

### 3 Programa experimental

Este trabalho de mestrado foi realizado em uma parceria da PUC com a ENTPE (École Nationale des Travaux Publics de l'État), localizada em Lyon, na França. Assim, todos os ensaios do programa experimental em questão foram realizados no laboratório de Geomateriais (LGM) da ENTPE, um dos laboratórios pertencentes ao departamento de Engenharia Civil da universidade. O laboratório realiza ensaios relacionados aos materiais e estruturas de engenharia civil, tais como reologia dos meios granulares, materiais compósitos, dinâmica e métodos numéricos e concepção de projeto e dimensionamento. O laboratório LGM é formado por 12 professores, 8 técnicos, 2 alunos de pós-doutorado e 15 alunos de doutorado. O laboratório LGM vem estudando e publicando artigos e teses sobre o uso da terra na construção civil desde meados da década de 80.

#### 3.1 Materiais utilizados

Para os ensaios com revestimentos de terra, foi utilizado como substrato a face sul de um muro de terra batida localizado na fazenda de Allivoz, no Grand Park Miribel Jonage, em Lyon, França. Esse substrato era composto por uma base em concreto seguido por uma elevação de terra de cerca de 50 cm de altura e 30 cm de largura (Figura 3.1).



Figura 3.1: Muro localizado na fazenda de Allivoz (França).

O muro encontrava-se sem proteção contra intempéries desde a construção do mesmo, há aproximadamente três anos. A sua curva granulométrica e o

resultado do ensaio do azul de metileno encontram-se respectivamente na Figura 3.2 e na Tabela 3.1. Pela curva granulométrica percebe-se que o muro possui um baixo teor de argila (aproximadamente 1% em peso de solo), o que não é incompatível com os teores de argila sugeridos por Walker *et al.* (2005) para muros de terra batida (entre 5% e 20% em peso de solo).

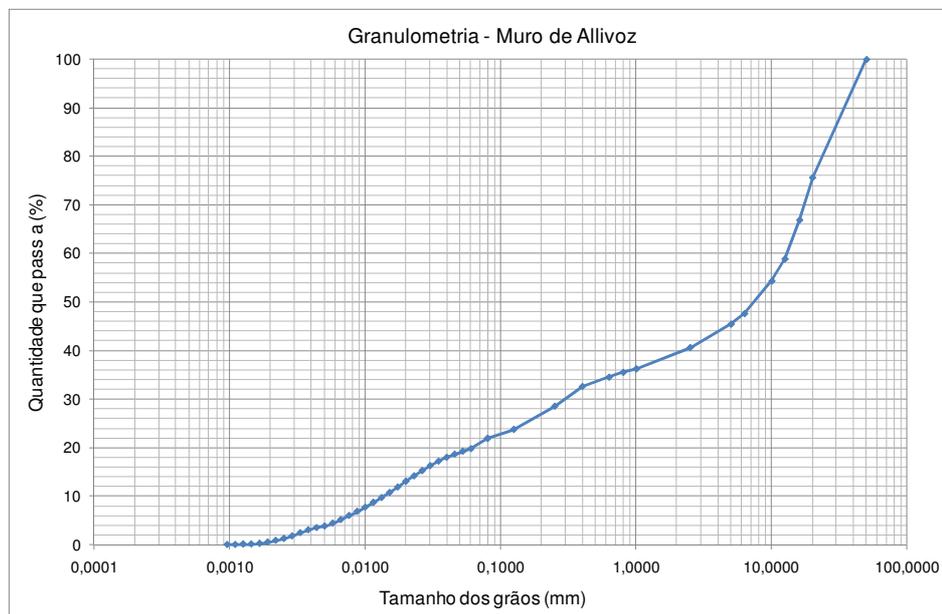


Figura 3.2: Curva granulométrica do muro de Allivoz (autor: E. Hamard, ENTPE).

Tabela 3.1: Ensaio de azul de metileno do muro de Allivoz (autor: E. Hamard, ENTPE).

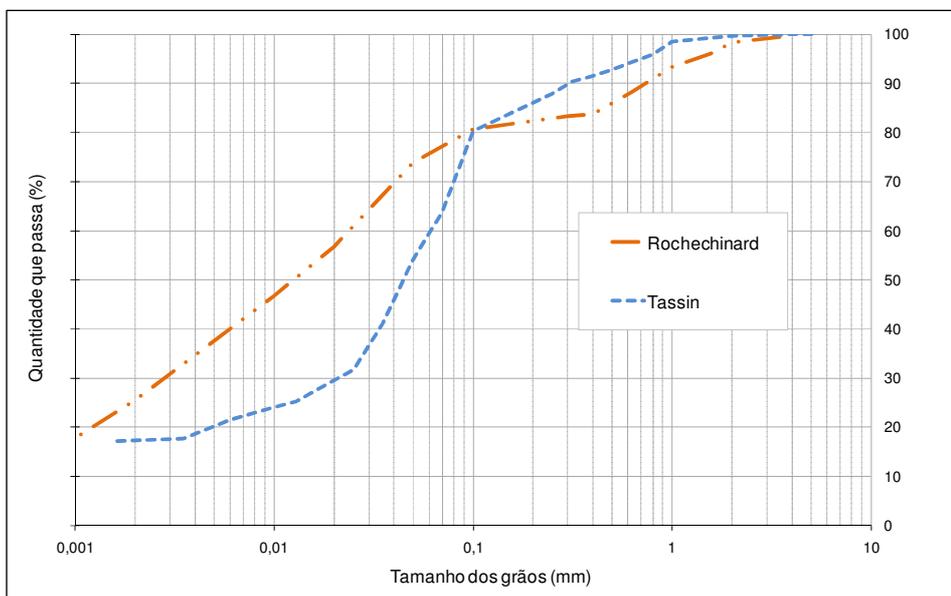
<b>Absorção do Azul de Metileno</b>	<b>Valor do Azul</b>	2,16
	<b>Atividade</b>	0,98

Para a fabricação dos revestimentos que seriam aplicados ao muro foram utilizados dois tipos de solos provenientes de áreas distintas na França, Rochechinard e Tassin, e que levam o nome das regiões de onde foram extraídos. A região de Tassin é localizada a aproximadamente 8 km do centro de Lyon, enquanto Rochechinard está a aproximadamente 130 km. As diferentes propriedades dos dois solos são descritas na Tabelas 3.2, abaixo:

Tabela 3.2: Propriedades de Rochechinard e Tassin (P'KLA, 2002).

<b>Material</b>	<b>Rochechinard</b>	<b>Tassin</b>
<b>Limites de Atterberg</b>	<b>Limite de Liquidez</b>	38%
	<b>Limite de Plasticidade</b>	20%
	<b>Índice de Plasticidade</b>	18%
<b>Absorção do Azul de Metileno</b>	<b>Valor do Azul</b>	2,5
	<b>Atividade</b>	10
<b>Argila presente em maior quantidade</b>	Caulinita	Ilita
<b>Argila presente em menor quantidade</b>	Montmorilonita	Caulinita

As curvas granulométricas de Tassin e Rochechinard encontram-se na Figura 3.3. Cada um dos solos possui um argilomineral diferente presente em maior quantidade: ilita para o solo de Tassin e caulinita para Rochechinard.



Granulometria		Rochechinard	Tassin
Distribuição das Partículas (ABNT 6502/95)	Areia	25%	40%
	Silte	49,5%	42,5%
	Argila	25,5%	17,5%

Figura 3.3: Granulometria - ensaio de peneiramento (autor: E. Hamard, ENTPE).

Utilizou-se também a areia média de Hostun, com um diâmetro médio de 0,35 mm (AZEREDO, 2005). Segundo Flavigny *et al.* (1990), areias médias são aquelas com grãos entre 0,16 mm e 0,63 mm. A curva de distribuição da areia média de Hostun pode ser encontrada no Anexo 1. Apesar de ser mais fina do que as areias normalmente empregadas para revestimentos, ela foi utilizada em função da sua grande disponibilidade no laboratório. A Figura 3.4 mostra as duas terras (Tassin e Rochechinard) e a areia de Hostun armazenadas em laboratório:



Figura 3.4: Tassin, Rochechinard e areia de Hostun (em laboratório) (autor: F. Salgado).

A influência de fibras nos revestimentos também foi estudada através da utilização de resíduos da fabricação de fibras curtas de cânhamo (*Cannabis sativa*) (Figura 3.5 A) e fibras curtas de sisal (*Agave sisalana*) (Figura 3.5 B). É importante observar que o cânhamo utilizado é um material triturado, e não propriamente uma fibra. Assim, para simplificar, neste trabalho tais materiais serão chamados simplesmente de “sisal” e “cânhamo”. O sisal e o cânhamo foram escolhidos em função da sua produção em grande escala no Brasil e na França, respectivamente.

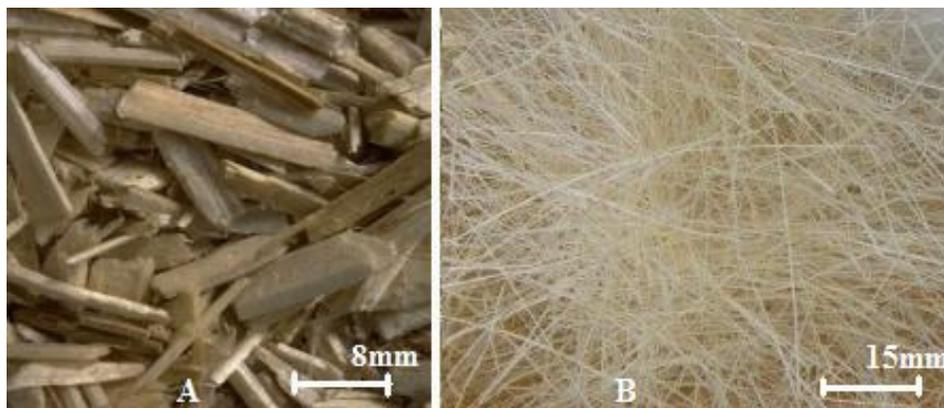


Figura 3.5: (A) Cânhamo e (B) Sisal (autor: F. salgado).

A Tabela 3.3 apresenta as dimensões destas duas fibras. O cânhamo é considerado como seção retangular de 2x5 mm de área e comprimento de 20 mm (P'kla, 2002), enquanto o sisal possui seção circular com valores médios de 0,15 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento (Ghavami *et al.*, 1999). A razão de aspecto do cânhamo foi considerada como a razão entre o seu comprimento (L) e o seu diâmetro equivalente ( $d'$ ) calculado a partir da sua área (A) (espessura x largura). O diâmetro equivalente ( $d'$ ) do cânhamo é dado a partir da equação 3.1 abaixo:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad (3.1)$$

Onde:

$d'$  – diâmetro equivalente (mm)

A – área (mm<sup>2</sup>)

Tabela 3.3: Propriedades do sisal e do cânhamo utilizados.

Material	Sisal	Cânhamo
<b>Origem</b>	Brasil (Paraíba)	França (Rhône-Alpes)
<b>Comprimento médio(mm)</b>	40 (± 2)	20 (± 5)
<b>Largura média(mm)</b>	-	5 (± 1,5)
<b>Espessura média(mm)</b>	-	2 (± 0,5)
<b>Diâmetro médio (mm)</b>	0,15 (± 0,6)	-
<b>Razão de aspecto</b>	266,7	5,6

A figura 3.6 mostra o esquema dimensional de um resíduo da fabricação de cânhamo, utilizado neste trabalho, com sua seção retangular:

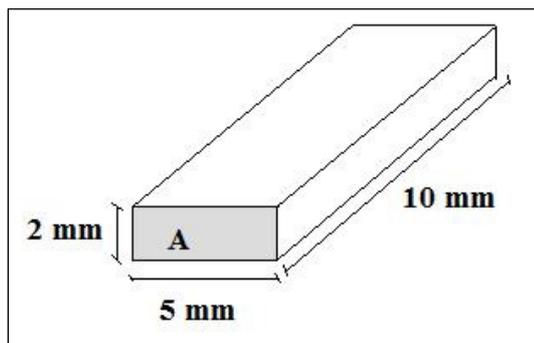


Figura 3.6: Fibras de cânhamo - esquema.

### 3.2 Preparação do material

Todas as observações obtidas durante a fabricação dos diferentes revestimentos e amostras foram anotadas em uma folha de teste (Apêndice 1). As condições climáticas durante a realização dos ensaios encontram-se nos Apêndices 2 e 3.

Antes da aplicação do revestimento, o muro foi escovado (Figura 3.7 A) e, em seguida, ligeiramente umedecido com um pulverizador de jardim (Figura 3.7 B), pois o substrato encontrava-se seco devido à sua exposição ao sol. Finalmente, para melhorar a aderência entre o revestimento e o substrato, foi aplicada uma argamassa de cal como camada de fixação. A mistura era composta de 1 parte em volume de cal medianamente hidráulica NHL 3,5 e 2 partes em volume de areia (Figura 3.7 C).

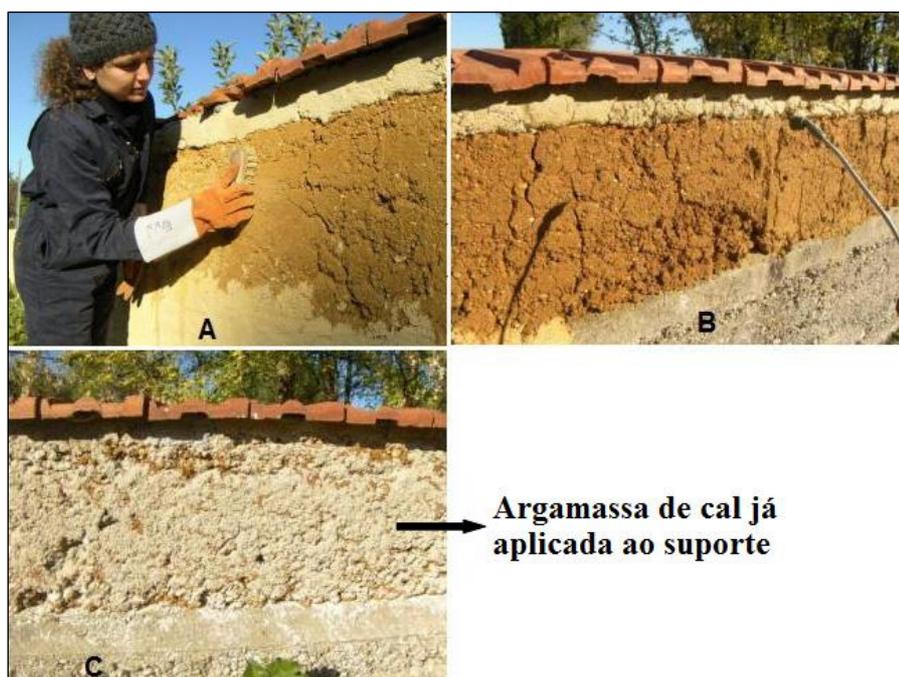


Figura 3.7: Preparação do substrato - (A) Escovação, (B) Umidificação e (C) Camada de fixação (argamassa de cal) aplicada ao substrato.

Antes de serem transportadas para a fazenda de Allivoz, as terras (Tassin e Rochechinard) e a areia foram secas em uma estufa (a 100 °C) durante dois dias. No laboratório, tanto para Tassin quanto para Rochechinard, foram fabricados quatro traços em peso, cada um deles contendo uma diferente porcentagem de argila (17,5%, 12%, 9% e 6% em peso de argila). Essas porcentagens de argila foram obtidas a partir da adição de areia ao solo. Buscou-se trabalhar com quatro porcentagens de argila suficientemente distintas, partindo-ser do valor de 17,5% que é a porcentagem de argila existente no solo de Tassin e que por isso não exigiria correção do traço através da adição de areia. Após a preparação, as misturas foram colocadas em sacos devidamente lacrados para evitar a entrada de umidade e levadas à fazenda de Allivoz.

Como material de referência, foi fabricado *in situ* um traço em volume de cal e areia (1:3). O aglomerante deste traço era composto por 50% de cal aérea CL 90 e 50% de cal medianamente hidráulica NHL 3,5.

Foram realizados então nove traços: quatro com solo de Tassin, quatro com Rochechinard e um com o material de referência (argamassa de cal). Na fazenda de Allivoz, os nove traços foram colocados isoladamente em uma vasilha onde foi adicionada uma quantidade de água (água de amassamento), que variou entre 1 e 1,5 l, até que o material obtivesse uma trabalhabilidade suficiente para aplicação ao substrato, resultando então em um teor de água distinto para cada traço. Com o auxílio de uma colher de pedreiro, cada traço foi bem misturado e em seguida aplicado ao substrato. Na Tabela 3.4 encontram-se as quantidades de terra, areia e água empregadas em cada um dos nove traços:

Tabela 3.4: Propriedades dos traços de Tassin, Rochechinard e Cal+areia.

TASSIN							
No. do traço	Nome do traço	% de argila no traço	Massa de terra (kg)	Massa de areia (kg)	Massa total (kg)	Água (l)	Teor de água (%)
1	TA 17,5%	17,50%	5	0	5,00	1,35	27,0%
2	TA 12%	12%	3,43	1,57	5,00	1,18	23,6%
3	TA 9%	9%	2,57	2,43	5,00	1,02	20,4%
4	TA 6%	6%	1,71	3,29	5,00	1,14	22,8%
ROCHECHINARD							
No. do traço	Nome do traço	% de argila no traço	Massa de terra (kg)	Massa de areia (kg)	Massa total (kg)	Água (l)	Teor de água (%)
5	R 17,5%	17,50%	3,43	1,57	5,00	1,26	25,2%
6	R 12%	12%	2,35	2,65	5,00	1,14	22,8%
7	R 9%	9%	1,76	3,24	5,00	1,25	25,0%
8	R 6%	6%	1,18	3,82	5,00	1,24	24,8%
MATERIAL DE REFERÊNCIA: CAL + AREIA							
No. do traço	Nome do traço	% de argila no traço	Cal hidráulica kg, (dm <sup>3</sup> )	Cal aérea kg, (dm <sup>3</sup> )	Areia kg, (dm <sup>3</sup> )	Água (l)	Teor de água (%)
9	Cal+Areia	0,00%	0,22 (0,375)	0,39 (0,375)	4,48 (2,25)	1,7	33,4%

Para verificar as melhorias impostas pela adição de fibras, foram preparados traços de Rochechinard com 17,5% e 12% em peso de argila, estabilizados com sisal e cânhamo. Essas porcentagens de argila foram escolhidas em função do aparecimento de fissuras nos revestimentos não estabilizados com tais porcentagens de argila (como será demonstrado na seção 4.2). Em função do cronograma de ensaios e das condições climáticas da França na época da realização dos ensaios (início do inverno e consequente ocorrência de condições climáticas não ideais para aplicação de revestimentos), não foi possível testar a estabilização no solo de Tassin.

As fibras foram adicionadas às misturas secas de Rochechinard e areia em uma porcentagem de 0,5% do peso do solo seco, lentamente com as mãos, para assegurar a distribuição uniforme na matriz. Essa porcentagem é a mesma utilizada por Ghavami *et al.* (1999) no estudo do comportamento de compósitos de solo reforçados com fibras vegetais. Em seguida, foi inserida uma quantidade de água de amassamento que garantisse boa trabalhabilidade (Figura 3.8). Os traços em peso com fibras encontram-se na Tabela 3.5:

Tabela 3.5: Propriedades dos diferentes traços de Rochechinard com fibras.

#### ROCHECHINARD + SISAL

N.º do traço	Nome do traço	% de argila no traço	Massa de terra (kg)	Areia (kg)	Massa total (kg)	Fibra (kg)	Água (l)	Teor de Água (%)
F1	R 17,5% + sisal	17,5%	3,43	1,57	5	0,025	1,36	27,1
F2	R 12% + Sisal	12%	2,35	2,65	5	0,025	1,2	23,9

#### ROCHECHINARD + CÂNHAMO

N.º do traço	Nome do traço	% de argila no traço	Massa de terra (kg)	Areia (kg)	Massa total (kg)	Fibra (kg)	Água (l)	Teor de Água (%)
F3	R 17,5% + cânhamo	17,5%	3,43	1,57	5	0,025	1,28	25,5
F4	R 12% + cânhamo	12%	2,35	2,65	5	0,025	1,12	22,3



Figura 3.8: A) Mistura de terra e areia (R 12%); B) Adição de fibras curtas de sisal; C) Adição de água de amassamento; D) Revestimento pronto.

### 3.3

#### Descrição dos ensaios

Para cada um dos traços (com e sem fibras) foram fabricadas uma amostra de 25 cm x 25 cm x 2 cm, duas amostras de 5 cm x 4 cm x 2 cm e duas amostras de 4 cm x 4 cm x 16 cm. É importante observar que existem diversas maneiras de se aplicar um revestimento sendo a forma de lançamento uma variável que interfere no desempenho do mesmo, principalmente no que se refere à aderência ao substrato.

Neste trabalho, o lançamento foi feito a uma distância de 1 m, aproximadamente, com o auxílio de uma colher de pedreiro (Figura 3.9 A). Em seguida, a superfície do material foi regularizada com a parte inferior da colher de pedreiro (Figura 3.9 B) e, finalmente, o excesso das laterais foi retirado para que a amostra permanecesse com as dimensões desejadas. No entanto, a espessura dos corpos-de-prova variou em função de dificuldades no lançamento manual.



Figura 3.9: A) Lançamento do material de referência (cal + areia); B) Regularização da superfície do traço TA 12% em peso de argila.

### 3.3.1 Ensaio de consistência (Vicat)

Antes da aplicação no substrato, a consistência dos traços foi testada *in situ* por meio do Teste de Vicat (NF 1015-4, 1999).

O ensaio consiste em preencher um recipiente em duas camadas, sendo cada camada compactada por dez golpes curtos, para garantir um molde uniforme (Figura 3.10). O Teste de Vicat foi realizado três vezes para cada traço e, em seguida, o valor médio da penetração no molde foi calculado.

Para os traços não estabilizados, este ensaio foi realizado também em laboratório, com três diferentes teores de água de amassamento para cada um dos traços, com a finalidade de investigar a correlação entre este teor de água e o valor de penetração.



Figura 3.10: Teste de Vicat *in situ*.

### 3.3.2 Retração *in situ*

A retração *in situ* foi avaliada através das amostras quadradas de 25 cm x 25 cm x 2 cm, fabricadas em duas camadas, e consistiu apenas na observação visual do aparecimento de fissuras na superfície do revestimento (Figura 3.11). A verificação foi feita quatro semanas após a fabricação dos revestimentos, quando os mesmos já estavam secos. Durante estas quatro semanas de secagem, a temperatura se manteve entre 10 °C e 15 °C e a umidade relativa do ar variou entre aproximadamente 50% e 70%. Ocorreram dias de sol bem como dias nublados e com pequenas pancadas de chuva.

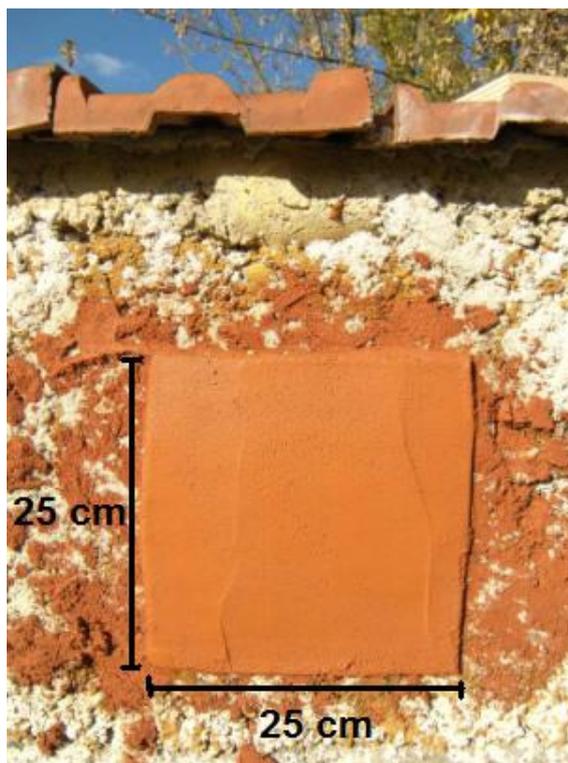


Figura 3.11: Amostra quadrada de 25 cm x 25 cm x 2 cm (R 9% em peso de argila).

### 3.3.3 Ensaio de cisalhamento

Para o ensaio de cisalhamento, após o ensaio de retração *in situ*, cada amostra de 25 cm x 25 cm x 2 cm foi cortada em quatro amostras menores de 5 cm x 4 cm x 2 cm, com o auxílio de um disco diamantado (Figura 3.12). O disco possuía 2 mm de espessura e 120 mm de diâmetro. Estas amostras foram chamadas “cortadas”.

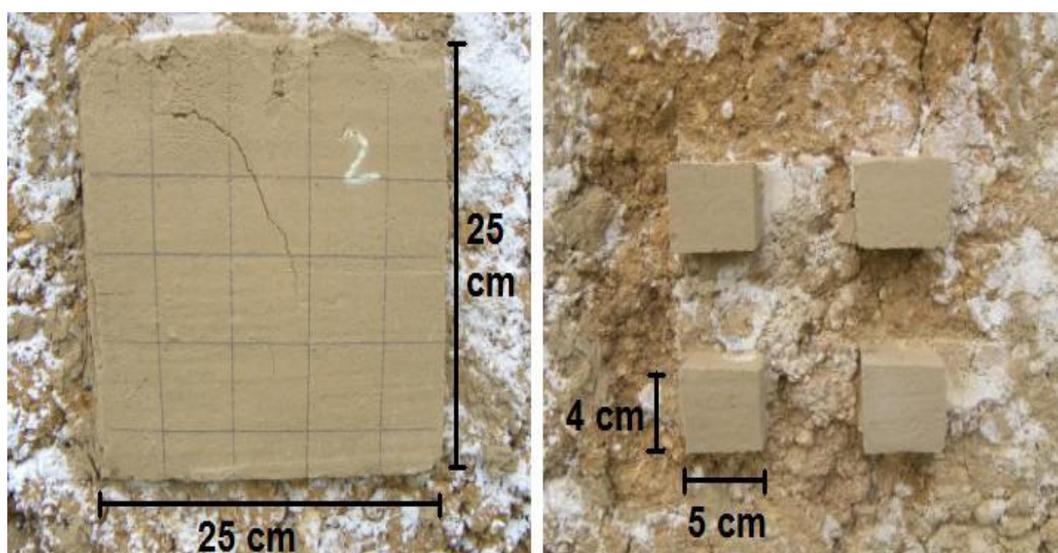


Figura 3.12: Corte da amostra de Tassin (TA 12% em peso de argila).

Foram utilizadas também as duas fabricadas já no tamanho de 5 cm x 4 cm x 2 cm, ditas “em estado natural”. Essas amostras receberam uma pequena quantidade de argamassa de cal na sua parte superior para que a sua superfície estivesse regularizada e permitisse uma distribuição uniforme da carga de cisalhamento (Figura 3.13).

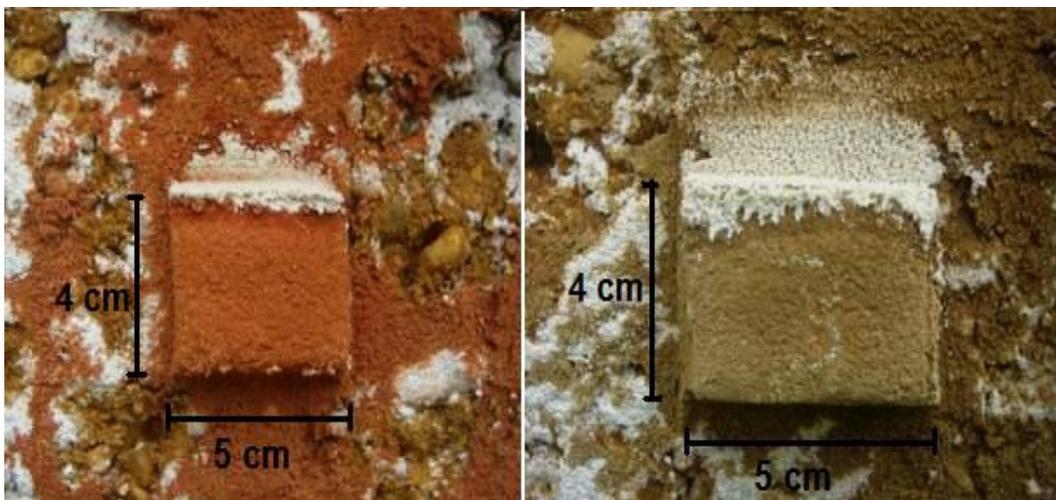


Figura 3.13: Adição de argamassa de cal no topo de amostras “estado natural”.

O ensaio de cisalhamento foi realizado *in situ* com as seis amostras de cada traço (duas em estado natural e quatro cortadas) com a ajuda de um dispositivo simplificado, com peso próprio de 600 g (Anexo 2). Como estes testes também colaboraram para a elaboração das Regras Profissionais de Alvenaria na França (ENTPE, 2009), era importante que o dispositivo fosse simples e pudesse ser facilmente reproduzido.

Para a execução do ensaio, o dispositivo foi posicionado no corpo-de-prova evitando qualquer contato com o substrato e garantindo que toda a carga de cisalhamento fosse transmitida somente para o revestimento. A cada 30 s, 250 g eram adicionadas ao substrato. A carga com a qual o revestimento tombou foi dita massa de ruptura ( $m_{rup}$ ). Sabendo-se a massa de ruptura ( $m_{rup}$ ) e a área ( $A$ ) de cada corpo-de-prova, a tensão de cisalhamento ( $\tau_{rup}$ ) pode ser calculada como:

$$\tau_{rup} = \frac{m_{rup} \cdot g}{A} \quad (3.2)$$

Onde:

$\tau_{rup}$  – tensão de cisalhamento na ruptura ( $\text{N}/\text{cm}^2$ )

$m_{rup}$  – massa de ruptura (kg)

$A$  – área de cisalhamento ( $\text{cm}^2$ )

$g$  – aceleração da gravidade ( $g = 9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ; constante).

Após os testes, as amostras foram coletadas, pesadas e colocadas na estufa (à 100 °C) por um dia. Em seguida, os teores de água durante os ensaios foram calculados a partir da variação de massa das amostras antes e após a secagem.

A Figura 3.14 mostra um corpo-de-prova sendo carregado, durante o ensaio de cisalhamento. No momento da foto, o revestimento já suportava 10,1 kg.



Figura 3.14: Exemplo do teste de cisalhamento – TA 9% suportando 10,1 kg.

### 3.3.4 Retração linear

Para este ensaio empregaram-se as amostras prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm (Figura 3.15). Neves *et al.* (2010) explicam que o ensaio consiste em tomar certa quantidade de material e colocá-lo na forma. A superfície superior deve ser alisada com uma colher de pedreiro. Em seguida, a forma deve ser mantida sob proteção do sol e da chuva por no mínimo sete dias. Após este período, a retração linear é medida a partir da comparação do comprimento inicial do molde (conhecido) e o comprimento final das amostras.

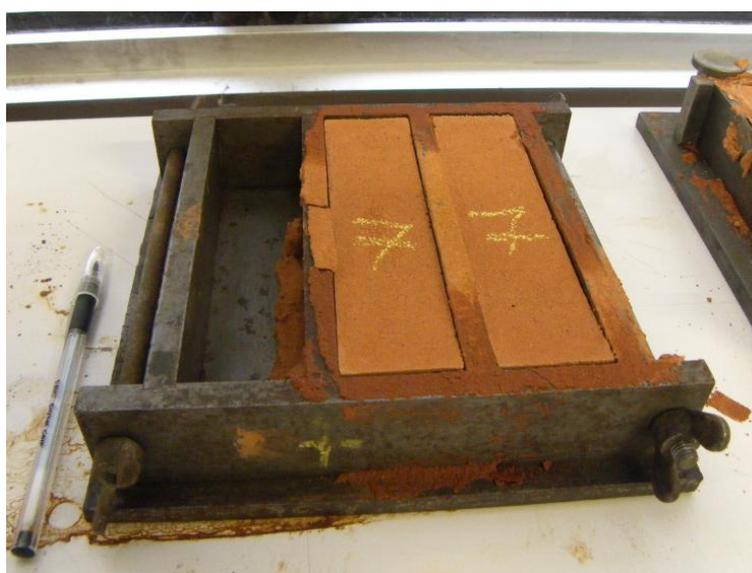


Figura 3.15: Amostras de 4 cm x 4 cm x 16 cm de R 9% em peso de argila.

Foram realizados dois testes de retração: *in situ* e linear. O primeiro, realizado *in situ* com amostras quadradas, teve como objetivo estudar a retração enquanto o revestimento ainda estava unido ao substrato; o segundo, em laboratório, é relativo somente à retração que ocorre no material sem interferência do substrato.

### 3.3.5 Ensaio de flexão 3 pontos

Após o ensaio de retração no laboratório, as mesmas amostras prismáticas foram utilizadas para o ensaio de Flexão 3 pontos. Conforme a norma francesa NF 1015-11 (1999), os corpos-de-prova de 4 cm x 4 cm x 16 cm foram posicionados sobre duas rótulas de 10 mm de diâmetro, distanciadas de 100 mm (Figura 3.16). Para o ensaio foi utilizada a prensa INSTRON 1, com um sensor de 10 kN  $\pm$  0,5%, com uma velocidade de aplicação de carga constante e igual a 50 N.s<sup>-1</sup>  $\pm$  10 N.s<sup>-1</sup> no topo e no centro das amostras, como pode ser observado na Figura 3.17.

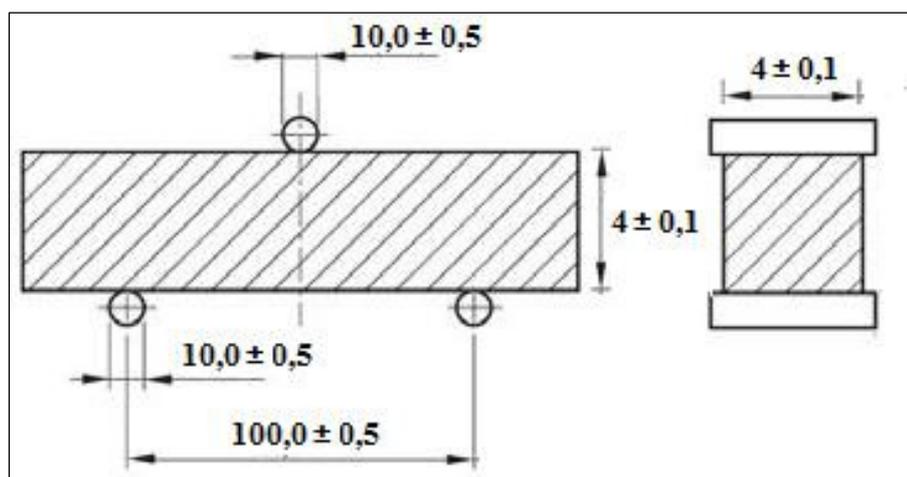


Figura 3.16: Esquema do ensaio de Flexão 3 Pontos (NF 1015-11, 1999).

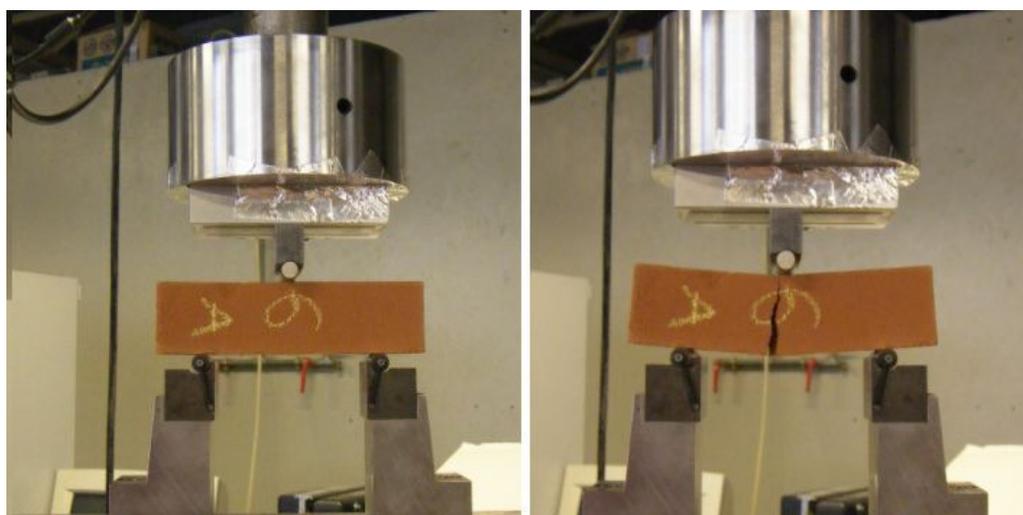


Figura 3.17: Exemplo do ensaio de Flexão 3 Pontos (R 12% em peso de argila).

A resistência à flexão é dada por:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot d}{l \cdot h^2} \quad (3.3)$$

Onde:

$R_f$  – resistência à flexão (N/cm<sup>2</sup>)

$F_f$  – força necessária para causar fratura no teste de flexão (N)

$d$  – distância entre as rótulas (mm) ( $d = 100$ mm; constante)

$l$  – largura (mm)

$h$  – altura do corpo-de-prova (mm)

Em seguida, todas as amostras foram pesadas e colocadas em uma estufa, à 100 °C, para secar. Depois de dois dias, conhecendo-se as massas secas, obteve-se o teor de água das amostras durante os ensaios.

### 3.4

#### Considerações finais

O presente programa experimental buscou realizar uma análise macro-mecânica do comportamento da terra como revestimento externo. Como não foram encontradas referências a estudos semelhantes a este, os ensaios de consistência, retração linear e resistência à flexão seguiram as normas existentes para os materiais ditos convencionais, como o concreto armado e o aço.

Foi verificada também a retração *in situ*, que buscou avaliar o aparecimento de fissuras nos revestimentos e a sua aderência ao substrato através de observação visual.

Finalmente, o ensaio de resistência ao cisalhamento foi adaptado para as condições de campo e por isso realizado com o auxílio de um dispositivo de madeira simples e que pode ser facilmente reproduzido. Neste caso, o método de aplicação do revestimento interfere diretamente nos resultados.

O programa experimental foi realizado na França, entre os meses de setembro e dezembro. O cronograma de ensaios se baseou nas alterações climáticas da época para que os revestimentos fossem aplicados em boas condições de temperatura e umidade. Pode-se dizer que apesar do cronograma limitado a essas situações externas, o programa experimental foi satisfatório pois englobou a análise de propriedades distintas do material terra quando empregado para revestimento externo.