

4 Análise dos resultados

4.1 Ensaio de consistência (Vicat)

Nas Figuras 4.1 e 4.2, encontram-se as curvas correspondentes aos ensaios de consistência, para Tassin e Rochechinard, respectivamente, tanto *in situ* quanto em laboratório. O ensaio *in situ* teve como objetivo testar a consistência de cada um dos traços, enquanto o ensaio realizado no laboratório procurou investigar a relação entre o teor de água e o valor de penetração. Tassin e Rochechinard apresentam resultados similares na forma, mas com valores distintos. Os resultados do ensaio de Vicat *in situ* estão circulados nos gráficos.

As discrepâncias entre esses valores e aqueles gerados em laboratório podem ser explicadas pela diferença no método experimental aplicado em cada um deles. No ensaio de Vicat realizado *in situ*, o teor de água foi medido a partir dos valores conhecidos de sólidos secos e água adicionada; no laboratório, os diferentes teores de água eram obtidos por adições sucessivas de água em um único montante de sólidos inicialmente secos.

Todos os resultados de penetração do teste de Vicat e de teor de água estão no Apêndice 4. O Apêndice 5 traz os resultados do teste de Vicat em laboratório.

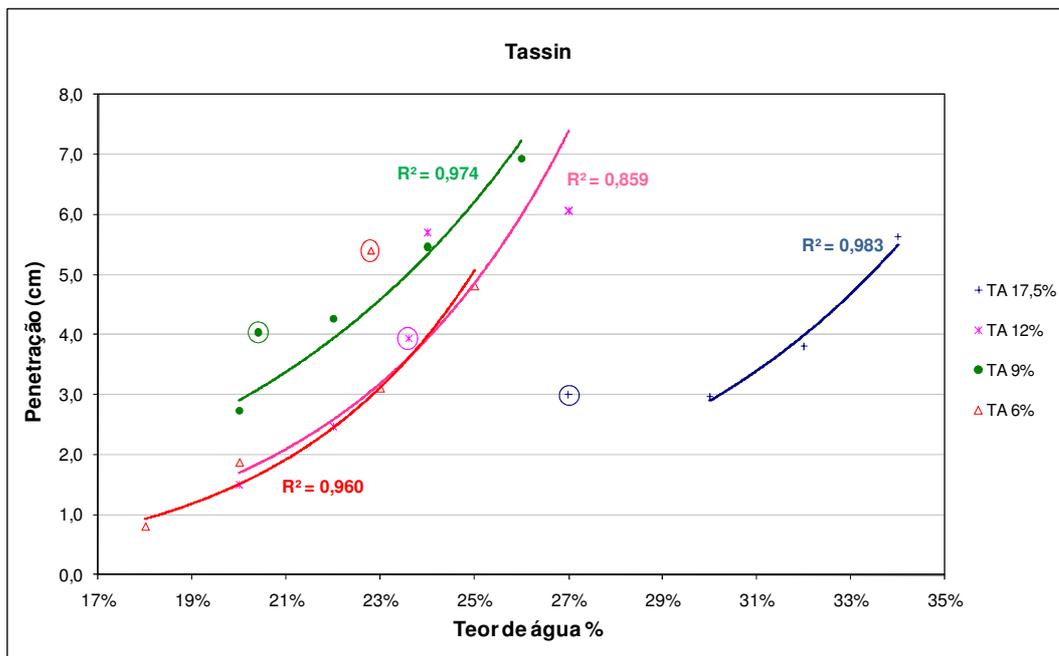


Figura 4.1: Penetração x Teor de água - Tassin.

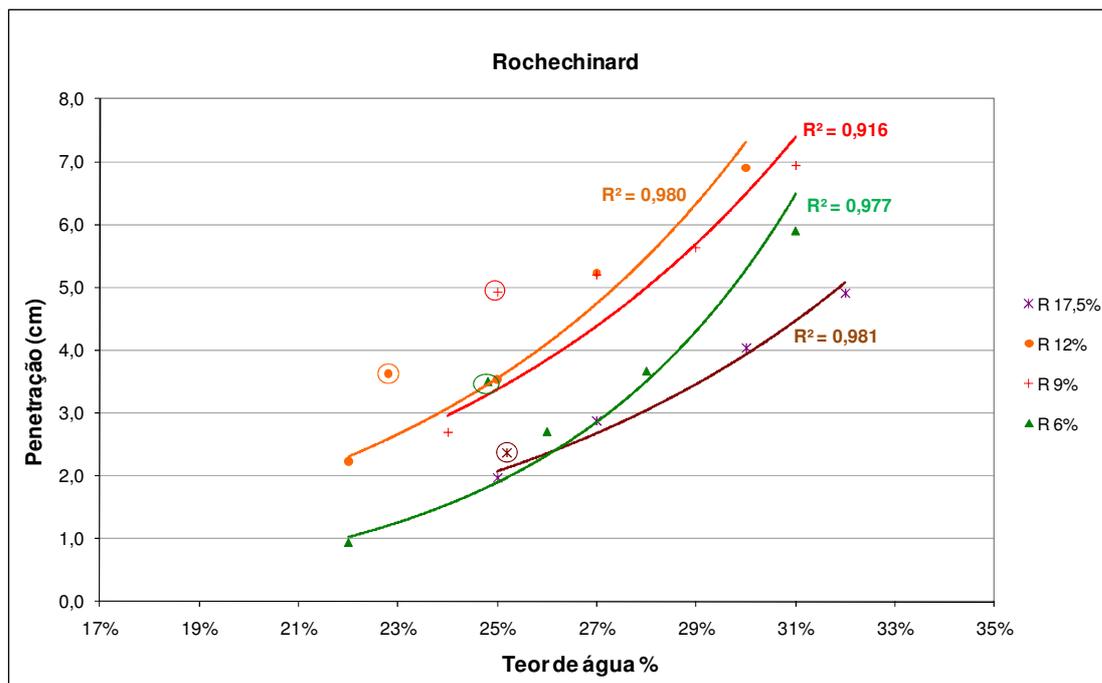


Figura 4.2: Penetração x Teor de água - Rochechinard.

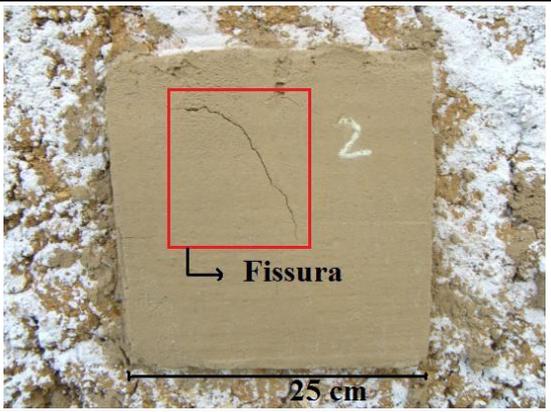
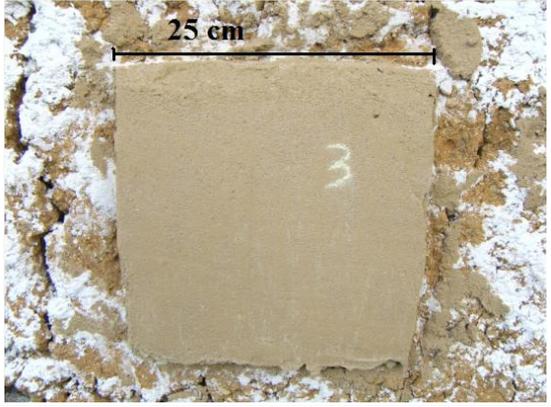
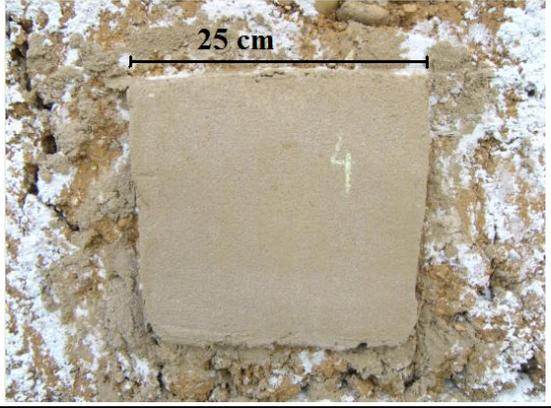
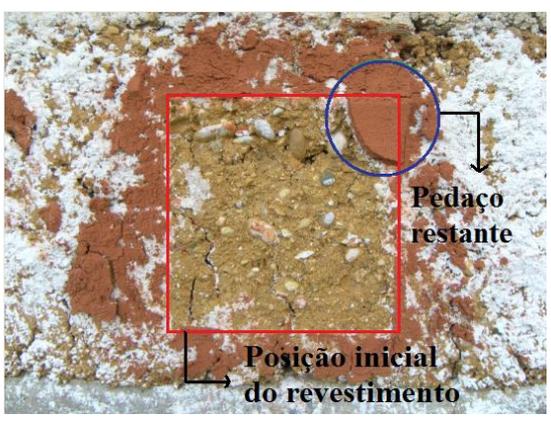
4.2

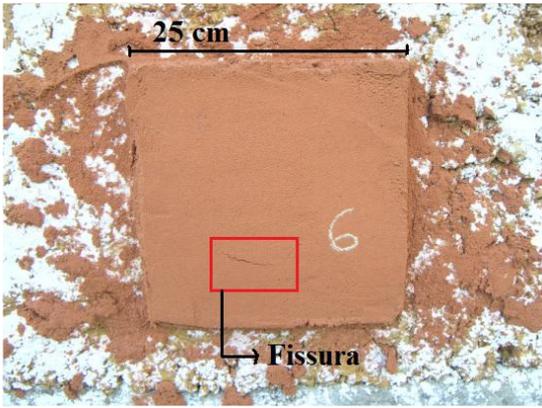
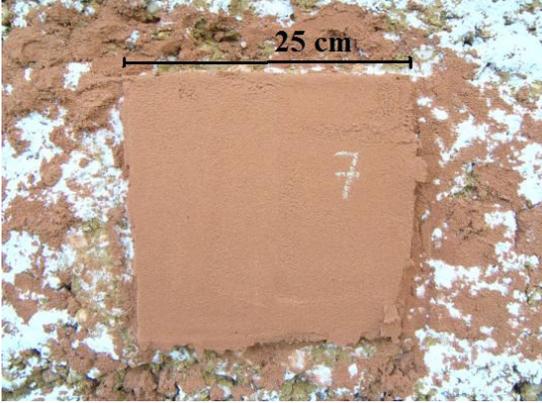
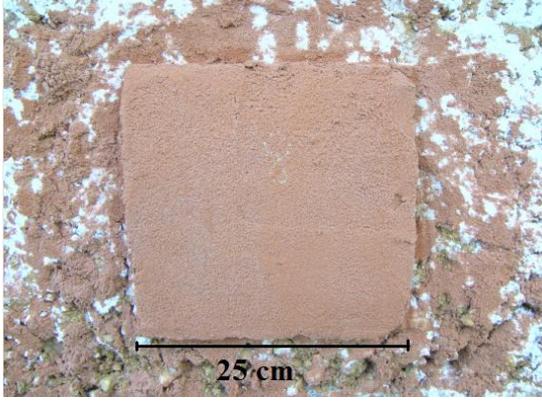
Retração *in situ*

As análises visuais da retração *in situ* de cada traço podem ser encontradas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Retração *in situ* dos revestimentos de terra (sem fibras) e de cal + areia.

Nome	Foto	Análise
<p>Traço 1 (TA 17,5% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Tombou antes da realização do ensaio - Muito argiloso - Baixa trabalhabilidade*

<p>Traço 2 (TA 12% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Aparecimento de fissura -Baixa trabalhabilidade*
<p>Traço 3 (TA 9% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Sem fissuras -Alta trabalhabilidade*
<p>Traço 4 (TA 6% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Sem fissuras -Muito arenoso -Baixa trabalhabilidade*
<p>Traço 5 (R 17,5% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Tombou antes do ensaio (restou apenas um pedaço no canto superior esquerdo) -Muito argiloso -Baixa trabalhabilidade*

<p>Traço 6 (R 12% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Aparecimento de fissura -Baixa trabalhabilidade* -Descolou do substrato em toda a sua metade superior, no entanto não tombou (Figura 4.3)
<p>Traço 7 (R 9% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Sem fissuras -Alta trabalhabilidade*
<p>Traço 8 (R 6% em peso de argila)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Sem fissuras -Muito arenoso -Baixa trabalhabilidade*
<p>Traço 9 (argamassa de cal e areia – material de referência)</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Sem fissuras -Alta trabalhabilidade*

* A trabalhabilidade pode ser corrigida com a utilização de um teor adequado de água na mistura.

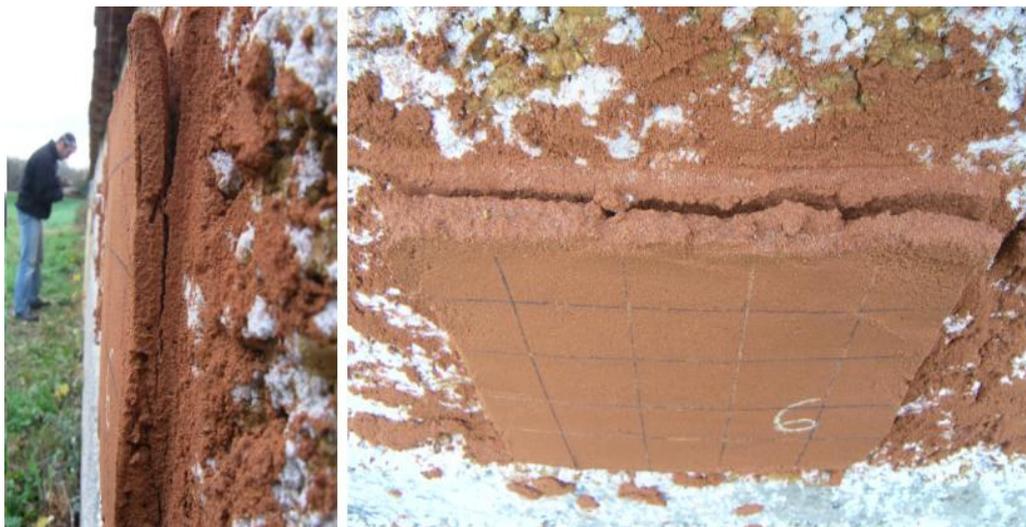


Figura 4.3: Traço 6 – Revestimento descolou do substrato em toda sua metade superior mas não tombou.

Observa-se que para um mesmo teor de argila, os comportamentos de Tassin e Rochechinard (sem fibras) foram semelhantes:

- Traços 1 e 5 (17,5% em peso de argila): tombaram do substrato antes do ensaio;
- Traços 2 e 6 (12% em peso de argila): aparecimento de fissuras;
- Traços 3 e 7 (9% em peso de argila): sem fissuras e alta trabalhabilidade;
- Traços 4 e 8 (6% em peso de argila): embora sem fissuras, o alto teor de areia fez com que a trabalhabilidade diminuísse.

Para TA 17,5% e 12% em peso de argila (Traços 1 e 2, respectivamente), as fissuras começaram a surgir antes da aplicação da 2ª camada de revestimento (Figuras 4.4). O traço 1 (TA 17,5%) não resistiu à aplicação da 2ª camada de revestimento e tombou.

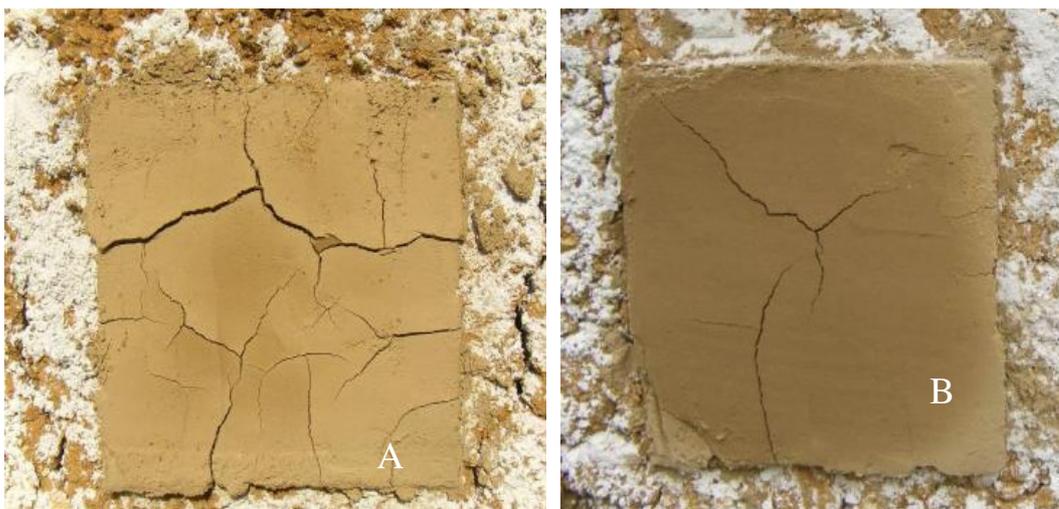


Figura 4.4: (A) TA 17,5% e (B) TA12% em peso de argila antes da aplicação da 2ª camada.

Verifica-se uma similaridade de comportamento entre caulinita (argilomineral presente em maior quantidade em Rochechinard) e ilita (argilomineral presente em maior quantidade em Tassin) para um mesmo teor de

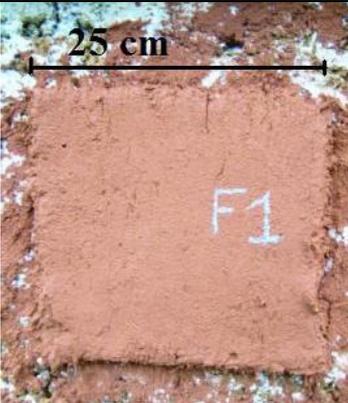
argila. Assim, para os revestimentos de Tassin e Rochechinard sem fibras, o teor de argila ótimo deve permanecer em torno de 9% (revestimentos não apresentam fissuras e possuem uma alta trabalhabilidade).

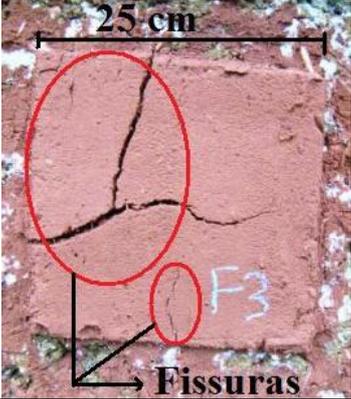
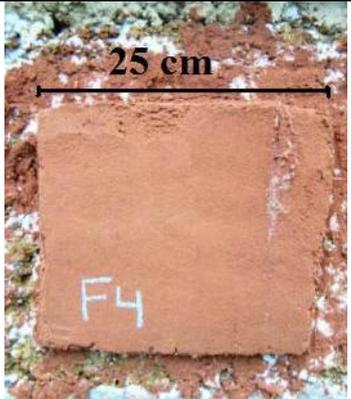
A Tabela 4.2 mostra os resultados da observação visual da retração para Rochechinard estabilizado com fibras.

Com a adição de sisal no traço de R 17,5% em peso de argila (Traço F1), não ocorreram fissuras e o revestimento não tombou. Para R 12% em peso de argila + sisal (Traço F2) o resultado foi ainda melhor porque além da fissura não aparecer, desta vez o revestimento não se deslocou do substrato. Comparando-se diretamente com os traços não estabilizados, conclui-se que a adição de fibras curtas de sisal foi benéfica.

Quanto ao cânhamo, os resultados mostram que a sua utilização quase não trouxe benefícios para os traços de R 17,5% e 12% em peso de argila (F3 e F4). Para o teor de argila em peso 17,5%, o revestimento estabilizado não tombou, mas ficou muito fissurado e chegou a se destacar do substrato. Para o traço F4 (teor de argila em peso de 12% mais cânhamo), não houve o aparecimento de fissuras, mas o revestimento continuou se descolando do substrato. Assim, para provocar a diminuição da retração, percebe-se que a utilização do cânhamo é inadequada em função da sua reduzida razão de aspecto, não permitindo grande eficiência quando empregada em compósitos com matriz de solo.

Tabela 4.2: Retração *in situ* dos revestimentos estabilizados com fibras.

Nome	Foto	Análise
<p>Traço F1 (R 17,5% em peso de argila + Sisal*)</p>		<p>-Sem fissuras -Descolou do substrato, no entanto não tombou (Figura 4.5 A)</p>
<p>Traço F2 (R 12% em peso de argila + Sisal*)</p>		<p>-Sem fissuras</p>

<p>Traço F3 (R 17,5% em peso de argila + cânhamo*)</p>		<p>-Muito fissurado -Descolou do substrato, no entanto não tombou (Figura 4.5 B)</p>
<p>Traço F4 (R 12% em peso de argila + cânhamo*)</p>		<p>-Sem fissuras -Descolou do substrato, no entanto não tombou (Figura 4.5 C)</p>

*As fibras foram misturadas com as mãos em uma porcentagem de 0,5% em peso de solo seco.



Figura 4.5: Revestimentos descolaram do substrato, mas não tombaram – A) Traço F1 (17,5% de argila); B) Traço F3 (9% de argila); C) Traço F4 (6% de argila).

4.3 Ensaio de cisalhamento

Todos os resultados da tensão ao cisalhamento dos corpos-de-prova, bem como sua umidade residual (teor de água no momento do ensaio) estão nos Apêndices 6 e 7. Como alguns traços tombaram do substrato não foi possível obter os seus respectivos corpos-de-prova ditos “cortados” de 5 cm x 4 cm x 2 cm.

Para o traço 9 (material de referência – cal + areia), todos os corpos-de-prova foram danificados durante o corte e, conseqüentemente, também não foram testados.

Deve-se ressaltar que a espessura dos corpos-de-prova é diretamente relacionada ao processo de fabricação, pois os corpos-de-prova em estado natural, devido à sua dificuldade de fabricação, são sempre menos espessos do que aqueles cortados. Assim, em uma primeira análise, buscou-se uma relação entre a resistência ao cisalhamento e a espessura dos corpos-de-prova para cada um dos métodos de fabricação (estado natural e cortado) separadamente (Figuras 4.6 e 4.7). Em seguida, foi realizada uma verificação desta mesma relação (resistência ao cisalhamento x espessura) sem considerar o modo de fabricação (cortado ou estado natural). Esta segunda análise pode ser observada nas Figuras 4.8 e 4.9.

Nas Figuras 4.6 e 4.7, percebe-se que os corpos-de-prova em estado natural apresentam maiores resistências ao cisalhamento em consequência da fragilização que ocorre no revestimento no momento do corte a partir da vibração causada do disco diamantado. O fato de os corpos-de-prova serem de pequena dimensão (5 cm x 4 cm x 2 cm) acentuou ainda mais esse processo de interferência mecânica.

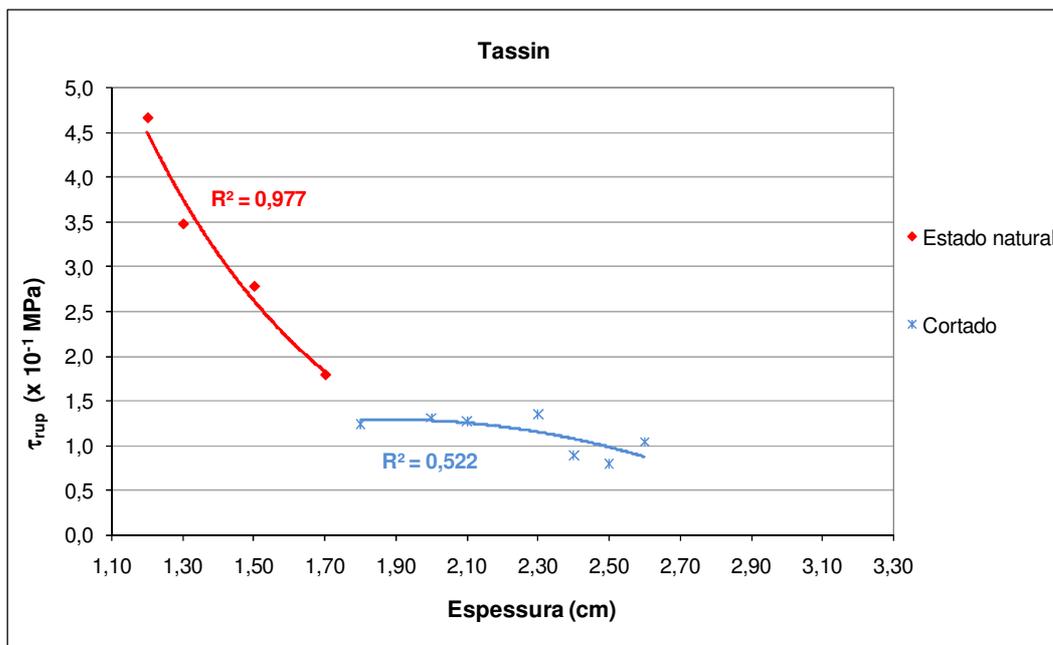


Figura 4.6: Resistência ao cisalhamento x Espessura – Tassin (separado por modo de fabricação).

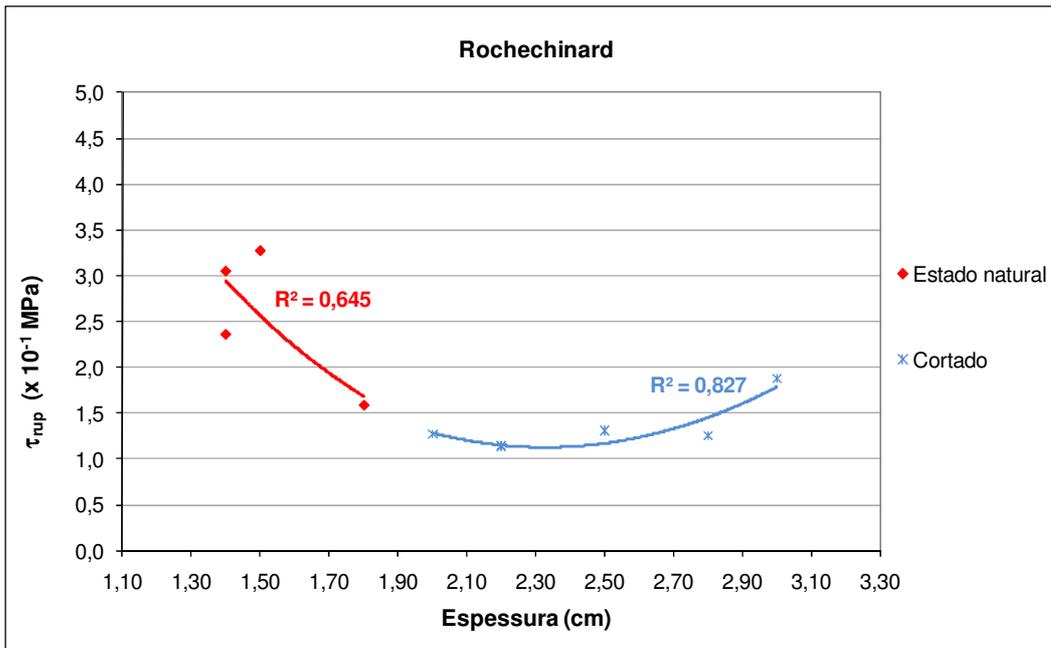


Figura 4.7: Resistência ao cisalhamento x Espessura – Rochechinard (separado por modo de fabricação).

Nos dois gráficos seguintes (Figuras 4.8 e 4.9), analisando-se somente a influência da espessura sem considerar o modo de fabricação, percebe-se que quanto menor a espessura, maior a resistência ao cisalhamento. No entanto, essa resistência tende a aumentar novamente para espessuras maiores do que 2,3 cm para Tassin e maiores do que 2,4 cm para Rochechinard.

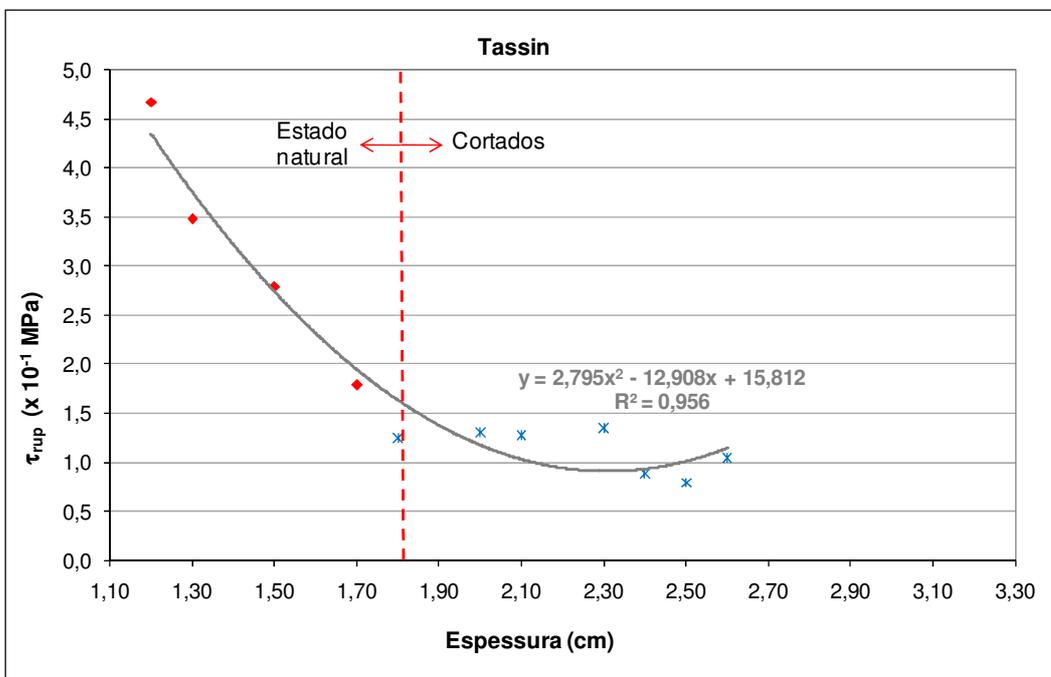


Figura 4.8: Resistência ao cisalhamento x Espessura – Tassin (sem separar por modo de fabricação).

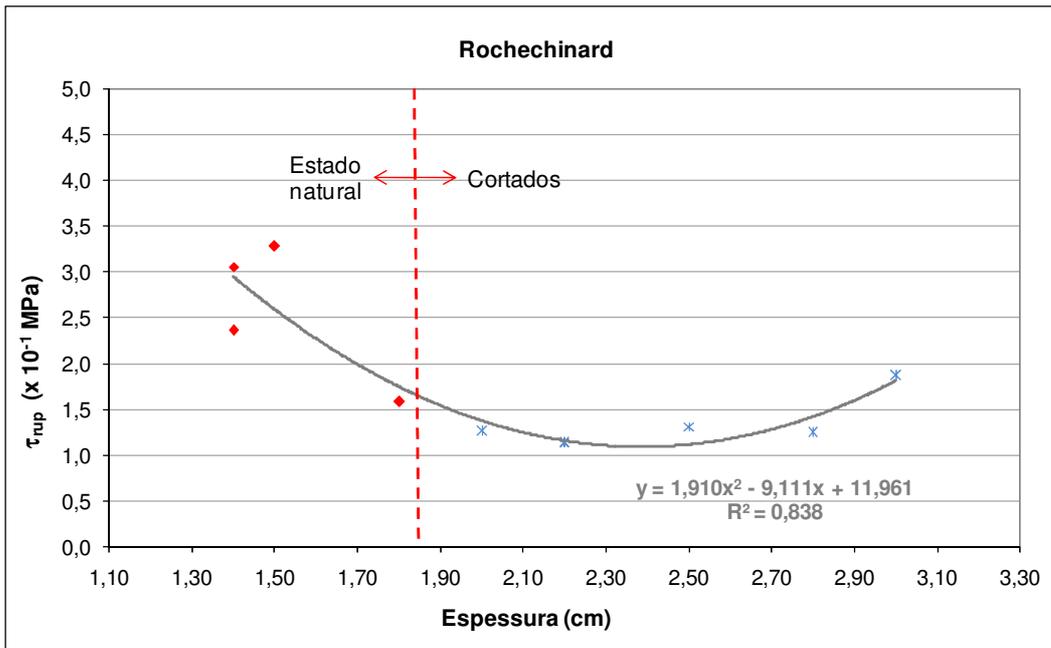


Figura 4.9: Resistência ao cisalhamento x Espessura – Rochechinard (sem separar por modo de fabricação).

Para uma mesma quantidade de argila, os corpos-de-prova em estado natural apresentam uma maior resistência ao cisalhamento, sendo a resistência máxima ao cisalhamento de Rochechinard (caulinita) em estado natural igual a 0,31 MPa e a resistência de Tassin (ilita) em estado natural igual a 0,42 MPa (Figuras 4.10 e 4.11). Todos os corpos-de-prova de terra ao romper levaram uma parte do substrato, no entanto o mesmo não ocorreu com a argamassa de cal e areia. Isso ocorre devido às diferentes equações constitutivas dos materiais em questão (terra e cal+areia). Pode-se dizer concluir que a aderência entre os revestimentos de terra e o substrato foi melhor do que a aderência entre a argamassa de cal e areia e o mesmo substrato. No entanto, os revestimentos de cal+areia apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento.

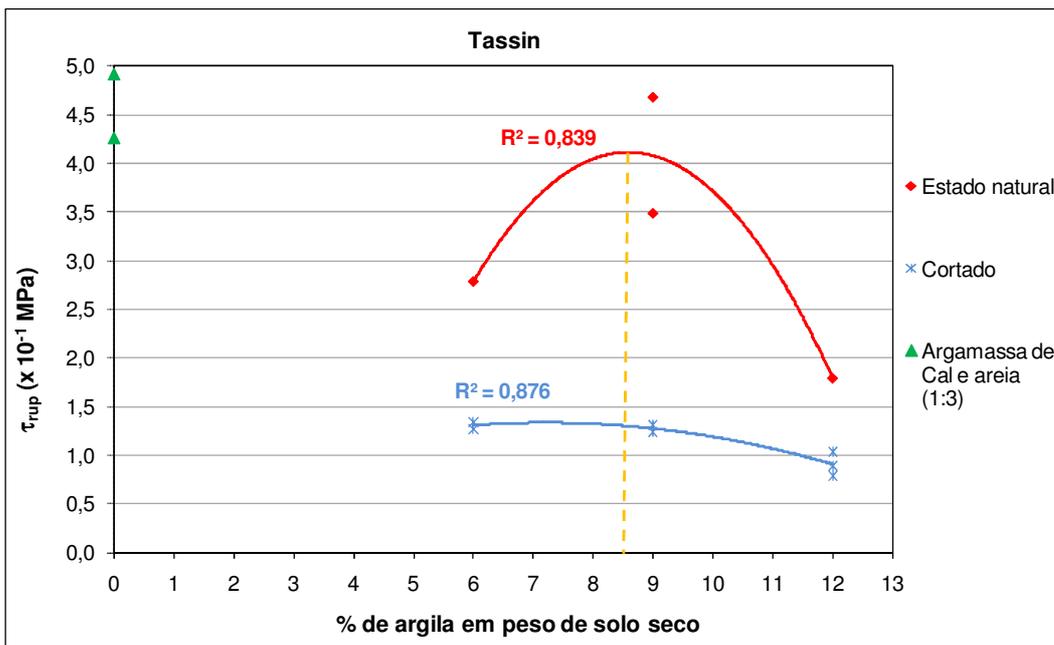


Figura 4.10: Resistência ao cisalhamento x teor de argila - Tassin e Cal + areia.

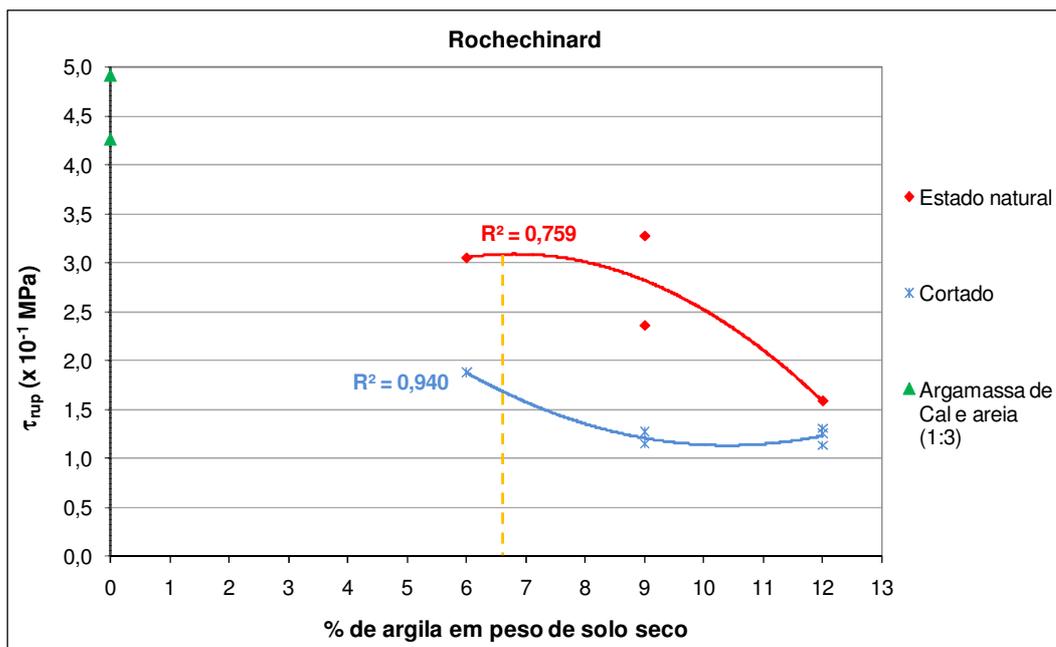
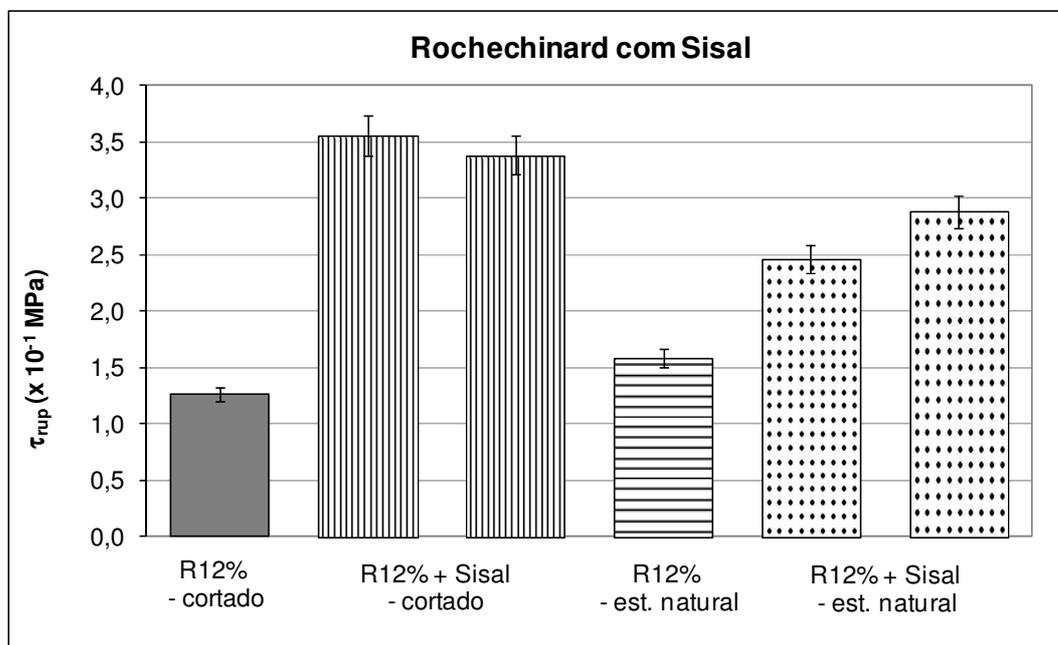


Figura 4.11: Resistência ao cisalhamento x teor de argila - Rochechinard e Cal + areia.

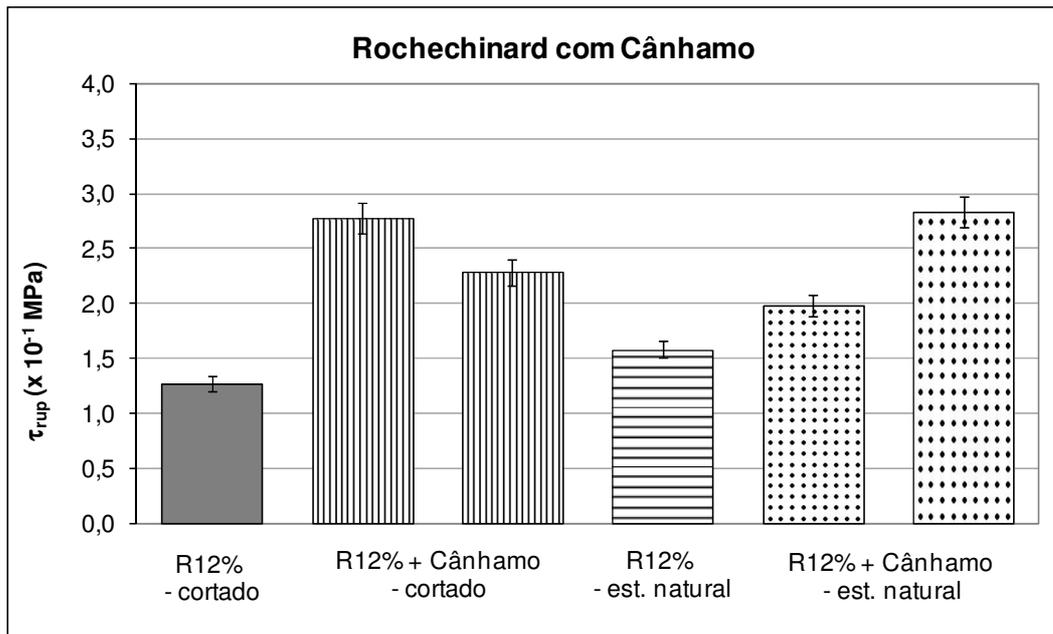
A Figura 4.12 apresenta o comportamento dos corpos-de-prova de Rochechinard com 12% de argila em peso seco de solo, cortados e em estado natural, estabilizados com fibras de sisal. Para os corpos-de-prova cortados, verifica-se um ganho de aproximadamente 0,23 MPa após a inserção de fibras; já para os corpos-de-prova em estado natural, o ganho é de aproximadamente 0,10 MPa.



*As fibras foram misturadas com as mãos em uma porcentagem de 0,5% em peso de solo seco.

Figura 4.12: Resistência ao cisalhamento de Rochechinard e Rochechinard estabilizado com fibras de sisal, cortados e em estado natural.

A Figura 4.13 mostra a influência da adição de fibras de cânhamo no comportamento de Rochechinard com 12% de argila em peso seco de solo. Para os corpos-de-prova cortados e em estado natural, a adição destas fibras fez aumentar a resistência ao cisalhamento em aproximadamente 0,10 MPa.



*As fibras foram misturadas com as mãos em uma porcentagem de 0,5% em peso de solo seco.

Figura 4.13: Resistência ao cisalhamento de Rochechinard e Rochechinard estabilizado com fibras de cânhamo, cortados e em estado natural.

A adição de fibras melhora a resistência ao cisalhamento, pois as fibras provocam um aumento da aderência ao suporte. Esse aumento de aderência é mais significativo com a adição de fibras de sisal, em função da sua razão de aspecto elevada.

É importante observar que o traço de Rochechinard com 17,5% em peso de argila sem fibras tombou do substrato, impedindo que sua resistência ao cisalhamento fosse testada e comparada aos corpos-de-prova com fibras. No entanto, a partir dos resultados anteriores, pode-se supor que os corpos-de-prova de Rochechinard com 17,5% em peso de argila estabilizados com fibras também apresentariam maiores resistências ao cisalhamento quando comparados aos corpos-de-prova não estabilizados.

4.4 Ensaio de flexão 3 pontos

Todos os resultados de resistência à flexão podem ser encontrados no Apêndice 8, bem como a umidade residual no Apêndice 9. Ao se relacionar a resistência à flexão e o teor de argila, verifica-se que elas são diretamente proporcionais, tanto para Tassin quanto para Rochechinard (Figura 4.14). Esse comportamento linear é muito diferente daquele encontrado na seção anterior para a resistência ao cisalhamento, demonstrando assim que essas duas grandezas são muito distintas para a terra quando aplicada em revestimentos.

Com este gráfico também verifica-se que para um teor de argila de 8% em peso de solo seco, por exemplo, Tassin apresenta uma resistência à flexão de aproximadamente 0,46 MPa e Rochechinard de aproximadamente 0,39 MPa. Dobrando-se o teor de argila (16% em peso de solo seco), a resistência à flexão de Tassin aumenta aproximadamente 70% (passando a quase 0,77 MPa) enquanto a resistência à flexão de Rochechinard cresce aproximadamente 80%, (chegando a

0,70 MPa). Isto significa que, em termos de flexão, quanto maior o teor de argila, melhor é o revestimento. A amostra de referência de cal + areia apresentou as menores resistências à flexão.

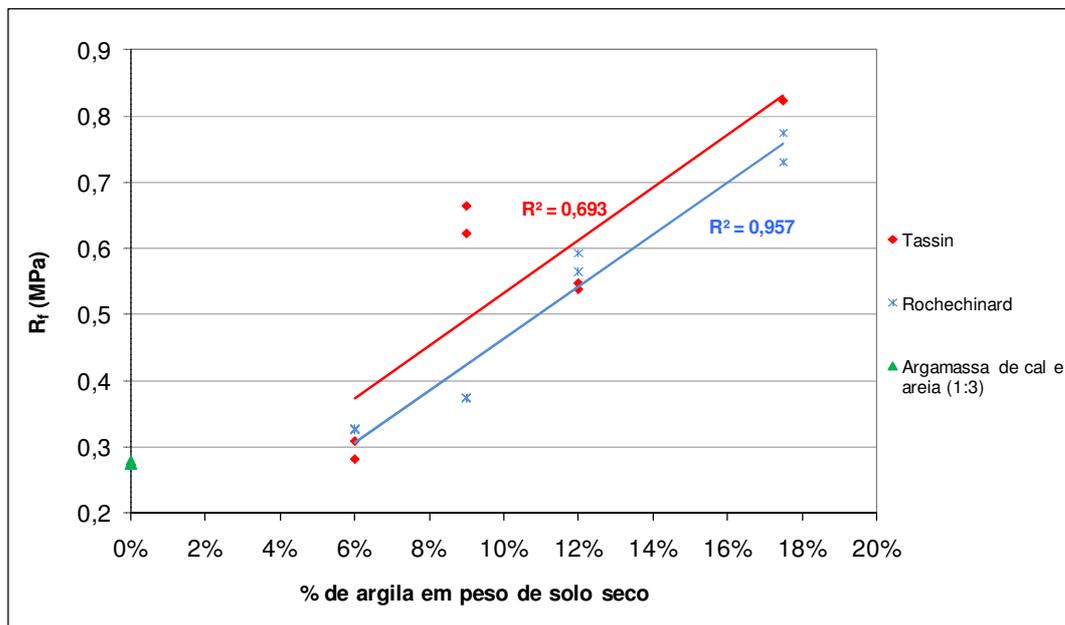


Figura 4.14: Resistência à flexão x teor de argila (sem adição de fibras).

Em uma analogia ao fator água/cimento (x) do concreto, neste trabalho denomina-se “w/clay” a relação entre o teor de água e o teor de argila, já que a argila exerce na terra a mesma função de ligante que o cimento desempenha no concreto. Na Figura 4.15, observa-se uma relação entre a resistência à flexão e o fator w/clay. Para fatores w/clay menores do que 2,8 aproximadamente, Tassin apresenta maiores resistências à flexão. Essa situação se inverte e Rochechinard passa a apresentar maiores resistências à flexão para fatores w/clay maiores do que 2,8.

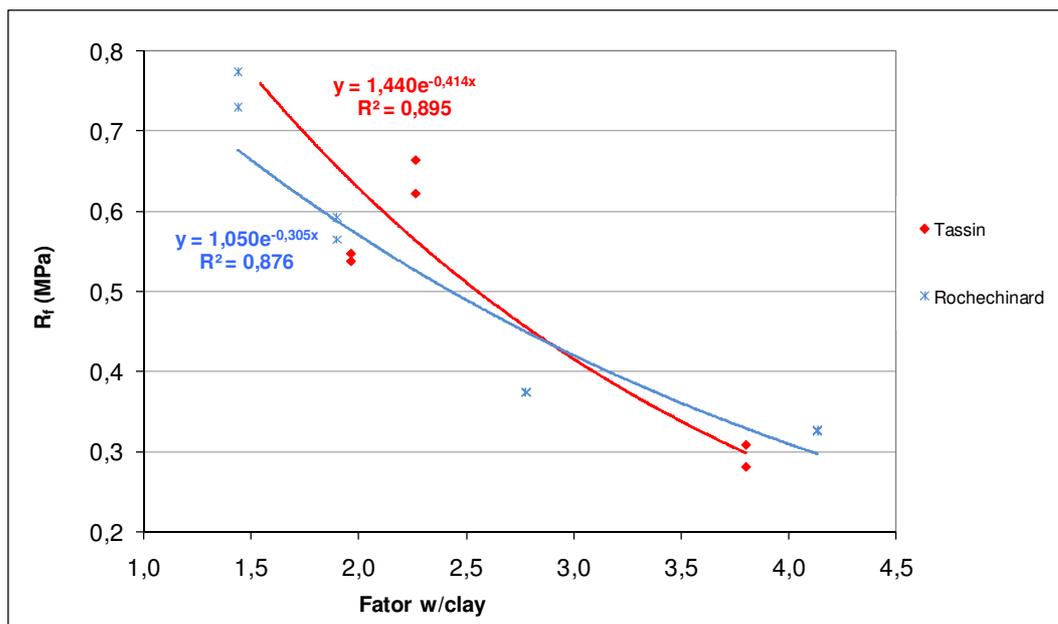


Figura 4.15: Resistência à flexão x fator w/clay (sem adição de fibras).

Nas Figuras 4.16 e 4.17, verifica-se o efeito da adição 0,5% em peso de solo seco de fibras curtas de sisal e de cânhamo, respectivamente, na resistência à flexão dos corpos-de-prova. Independentemente do tipo de fibra incluído, a resistência à flexão é maior para os corpos-de-prova estabilizados, mas o acréscimo de resistência é maior para a estabilização com sisal em função da elevada razão de aspecto desta fibra.

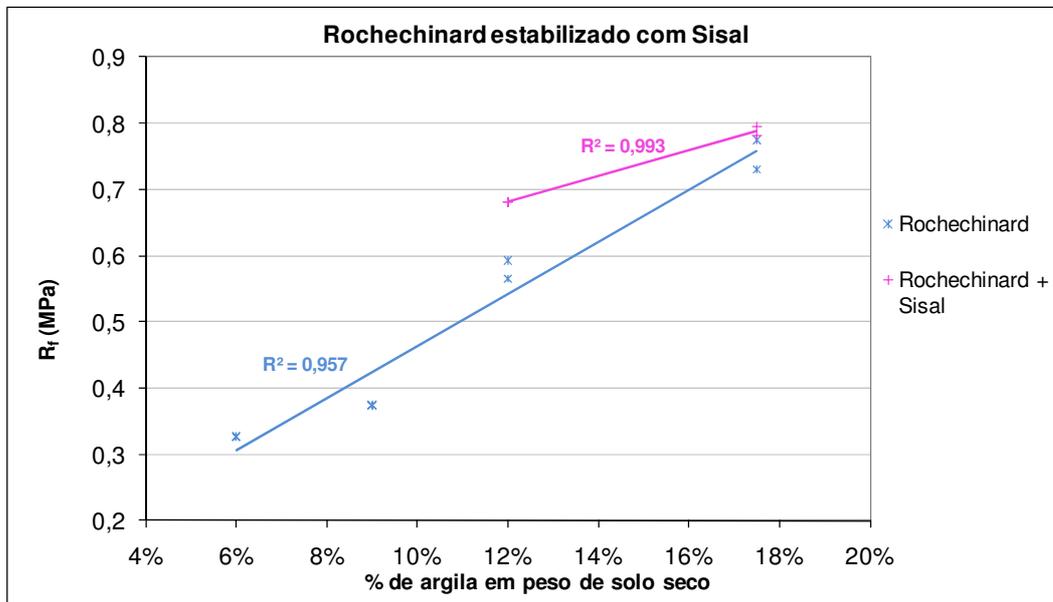


Figura 4.16: Resistência à flexão x teor de argila – sisal.

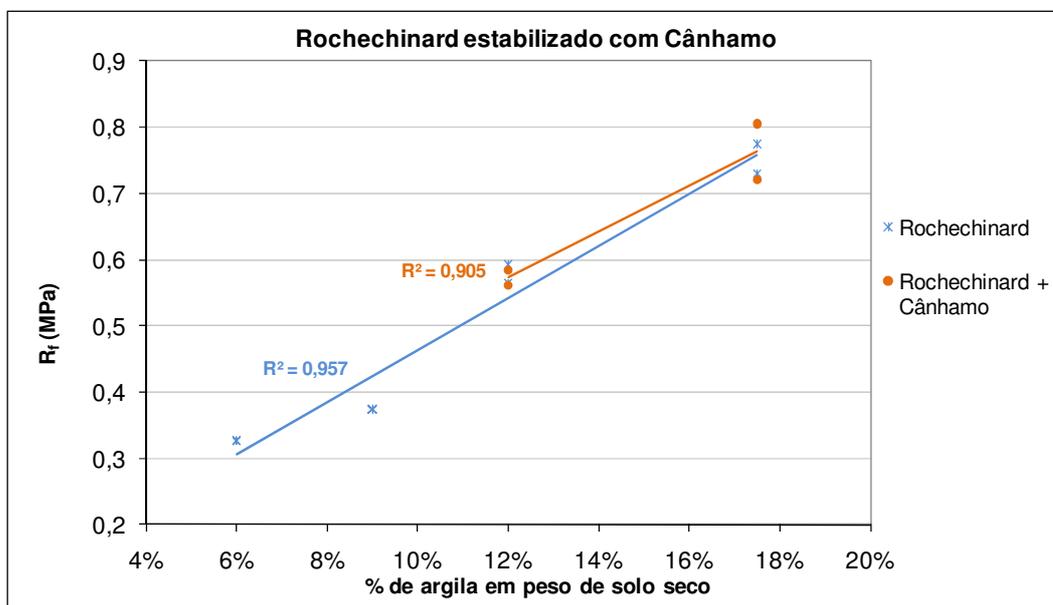


Figura 4.17: Resistência à flexão x teor de argila – cânhamo.

Apesar de a resistência à flexão aumentar para as duas fibras, o sisal retarda mais a ruptura por flexão do que o cânhamo em função da sua razão de aspecto elevada, tornando o material mais dúctil. Na Figura 4.18, vê-se em detalhe como as fibras de sisal evitam uma ruptura brusca do corpo-de-prova. No momento da foto, a matriz de solo praticamente já rompeu inteiramente e o corpo-de-prova se mantém unido unicamente em função das fibras de sisal.

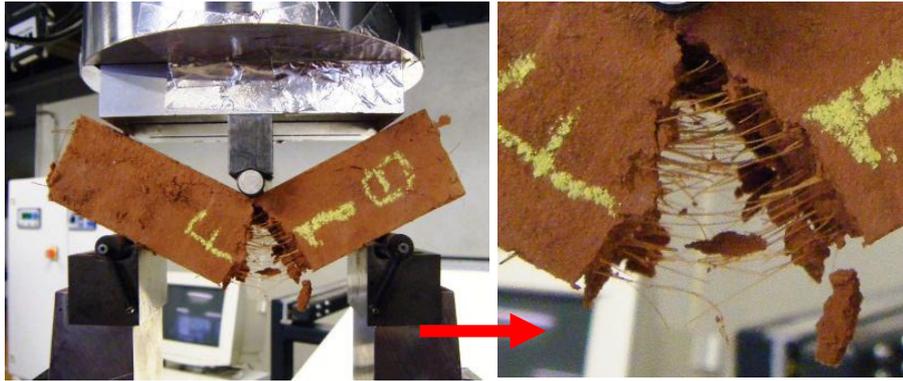


Figura 4.18: Ruptura de R 17,5% em peso de argila + sisal (Traço F1).

4.5 Retração linear

Todos os valores de retração linear obtidos para cada corpo-de-prova encontram-se no Apêndice 10.

A Figura 4.19 apresenta a relação diretamente proporcional entre a retração linear e a porcentagem de argila dos corpos-de-prova. Comparando-se os solos de Tassin e Rochechinard verifica-se que, para um mesmo teor de argila, Rochechinard (rico em caulinita) retrai mais do que Tassin (rico em ilita), mantendo-se essa diferença praticamente constante para todos os teores de argila. Para um teor de argila de 8% em peso de solo seco, Tassin apresenta uma retração linear de 1,1% e Rochechinard de 1,8%, aproximadamente; dobrando-se o teor de argila, ou seja, com 16% de argila em peso seco de solo, Tassin retrai 4,4% e Rochechinard 5,4%, aproximadamente.

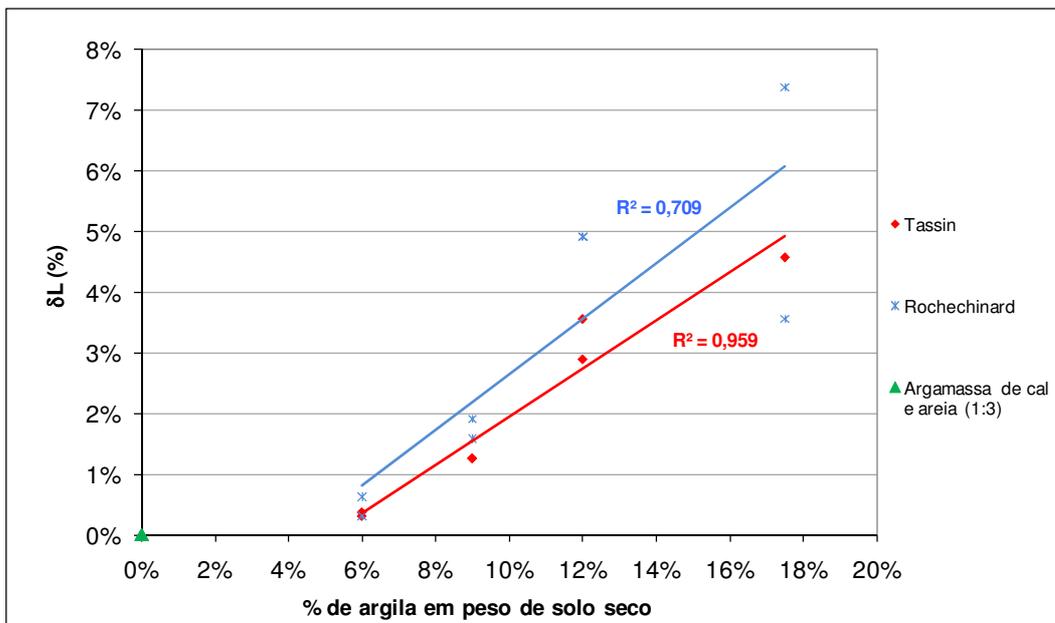


Figura 4.19: Retração linear e teor de argila – Tassin, Rochechinard e Cal + areia.

É importante que a atividade ao azul do metileno também interfere na retração linear. Embora Tassin seja composta principalmente por ilita, que retrai mais do que a caulinita do solo de Rochechinard, Tassin apresenta uma atividade

ao azul de metileno menor (1,4 contra 2,5 de Rochechinard), fazendo com que a sua retração linear seja mais baixa do que a retração linear de Rochechinard. Não foi observada retração linear nos corpos-de-prova de cal e areia.

Conforme a Figura 4.20, observa-se também que quanto maior o fator w/clay, menor é a retração linear, lembrando que as medidas foram realizadas para teores de água e teores de argila variáveis.

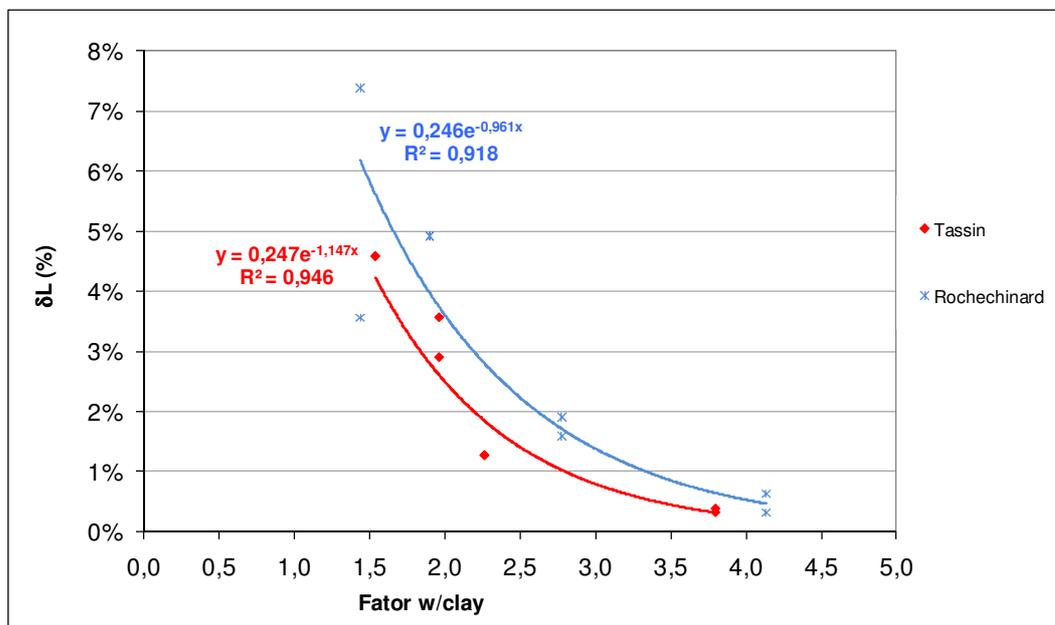
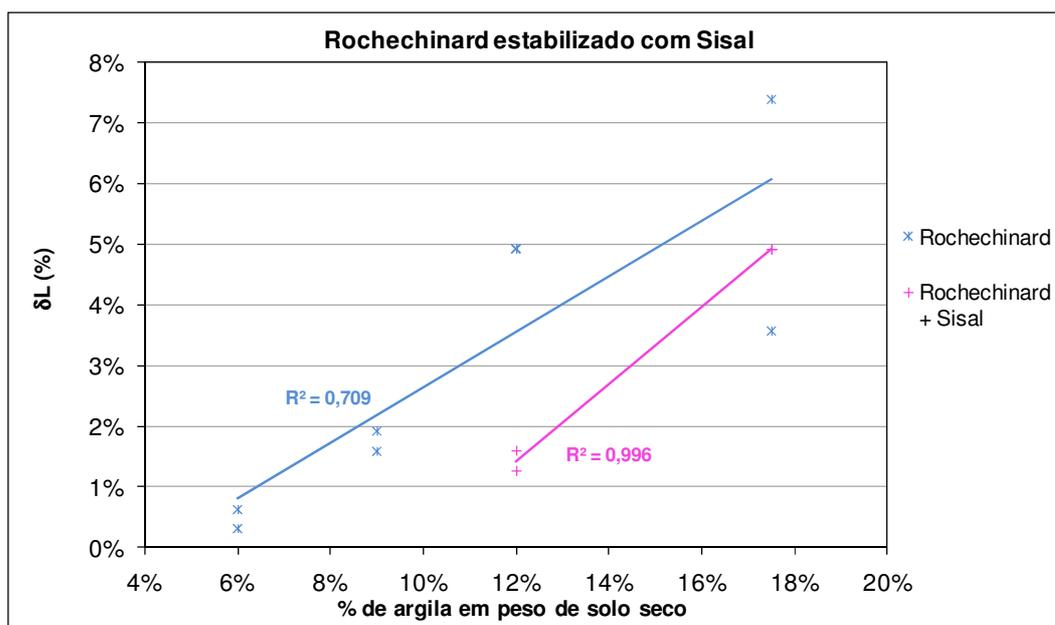


Figura 4.20: Retração linear x fator w/clay (sem fibras).

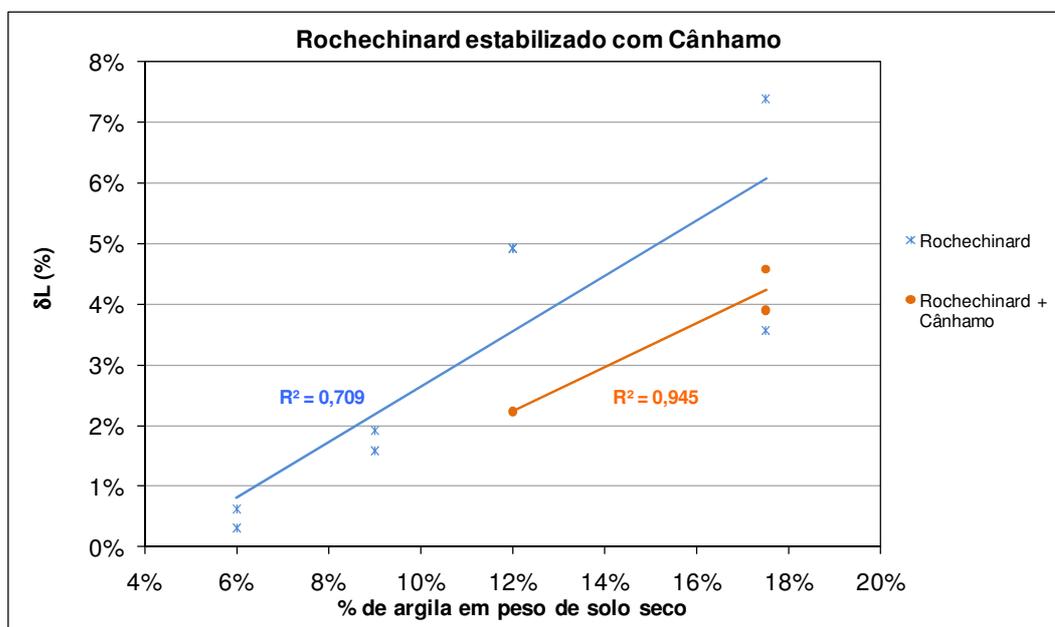
A Figura 4.21 apresenta os resultados obtidos para a inserção de fibras de sisal. Para um mesmo teor de argila, ocorre uma redução na retração linear: para 14% de argila em peso seco de solo, os corpos-de-prova não estabilizados apresentaram aproximadamente 4,6% de retração linear; para aqueles estabilizados com fibras de sisal, essa retração linear diminuiu para 2,8%.



*As fibras foram misturadas com as mãos em uma porcentagem de 0,5% em peso de solo seco.

Figura 4.21: Retração linear x teor de argila – sisal.

A Figura 4.22 mostra os efeitos da inclusão de fibras de cânhamo. Neste caso também há uma redução na retração linear para um mesmo teor de argila. Tomando-se como exemplo um teor de argila de 16% de argila em peso seco de solo, percebe-se uma retração linear de 5,5% para os corpos-de-prova não estabilizados e uma retração linear de 3,8% para aqueles estabilizados com fibras de cânhamo.



*As fibras foram misturadas com as mãos em uma porcentagem de 0,5% em peso de solo seco.

Figura 4.22: Retração linear x teor de argila – cânhamo.

A adição de fibras, seja de sisal ou de cânhamo, reduz a retração linear pois as fibras vegetais controlam a secagem do compósito de solo-fibra, evitando assim retração linear excessiva.

4.6 Traços de terra

Para o concreto, traço é a relação entre a quantidade de cimento e as quantidades de agregados (usualmente areia e brita). Pode ser dado em peso ou em volume. O traço unitário em peso é dado na forma abaixo:

$$1 : a : b \quad (4.1)$$

Onde:

a – peso do agregado miúdo por peso de cimento

b – peso do agregado graúdo por peso de cimento

Adaptando-se esta teoria para a terra, a argila age como ligante da mesma forma que o cimento no concreto, e a areia e o silte funcionam como os agregados. Assim, é possível propor a expressão a seguir para os traços unitários em peso da terra:

$$1 : s : a \quad (4.2)$$

Onde:

s – peso da silte por peso de argila

a – peso do areia por peso de argila

Seguindo tal procedimento, os revestimentos utilizados no presente trabalho podem ser descritos como na Tabela 4.3 a seguir:

Tabela 4.3: Proposta de traço para revestimento de terra – Tassin e Rochechinard.

Tassin				
Nome do traço	s	a	Traço	w/clay
TA 17,5%	2,43	2,29	1 : 2,43 : 2,29	1,5
TA 12%	2,43	4,90	1 : 2,43 : 4,90	2,9
TA 9%	2,43	7,68	1 : 2,43 : 7,68	4,4
TA 6%	2,42	13,25	1 : 2,42 : 13,25	11,1

Rochechinard				
Nome do traço	s	a	Traço	w/clay
R 17,5%	1,94	2,77	1 : 1,94 : 2,77	2,1
R 12%	1,94	5,40	1 : 1,94 : 5,40	4,0
R 9%	1,94	8,18	1 : 1,94 : 8,18	7,9
R 6%	1,95	13,72	1 : 1,95 : 13,72	17,5

Encontram-se em destaque na tabela anterior, os traços de Tassin e Rochechinard com 9% de argila em peso de solo seco uma vez que, para os ensaios realizados neste trabalho, esta foi a porcentagem verificada como ideal de argila para a fabricação de revestimentos de terra.