Cunha [8] e Oliveira e Costa [32], da ordem de 19% e 11%, respectivamente. Estes resultados indicam que apesar da redução da expansão total com sobrecarga da ordem de 48% em relação à expansão total livre, ainda assim os valores medidos se mostraram acentuadamente elevados.

A adição das quantidades de areia consideradas promissoras na mistura com o Massapê, de 60%, 70% e 80%, reduziram significativamente tanto a expansão total livre quanto a expansão total com sobrecarga, para valores de 3,80% e 1,83%, para 60% de areia, 2,20% e 1,30%, para 70%, e 0,48% e 0,21%, para 80%.

Em relação à taxa de expansão, que pode ser calculada com uso dos dados da Tabela 4, observa-se que no Massapê puro 50% da expansão total livre ocorreu com 2h de ensaio, aproximadamente, enquanto que com sobrecarga esse percentual somente ocorreu após 5h de ensaio. Considerando as misturas, entretanto, com 60% e 70% de areia o comportamento da expansão livre e com sobrecarga foi similar a taxa de expansão do Massapê puro com sobrecarga, com 50% ocorrendo com mais de 5h de ensaio. Para a mistura com 80% de a areia, a taxa de 50% de expansão livre e com sobrecarga somente foi alcançada com mais de 24h de ensaio.

### 3.5 PRESSÃO DE EXPANSÃO

O aumento dos teores de areia nas misturas com o Massapê proporcionou redução tanto da expansão livre quanto da com sobrecarga e, por consequência, da pressão de expansão exercida por cada mistura. Os valores da pressão de expansão medidos estão apresentados também na Tabela 5, juntamente com as expansões totais livre e com sobrecarga medidos em 96 h. A variação destes três parâmetros, em função dos teores de areia testados, fica melhor visualizada na Figura 12.

Tabela 5 – Valores de expansão.

Areia (%)	Expansão Livre (%)	Expansão com sobrecarga (%)	Pressão de Expansão (kPa)
0	23,61	12,21	50,24
10	18,35	10,10	45,18
20	11,01	6,40	49,40
30	10,95	3,08	24,93
40	7,19	2,84	20,30
50	9,90	4,36	18,82
60	3,80	1,83	5,95
70	2,20	1,30	3,42
80	0,48	0,21	0
90	0,03	0,02	0
100	0,13	0	0

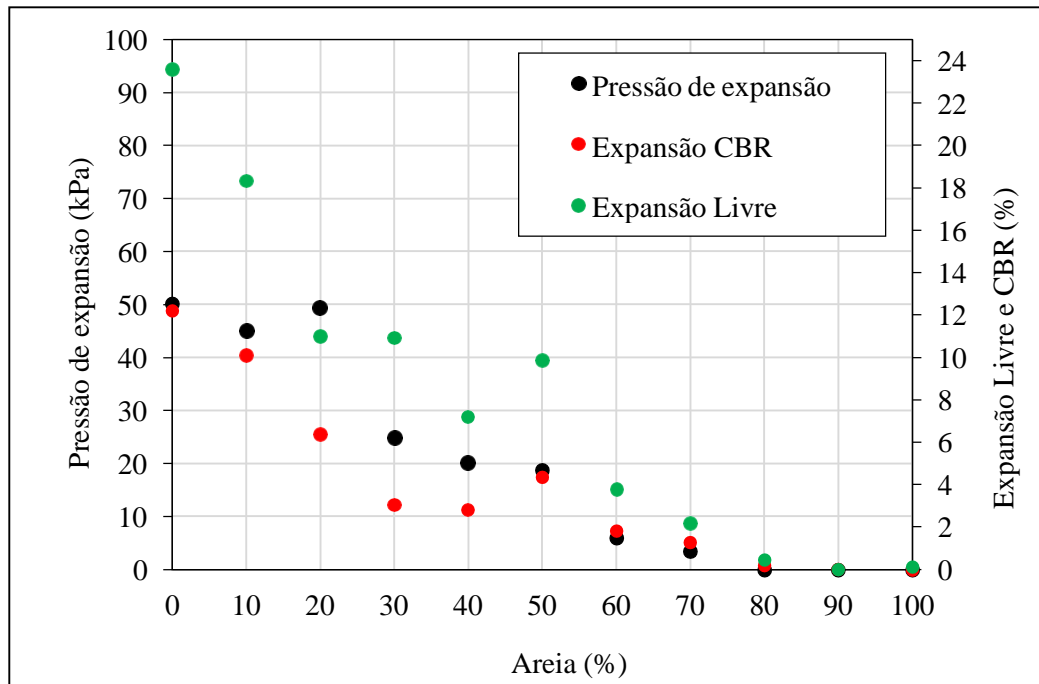


Figura 12 - Pressão de expansão e taxas de expansão.

Os resultados apresentados na Tabela 5 e Figura 12, além de indicar a diminuição da expansão livre, expansão com sobrecarga e pressão de expansão com o aumento do teor de areia, demonstram que a distância entre a expansão livre para a com sobrecarga também diminui na mesma tendência. Por outro lado, a pressão de expansão, que apresentou valores da ordem de 50 kPa para o Massapê puro, com expansão livre e com sobrecarga de 23% e 12%, respectivamente, passou para 5 kPa quando a expansão com sobrecarga ficou abaixo de 2%, com 60% de areia, sendo este o limite máximo para utilização de material como subleito.

Portanto, para as misturas testadas no presente estudo, a condição de pressão de expansão máxima de 5 kPa pode ser utilizada como critério de aceitação para uso do material como camada de subleito. Conseqüentemente, considerando estes ensaios de deformabilidade (expansão e pressão de expansão), o ensaio de compactação (Figura 9), o de EA (Figura 10), além das variações nas classificações TRB e SUCS das misturas (Tabela 2), pode-se presumir que os teores de 60%, 70% e 80% de areia seriam considerados os promissores para estabilização do Massapê.

Dessa forma, numa campanha experimental com ensaios dinâmicos de MR e DP para caracterização de misturas Massapê-areia para uso como subleito seguindo as exigências da instrução de serviço do DNIT 247 [22], bastará ensaiar os teores considerados aqui como promissores (60%, 70% e 80% de areia) para que se obtenha, dentre eles, a mistura mais adequada no dimensionamento utilizando o novo método MeDiNa.

#### 4. CONCLUSÕES

A caracterização preliminar proposta para estabilização do Massapê utilizando areia se mostrou uma estratégia eficiente, na medida em que restringiu de onze misturas inicialmente testadas, entre 0% de areia e 100% de areia, com variação de 10% entre misturas, para apenas quatro misturas, considerando que os ensaios dinâmicos serão realizados no Massapê puro e nas três misturas consideradas promissoras (60%, 70% e 80% de areia). Isso significa que, admitindo-se a realização de nove testes por mistura, sendo três de MR e seis, no mínimo, de DP, a quantidade de ensaios a serem realizados foi reduzida de 99 para 36, correspondendo a um ganho em termos de esforço experimental e de tempo de mais de 60%. A racionalização destes testes dinâmicos demandados no MeDiNa parece ser um caminho a ser trilhado na busca de disseminar o novo método de dimensionamento, visto que a quantidade de equipamentos triaxiais, aptos a realiza-los no país ainda é mínima e concentrada, via de regra, nos centros de ensino e pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 6502: SOLOS E ROCHAS. 1995.
- [2] ATAÍDE, Stive Osca Falcão de. Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- [3] BEZERRA, Izabela Medeiros de Lima. Análise da interação interpartículas e do processo de fissuração de um solo expansivo tratado com areia, cal e cinza de casca de arroz. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- [4] BARBOSA, Valquiria. Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2013.
- [5] BATISTA, Vanessa de Souza. Potencial do uso de resíduo de mineração de rocha calcária para estabilização de solos expansivos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2021.
- [6] BRAZ, Raabi Inarair Ferreira. Avaliação da resistência de um solo expansivo do Município de Paulista-PE melhorado com Cimento Portland. 2018.

- [7] CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, A. N. Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos. v. 1. Rio de Janeiro. 2015.
- [8] CUNHA, Carlos Eduardo Alves. Adição de agregado reciclado de resíduo da construção civil para estabilização de um solo expansivo. 2018.
- [9] CHAGAS, Gleiber da Silva; MOURA, Alfran Sampaio; CARNEIRO, Andressa de Araujo. Utilização da compactação para redução do potencial de colapso/expansão de um solo silto argiloso de Massapê da cidade de Icó-CE. 2017.
- [10] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994) DNER-ME 041/94. Solos- preparação de amostras para ensaio de caracterização. Rio de Janeiro.
- [11] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994) DNER-ME 051/94. Solos- Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- [12] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1997) DNER-ME 054/97. Determinação do equivalente de areia. Rio de Janeiro.
- [13] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994) DNER-ME 082/94. Solos- Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- [14] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER - ME 93. Solo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro. 4 p.
- [15] Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). (1994) DNER-ME 122/94. Solos- Determinação do limite de liquidez- método de referência. Rio de Janeiro.
- [16] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2018). DNIT- ME 134 – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- [17] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013). DNIT – ME 164. Solos- Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 7p.
- [18] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2016) DNIT 172. 2016-ME. Solos- Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro.
- [19] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2018) DNIT 179 - IE. Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasil.
- [20] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2020). Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, Rio de Janeiro.
- [21] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2020). Guia para execução de segmentos experimentais – PRO-MeDiNa. Brasília.

- [22] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021). Instrução de Serviço nº 247. Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. Brasil.
- [23] FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença. Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2007.
- [24] FRANCO, Filipe Augusto Cinque de Proença; MOTTA, Laura Maria Goretti da. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Manual para utilização do Método Mecânico-Empírico MeDiNa: Apresentação dos programas. Rio de Janeiro: COPPE/IPR, 78p, 2020.
- [25] HENRY, Elvin Francis; DRAGOO, Mary C. Guide to Use of the FHA Soil PVC Meter: Including Results of Nationwide Soil Tests and Correlation with Climatic Factors. Federal Housing Administration, 1965.
- [26] IKIZLER, S. B.; AYTEKIN, M.; VEKLI, M. Reductions in swelling pressure of expansive soil stabilized using EPS geofoam and sand. *Geosynthetics International*, v. 16, n. 3, p. 216-221, 2009.
- [27] KAWAHASHI, Juliana; JÚNIOR, Ronaldo Bitello Tomei; TATSUTA, Evelyn Kaori; BALBO, José Tadeu; BALZAN, Dirce Carregã. Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação. *TRANSPORTES*, v. 18, n. 2, 2010.
- [28] MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul. 2014.
- [29] MORAIS, Camila de Jesus. Tentativa de estabilização de um solo expansivo com adição de polímero industrial, 2018.
- [30] MOURA, Geverson de Jesus. Estabilização granulométrica de solo argiloso com inclusão de PET micronizado. 2020.
- [31] NIEHUES, Ana Paula Gava. Estabilização granulométrica de solo argiloso com agregado de resíduo de concreto da construção civil para utilização em pavimentação. 2018.
- [32] OLIVEIRA, Larissa da Silva; COSTA, Stephanny C.F. do Egito. Caracterização de um solo tipo Massapê para verificação do seu potencial expansivo. XIX COBRAMSEG, 2018.
- [33] OLIVEIRA, Oskar Pinto; REIS, Antonio Felipe de Souza Machado; SILVA, Italo Santos da; CARVALHO, Miriam de Fátima. Avaliação da pressão de expansão de solos da rodovia BR-324 tratados quimicamente. SEMOC-Semana de Mobilização Científica-Alteridade, Direitos Fundamentais e Educação, 2018.



- [34] PAIVA, Sergio Carvalho; LIMA, Márcia Alves de Assis; FERREIRA, Maria da Graça de Vasconcelos Xavier; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 21, p. 437-449, 2016.
- [35] SANTOS, Lucas Coelho dos. Estudo da estabilização de um solo expansivo através da incorporação de areia verde de fundição residual. 2015.
- [36] SILVA, Jayne Araújo; MEDEIROS, Rafaella de Moura; SÁ, Raisia Pires Vieira de Lorena; BELLO, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira; JÚNIOR, Rômulo Fontoura de Oliveira; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. Caracterização de Misturas Solo-Cal e Solo-Cinza Aplicadas na Estabilização de Um Solo Expansivo da Cidade de Agrestina-PE. 2018.
- [37] SOUZA, Fernanda Cruz Sayd de; ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; COSTA, Oldair Del'Arco Vinhas; MALAQUIAS, Gabriela Antonia Pinto; VIEIRA, Gustavo Rodrigues. Curvas de retenção de água de três solos compactados do Recôncavo da Bahia. 2020.
- [38] VIEIRA, Gustavo Rodrigues; ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; COSTA, Weiner Gustavo Silva Costa; SOUZA, Fernanda Cruz Sayd de; MALAQUIAS, Gabriela Antonia Pinto. Influência da Energia de Compactação no Comportamento Expansivo do Massapê. Cruz das Almas. 2020.