

4. Resultados e discussão

4.1. Características físicas, químicas e mineralógicas dos solos

4.1.1. Análise física do solo

A tabela 7 apresenta as propriedades físicas dos solos estudados, onde: LL – Limite de Liquidez; LP – Limite de Plasticidade; IP – Índice de Plasticidade e; G_s – densidade dos grãos. Na figura 28 é ilustrada sua distribuição granulométrica.

Tabela 7. Características físicas dos solos estudados, em %.

	Areia	Silte	Argila	LL	LP	IP	G_s
Solo 1	38,81	11,14	50,05	75,80	40,86	34,94	2,68
Solo 2	77,95	5,45	16,60	34,48	19,77	14,71	2,70

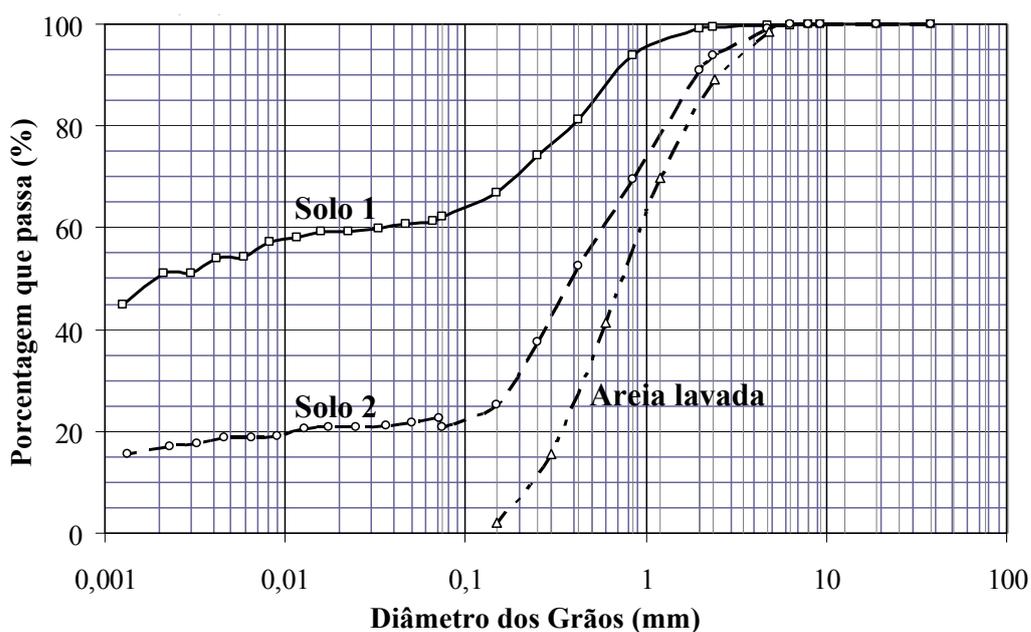


Figura 28. Distribuição granulométrica dos solos estudados.

Com base nas propriedades físicas é possível classificar o solo, conforme já antecipado, um solo tem característica argilosa e o outro arenosa. Classificar um solo é incluí-lo em um determinado grupo composto por solos de características e propriedades geotécnicas similares (LAMBE e WHITMAN, 1969). O sistema utilizado para classificação do solo foi o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS).

4.1.1.1. Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS)

Este sistema, primeiramente considera a porcentagem de finos (passante na peneira #200) presentes no solo. Se esta porcentagem for inferior a 50%, o solo será considerado como solo de granulação grosseira, G ou S. Se for superior a 50%, o solo será considerado de granulação fina, M, C ou O (PINTO, 2006, p.53). Em resumo, o esquema de classificação é apresentado na tabela 8. O solo 1 foi classificado como uma argila inorgânica de média e alta plasticidade (OH) e o solo 2 como uma areia argilosa, misturas bem graduadas de areia e argila (SC).

Tabela 8. Esquema para classificação pelo Sistema Unificado.

% P #200 < 50	G > S:G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
	% P #200 > 12	GC		
		GM		
		5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
% P #200 > 50	S > G:S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3	
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
	% P #200 > 12	SC		
		SM		
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

4.1.2. Análise química do solo argiloso (solo 1)

As partículas do solo apresentam cargas elétricas negativas e/ou positivas, sendo que as diferenças entre estas cargas induzem à retenção de cátions ou ânions (PESSÔA, 2006). Este fenômeno é chamado troca ou adsorção iônica, podendo ser catiônica (CTC) (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , etc) ou aniônica (CTA) (NO_3^- , PO_4^{4-} , HPO_4^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , etc). O complexo sortivo indica quais são os cátions trocáveis presentes na amostra de solo. Os resultados, apresentados na tabela 9, demonstram que o valor de troca catiônica ($T = 4,9 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), qualifica a argila presente como sendo do tipo caolinita. Segundo Mitchell (1993, apud PESSÔA, 2006), a capacidade de troca catiônica para este tipo de argilomineral varia em cmol_c/kg de 3 a 15.

Tabela 9. Análise química (pH, complexo sortivo) do solo argiloso.

pH (1:2,5)		Complexo sortivo cmol_c/kg							Valor V %	$\frac{100 \cdot \text{Al}^{3+}}{\text{S}^+ \text{Al}^{3+}}$ %
água	KCl (1N)	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Valor S (soma)	Al^{3+}	H^+	Valor T (soma)		
4,8	4,0	0,8	0,02	0,02	0,8	0,7	3,4	4,9	16	47

cmol_c/kg (centimol de cátion/kg da amostra)

O ensaio de Ataque Sulfúrico (H_2SO_4) fornece o valor do índice ki, que é a relação entre as quantidades de sílica (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3) presente no solo, e serve para indicar o grau de intemperização do mesmo. Valores elevados de ki indicam menor grau de intemperização. Baixos valores indicam um maior grau (PESSÔA, 2006). O solo analisado apresenta um valor de ki igual a 1,02 (tabela 10), coerente com os solos caoliníticos que apresentam normalmente o valor de 2,0 para esta relação.

Tabela 10. Análise química (ataque sulfúrico) do solo argiloso.

Ataque por H_2SO_4 (1:1) - NaOH (0,8%) g/kg				$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (ki)	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$ (kr)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2			
138	229	72	8,3	1,02	0,85	4,99

4.1.3. Análise mineralógica do solo

As análises de difração de Raio-X são ilustradas nas figuras 29 e 30. O exame mineralógico identificou a argila predominante, nos dois tipos de solo, como sendo do tipo caolinita. A argila do tipo caolinita é pouco expansiva, em detrimento de sua estrutura química, assim, é mais desejável na produção de elementos e/ou tijolos de terra (REDDY e GUPTA, 2005). Barbosa et al (1997) mencionam que a argila caolinita e ilita são mais indicadas em contraposição ao uso da argila do tipo montmorilonita, em virtude da mesma ser muito expansiva, ocasionando aumento indesejável de volume em presença de água.

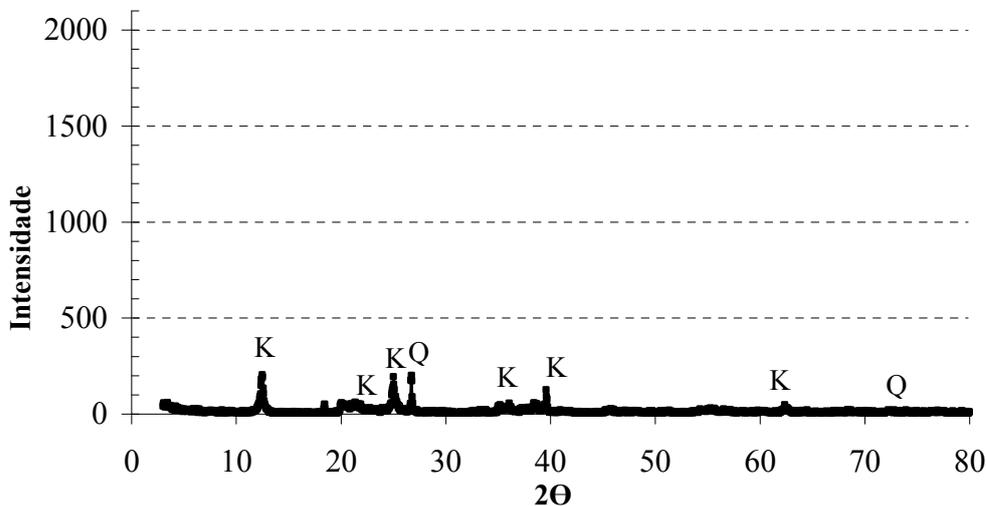


Figura 29. Difratograma do solo (S). • Q- Quartzo (SiO_2) – 32,8%; • K- Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 67,2%.

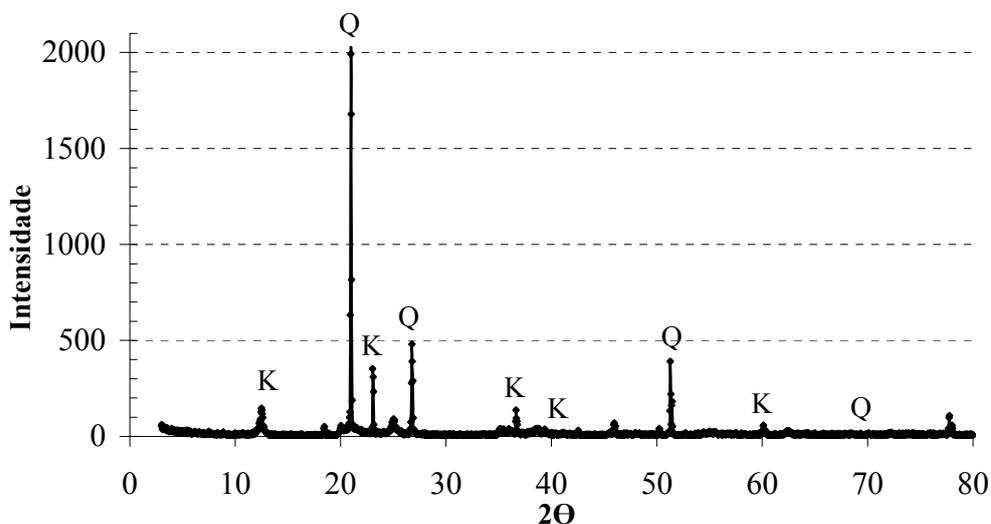


Figura 30. Difratograma do solo (SC). • Q- Quartzo (SiO_2) – 54,0%; • K- Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) – 46,0%.

A caolinita – $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ – é o argilomineral mais freqüentemente encontrado na natureza. Este argilomineral é formado pelo empilhamento regular de camadas 1:1, um plano de tetraedros $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ e outro de octaedros $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$, ligadas entre si através de pontes comuns de íons O^{2-} e íons OH^- (figura 31), formando uma estrutura fortemente polar que se mantém estável na presença de água.

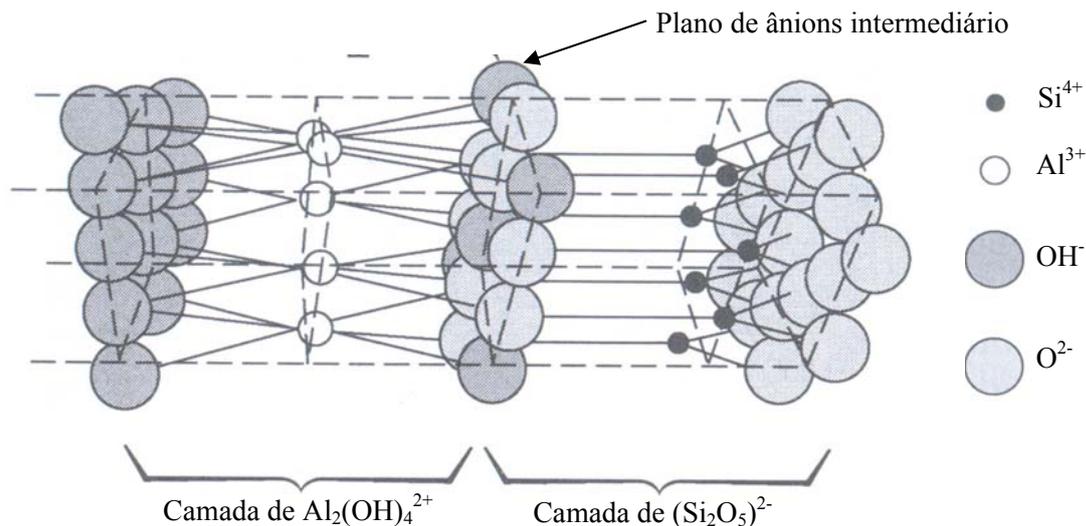


Figura 31. Estrutura atômica da argila caolinita (CALLISTER, 2006, p.37).

4.2.

Características físicas das fibras vegetais

4.2.1.

Geometria e Peso específico

Na tabela 11 são apresentados os resultados do diâmetro, do teor de umidade natural e massa específica das fibras. As fibras de sisal estudadas possuem duas vezes o diâmetro das fibras de curauá e, observando os coeficientes de variação (CV), presume-se que as fibras de curauá apresentam uma maior inconstância ao longo de seu comprimento em comparação as fibras de sisal, podendo gerar uma zona interfacial descontínua e frágil. Quanto ao peso específico, as fibras de curauá apresentam índices maiores (12%), comparados com as fibras de sisal.

Tabela 11. Características físicas das fibras vegetais estudadas.*

Tipo de fibra	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Peso específico (kN/m ³)
Curauá	0,115 (50,89)	13,60 (2,55)	12,91 (2,15)
Sisal	0,228 (31,37)	16,79 (3,03)	11,34 (0,47)

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

Os dados obtidos foram comparados aos encontrados na literatura pesquisada (Tabela 12). O diâmetro das fibras de curauá se intercala aos obtidos por Picanço (2005), porém com um coeficiente de variação superior (50,89%). O autor aferiu o diâmetro através de um projetor de perfil e paquímetro, concluindo que a medição pelo projetor de perfil foi mais adequada, pelo baixo coeficiente de variação, em comparação ao paquímetro. Quanto à massa específica das fibras, observa-se uma proximidade entre resultados, com coeficientes de variação pouco divergentes entre si. Cabe lembrar que as fibras de curauá, embora pertençam a um mesmo lote (extraídas de uma mesma plantação e beneficiadas igualmente), as fibras permaneceram por 3 (três) anos acondicionadas em sacos plásticos, em ambiente de umidade e temperatura não controlada, sujeita a ataque de fungos e insetos, o que pode justificar a perda de massa específica (4%), entre um trabalho e outro.

Tabela 12. Características físicas e mecânicas das fibras de curauá e sisal.*

Tipo de fibra	Diâmetro (mm)	Teor de umidade (%)	Massa específica (kN/m ³)	Resistência a Tração (MPa)	
Curauá	Este trabalho	0,115 (50,89)	13,60 (2,55)	12,91 (2,15)	--
	Picanço, 2005	0,127 (29,25)	11,47 (32,0)	13,47 (2,93)	195 - 832,5
		0,092 (42,35)	--	--	--
Sisal	Este trabalho	0,228 (31,37)	16,79 (3,03)	11,34 (0,47)	--
	Ghavami et al, 1999	0,15 (--)	13,30 (--)	9,30 (--)	580
	Toledo Filho, 1997	0,12 (23,8)	13,30 (8,80)	9,00 (8,90)	577,5 (42,66)
	Prabakar e Sridharb, 2002	0,25(--)	--	9,62 (--)	286
	Agopyan e Savastano, 2003	--	--	13,70 (--)	347 - 378
	Swamy, 1975 ^a	0,01-0,05	--	15,00 (--)	800
	CEPED, 1982 ^a	0,019	--	12,70 (--)	458,4
	Chand et al, 1988 ^a	0,05-0,30	--	14,50 (--)	530 - 640
	Bentur e Mindess, 1990 ^a	0,01-0,05	--	15,00 (--)	800

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

^a Sales (2006).

Para as fibras de sisal, observam-se diferenças significativas. A dispersão entre os dados pode ser decorrente do solo, do clima, do processo de extração das fibras, do tratamento, estocagem e outros (LI et al, 2000). Na figura 32 é ilustrada a variabilidade entre os resultados deste trabalho e os disponíveis. Savastano e Agopyan (1998, apud SALES, 2006) indicam a ocorrência de coeficientes de variação superiores a 50%, para determinadas características físicas de alguns tipos de fibras.

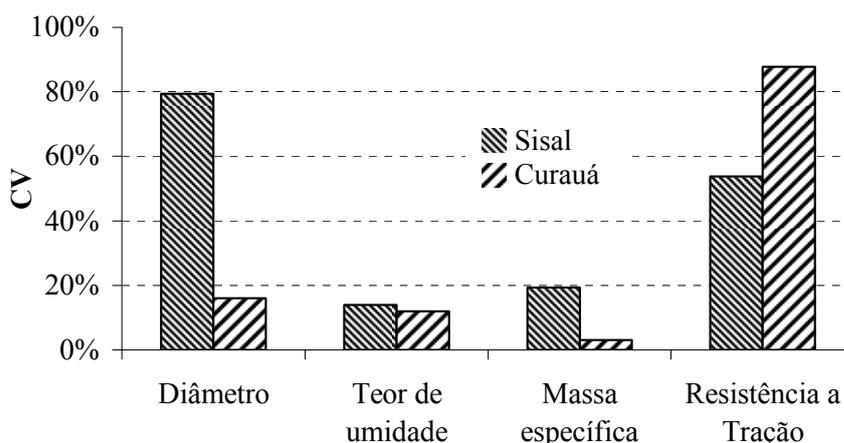


Figura 32. Variabilidade dos dados físicos e mecânicos (fibras de curauá e sisal).

4.2.2. Índice de absorção d'água das fibras vegetais

A figura 33 ilustra os resultados dos ensaios de absorção das fibras de curauá pela metodologia desenvolvida e pelo procedimento experimental de Toledo Filho (1997). Em uma primeira análise, conforme havia sido conjecturado, o papel absorvente removeu parte da água absorvida pela fibra. A busca por ensaios de absorção mais precisos é justificável pela forte influência, da higroscopicidade das fibras, sobre a zona interfacial com a matriz. O método desenvolvido demonstra ser confiável em razão do comportamento observado, índices crescentes de absorção nos primeiros minutos seguida por estabilização nas horas subseqüentes. Porém, uma análise dos parâmetros variáveis, com um maior número de ensaios e com uma variedade mais abrangente de espécimes vegetais, deve ser realizada.

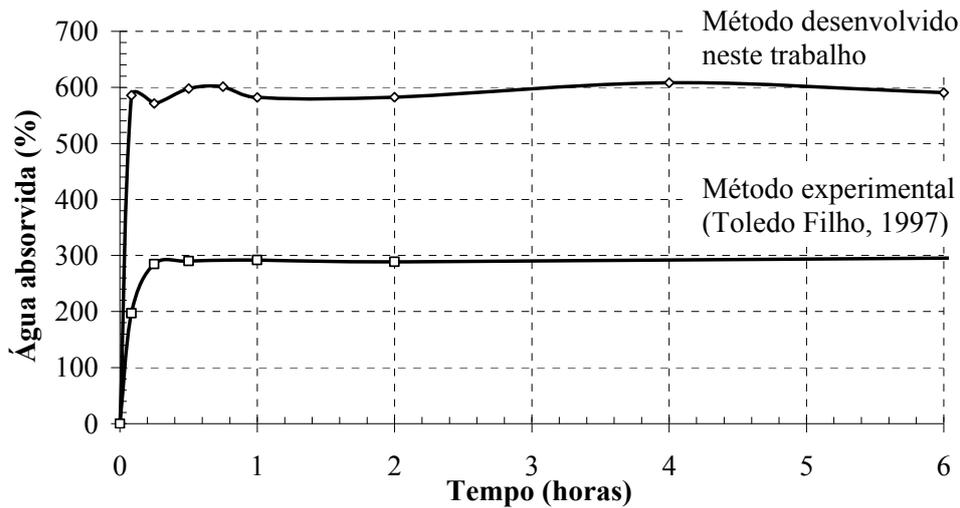


Figura 33. Comparação entre ensaios de absorção d'água (fibras de curauá).

A figura 34 apresenta a comparação entre os índices de absorção obtidos (método desenvolvido) para as fibras de sisal com as encontradas no trabalho de Savastano e Agopyan (1999). A diferença entre dados é significativa, mesmo considerando que as fibras de sisal possuem origem, beneficiamento e armazenamento distintos. Comparando-se os tipos de fibras estudadas, observa-se que as fibras de curauá são mais higroscópicas que as de sisal.

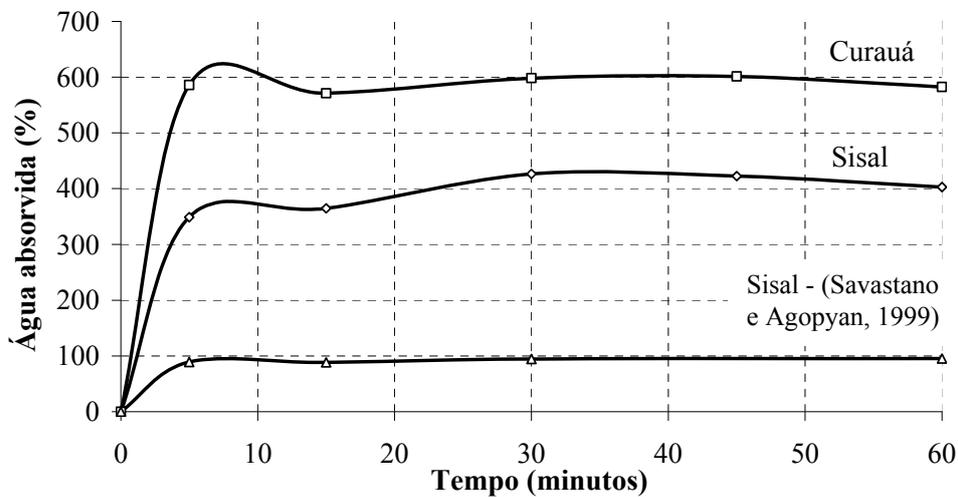


Figura 34. Ensaios de absorção d'água (sisal e curauá).

Os ensaios indicam que, independentemente do tipo de método utilizado, há um significativo acréscimo de absorção nos primeiros 10 minutos (Figura 34), permanecendo praticamente estável nos minutos seguintes. Em geral, mais de 50% da capacidade higroscópica age nos primeiros 15 minutos de contato com a água (PIMENTEL e SAVASTANO, 1999; SAVASTANO e AGOPYAN, 1999;

TOLEDO FILHO, 1997; TOLEDO FILHO et al, 1999). Na tabela 13 são apresentadas a quantidade de água absorvida do total seco e do total saturado.

Tabela 13. Quantidade de água absorvida do total seco e saturado, em %.

		minutos					dias		
		5	30	45	60	360	2	4	10
Curauá	do total seco	585,7	598,0	601,2	582,1	590,5	628,4	649,6	709,3
	do total saturado	82,6	84,3	84,8	82,1	83,3	88,6	91,6	
Sisal	do total seco	348,9	426,3	422,6	402,7	421,5	401,1	482,2	515,7
	do total saturado	67,7	82,7	82,0	78,1	81,7	77,8	93,5	

De acordo com a tabela 13, observa-se que as fibras de curauá atingiram 82,6% de sua capacidade absorviva nos primeiros 5 minutos, estabilizando-se ao final do primeiro dia (24 horas). As fibras de sisal atingem 67,7% da saturação, nos 5 minutos iniciais, permanecendo estável ao final do 4º dia (96 horas). Na figura 35, pode se observar o comportamento das fibras utilizadas neste trabalho e as utilizadas por Toledo Filho (1997).

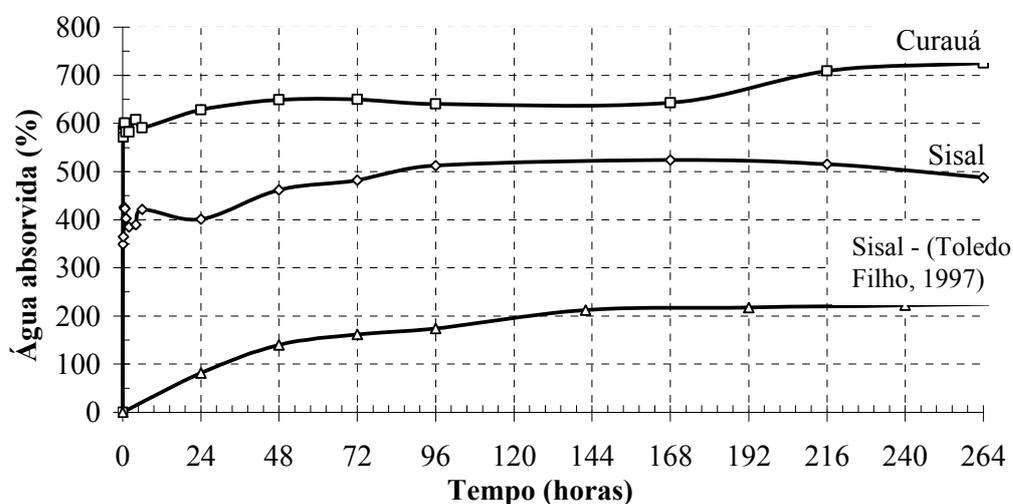


Figura 35. Ensaio de absorção d'água (sisal e curauá).

4.3. Preparação e ensaio dos compósitos

4.3.1. Umidade ótima e Massa específica aparente seca máxima

As figuras 36 e 37 ilustram as curvas obtidas pelo método de compactação quase estática desenvolvida e pelo ensaio de Proctor. Solos bem graduados (S), geralmente apresentam curvas de compactação com um máximo acentuado, ao contrário dos solos de graduação uniforme (C), que se caracterizam por curvas achatadas. Quanto à credibilidade do método desenvolvido, observa-se que a variação da energia de carregamento alterou a densidade seca máxima concomitantemente com a umidade ótima, seguindo os preceitos estabelecidos pela literatura.

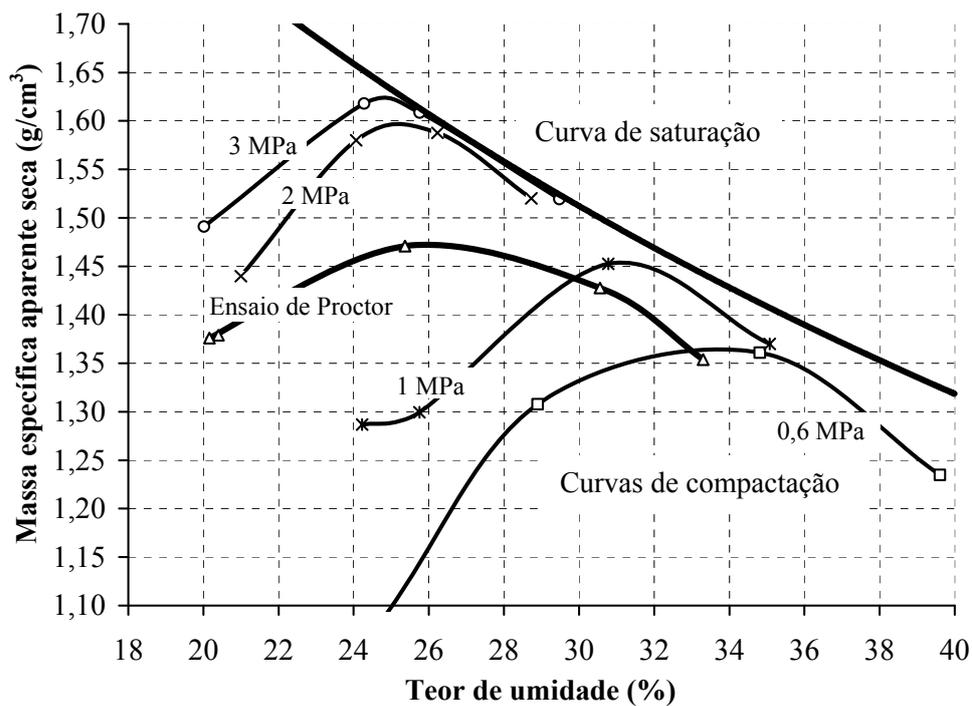


Figura 36. Curvas de compactação do solo argiloso (C).

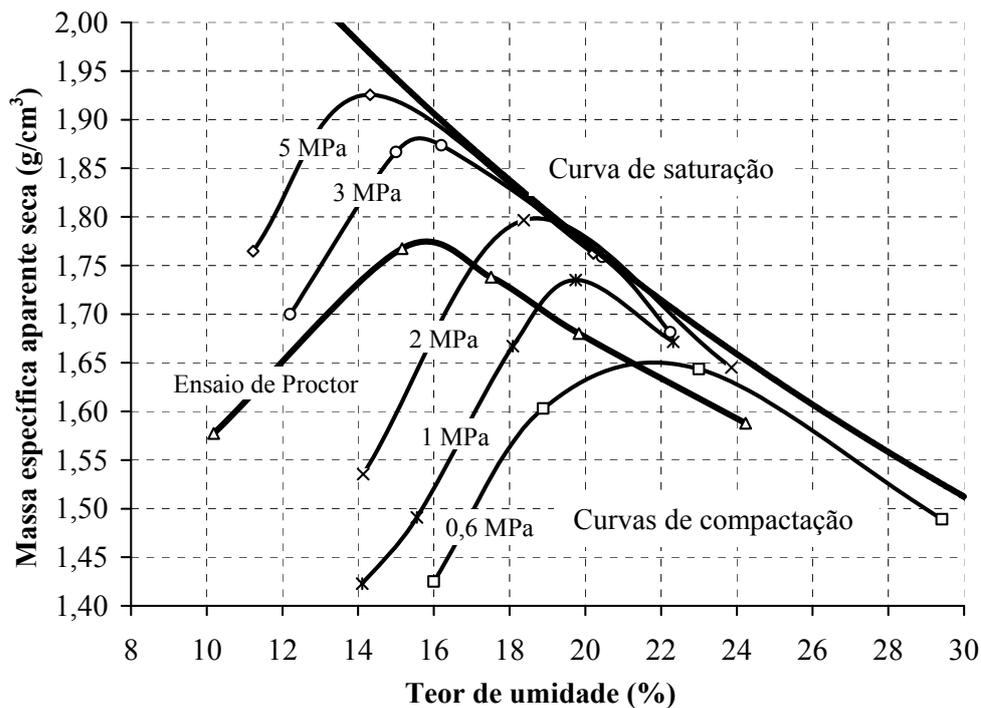


Figura 37. Curvas de compactação do solo arenoso (S).

O ensaio de Proctor e o método de compactação desenvolvido são realizados em moldes de tamanhos distintos, e assim, o atrito entre a parede do molde e a massa compactada será diferente. Neste trabalho, na moldagem dos espécimes, desconsiderou-se tal influência. Mesbah et al (2004) comentam que o elemento de solo (tijolo, painel, cilindro, etc.) é diretamente influenciado pelo atrito do molde, pela energia de compactação e pela natureza do carregamento (estático ou dinâmico). Venkatarama e Jagadish (1993, apud MESBAH et al, 1999) submeteram o solo à compactação estática impondo um deslocamento da amostra até a obtenção de um volume constante, com o intuito de aproximar o procedimento em laboratório ao ocorrido na prática para a produção de tijolos. Os autores observaram uma dissipação de energia da ordem de 30%, ocasionado pelo atrito do solo com o molde.

Para a moldagem dos compósitos utilizou-se a umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação quase estática. Porém, sabe-se que a adição de cimento e/ou fibras vegetais alteram o teor de umidade, e também a massa específica aparente seca. Deste modo, decidiu-se pela fixação da densidade ($1,66 \text{ g/cm}^3$ para o solo argiloso e $1,88 \text{ g/cm}^3$ para o solo arenoso) para todos os compósitos moldados. Na tabela 14 pode-se observar a regularidade dos valores da massa específica aparente seca, proporcionado pelo procedimento adotado.

Tabela 14. Massa específica aparente seca dos compósitos.

Espécimes	γ_s (g/cm ³)	CV (%)	Espécimes	γ_s (g/cm ³)	CV (%)
C6C	1,665	0,15	S6C6	1,886	0,08
C6C25FS1	1,661	0,31	S6C25FS1	1,882	0,11
C6C25FC1	1,663	0,29	S6C25FC1	1,880	0,20
C6C35FS1	1,655	0,26	S6C35FS1	1,879	0,41
C6C35FC1	1,664	0,29	S6C35FC1	1,885	0,10

A densidade dos corpos de prova foi baseada em informações obtidas na literatura. Reddy e Gupta (2005) sugerem que o tijolo prensado deva ter densidade seca preferencialmente maior que 1,8 g/cm³. Barbosa e Souza (2000) estudaram Blocos de Terra Comprimida (sem estabilizante) com densidade de $\approx 1,8$ g/cm³. Rolim et al (1999), na comparação de resistência à compressão simples de espécimes cilíndricos, tijolos e painéis de solo-cimento, estudaram compósitos com densidade de 1,96 g/cm³. Dallacort et al (2002) comentam que prensas manuais de tijolos produzem amostras com massa específica da ordem de 1,80g/cm³. Walker (1995) produziu tijolos, em prensa manual, com densidades entre 1,60 e 1,80 g/cm³ com solos argilosos e entre 1,82 e 1,90 g/cm³ com solos arenosos. Com o objetivo futuro de correlacionar espécimes cilíndricos e prismáticos, optou-se por manter a densidade dentro deste intervalo.

4.3.2. Influência da porcentagem de aglomerante

Reddy e Gupta (2005), analisando a influência da estabilização química (cimento) na confecção de Blocos de Terra Comprimida, observaram entre outros, que a resistência à compressão e tração dos blocos aumentou conforme houve o acréscimo da quantidade de aglomerante, ressaltando o comportamento de crescimento linear da resistência à tração direta. A correlação, frequentemente linear, entre resistência a compressão simples e quantidade de cimento, também foram observadas nos estudos de Morel et al (2007). Consoli et al (1998) afirmam que mesmo a adição de 1% de cimento em peso de solo seco, ocorre o aumento da rigidez e do pico de resistência da matriz de solo. Como o esperado, os ensaios mecânicos confirmaram o significativo acréscimo na resistência final dos compósitos, simultaneamente a adição de aglomerante. A figura 38 ilustra o

crescimento ascendente das resistências mecânicas médias, conferindo a função linear de crescimento da resistência pela quantidade de cimento.

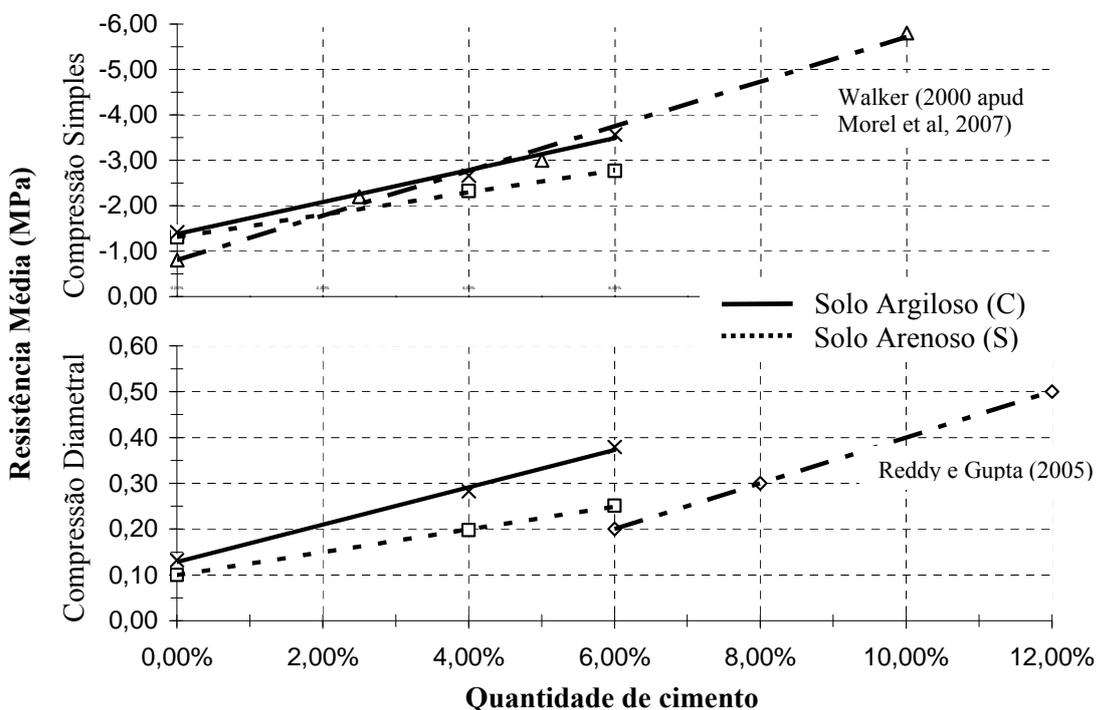


Figura 38. Comportamento do solo sob estabilização química e mecânica.

Os efeitos da adição de cimento foram investigados por Walker e Stace (1997) para solos de características físicas distintas. Os autores observam uma maior resistência mecânica dos blocos de solo-cimento com maiores concentrações de cimento e menores quantidades de argila. A redução é decorrente do aumento da plasticidade da mistura, e é atribuída ao efeito frágil da ligação entre a pasta de cimento e a matriz inerte de solo.

Bahar et al (2004) analisaram, entre outros, os efeitos da estabilização química (cimento) e estabilização física (correção granulométrica) sob períodos de cura distintos, e observaram o significativo aumento de resistência à compressão dos espécimes com solos corrigidos granulometricamente e com maiores concentrações de cimento. Os autores afirmam que o melhora do comportamento à compressão é devido aos produtos de hidratação do cimento.

Kenai et al (2006) comentam que os produtos hidratados preenchem os vazios da matriz e realçam a rigidez da estrutura de solo, pela formação de um grande número de ligações de silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de

cálcio hidratado (CAH). Nas tabelas 15 e 16 são apresentadas as resistências médias (média de três amostras) às ações mecânicas, ao longo do tempo de cura.

Tabela 15. Resistência média a compressão simples, em MPa.*

	Tempo de Cura				
	7D	14D	21D	28D	35D
C	1,52 (3,44)	1,36 (5,83)	1,37 (5,30)	1,38 (1,46)	1,45 (3,81)
C4C	2,42 (6,39)	2,75 (10,67)	2,78 (6,89)	2,72 (2,19)	2,63 (1,62)
C6C	3,34 (3,71)	3,35 (3,90)	3,56 (4,97)	3,71 (4,74)	3,89 (13,47)
S4C	1,90 (4,46)	2,08 (2,39)	---	2,78 (1,24)	2,78 (2,13)
S6C	2,76 (3,34)	2,38 (11,47)	2,96 (8,20)	2,87 (6,60)	2,85 (11,58)

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

Tabela 16. Resistência média a compressão diametral, em MPa.*

	Tempo de Cura				
	7D	14D	21D	28D	35D
C	0,138 (3,52)	0,119 (14,8)	0,122 (7,71)	0,134 (8,95)	0,146 (3,98)
C4C	0,277 (1,37)	0,223 (5,60)	0,302 (6,77)	0,353 (9,11)	0,258 (7,88)
C6C	0,355 (14,9)	0,322 (7,44)	0,415 (6,03)	0,409 (15,2)	0,394 (0,97)
S4C	0,168 (2,82)	0,217 (4,11)	---	0,197 (9,34)	0,227 (7,25)
S6C	0,265 (5,26)	0,231 (17,1)	0,239 (8,97)	0,204 (9,52)	0,316 (2,44)

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

Neste trabalho, a razão de compósitos com solo argiloso atingirem maiores resistências, quando comparados a compósitos arenosos, está no fato que as obtenções da resistência à compressão simples e diametral foram realizadas em espécimes não saturados. É sabido que compósitos ensaiados em estado seco apresentam maiores índices de resistência do que em estado saturado, e a razão entre resistências está diretamente interligada à quantidade de argila presente no solo, como observado por Walker (1995). Em trabalho mais recente, Walker (2004) observou uma redução da resistência de matrizes de solo, entre 40 e 75%, após imersão em água. Bahar et al (2004) confirmam a influência da imersão em água, na resistência mecânica dos corpos de prova. Os espécimes imersos 48h tiveram a resistência à compressão simples reduzida em 60% em comparação aos espécimes não imersos. Os pesquisadores reforçam que a redução aos esforços mecânicos foi mais significativa em amostras com menores porcentagens de aglomerantes, a redução das amostras com teores acima de 10% de cimento foi, em geral, de 50% de sua resistência. Segundo Morel et al (2007), a resistência é reduzida, devido, entre outros, à pressão nos poros pela ação da água.

A figura 39 ilustra os resultados obtidos na imersão prévia por 24 horas dos compósitos analisados neste trabalho, onde pode ser observado que a resistência dos compósitos de matriz arenosa foi significativamente superior aos de matriz argilosa. Para os compósitos argilosos a redução da resistência dos espécimes saturados comparados aos espécimes em estado seco foi, em geral, de 58%. Já nos compósitos arenosos, a redução foi de \cong 30%. Para as amostras reforçadas com fibras a redução alcançou índices médios de 40%. Os dados apontam que os solos arenosos, sob a ação da água, se comportam mais satisfatoriamente que os solos argilosos, visto que a perda de resistência atingiu níveis mais baixos.

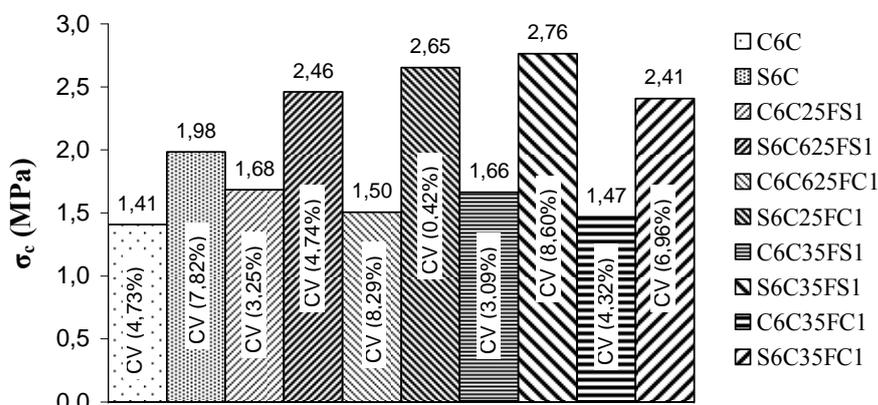


Figura 39. Resistência média a compressão simples dos compósitos imersos em água.

4.3.3.

Influência das fibras vegetais durante a compactação

Consoli et al (2005) submeteram amostras de areia fina reforçadas com fibras de polipropileno (distribuídas randomicamente) a testes de compressão isotrópica. A análise revelou mudanças significativas durante a compressão devido à inclusão das fibras sintéticas. As fibras foram retiradas após os ensaios, onde foi constatado que grande parte delas havia se rompido, indicando que as fibras atuam durante a compactação absorvendo parte da energia imposta, demonstrado pela deformação e ruptura das mesmas (figura 40).

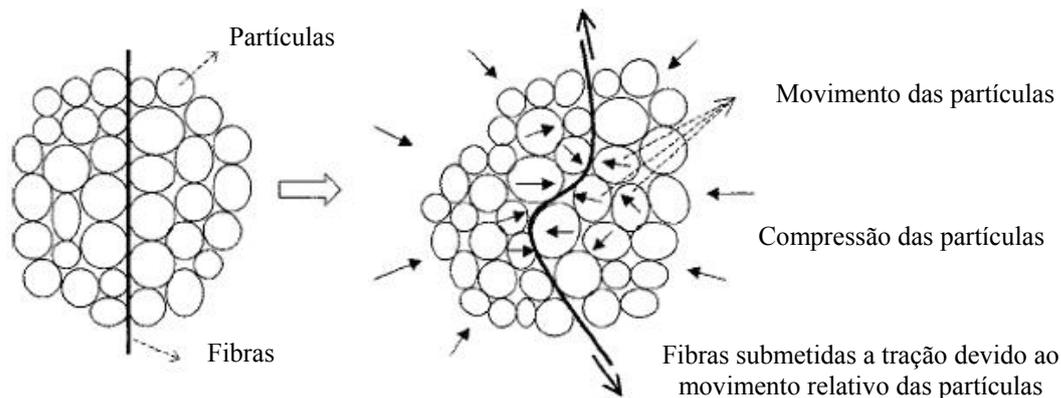


Figura 40 - Mecanismo de ruptura das fibras sob compactação (CONSOLI et al, 2005).

Neste trabalho, o comportamento observado por Consoli et al (2005) pôde ser confirmado durante a produção dos espécimes. As amostras com adição de fibras vegetais necessitaram de uma maior pressão para a compactação em comparação aos espécimes sem fibras, comprovando a atuação das fibras durante a confecção dos corpos de prova (figura 41).

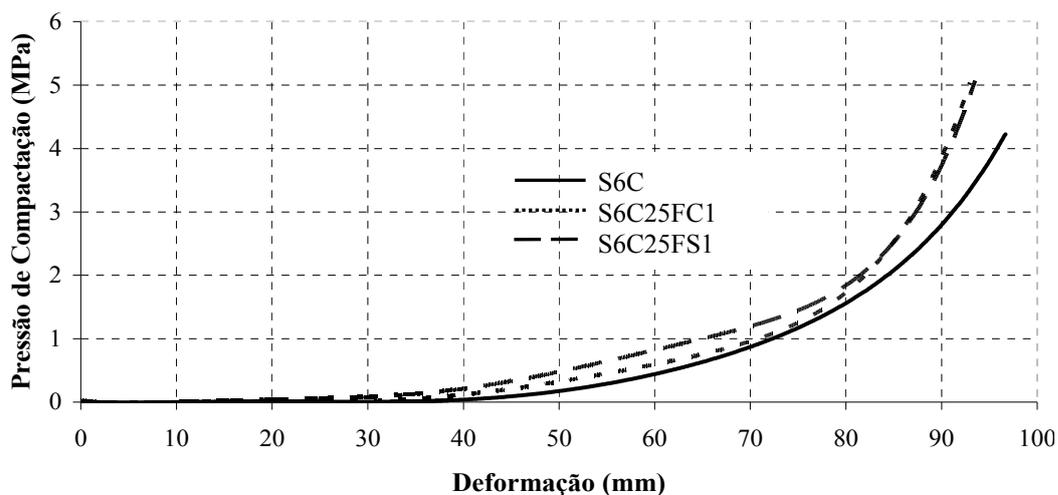


Figura 41. Pressão de compactação necessária para a produção dos corpos de prova.

4.3.4. Influência do comprimento e fração volumétrica das fibras

Bouhicha et al (2005) analisando a adição da fibra da palha da cevada em matrizes de solo, observaram um acréscimo de resistência à compressão de 10 a 20% para adições até 1,5% de fibras, em peso seco de solo, o qual dependeu do tipo de solo utilizado. A adição de fibras acima de 3,5%, em peso seco de solo, ocasionou uma queda de resistência de 45%. Yetin et al (2008) estudando a inserção de reforço fibroso em tijolos de Adobe, observaram o decréscimo da

resistência à compressão simples concomitantemente ao aumento da adição de fibras. Concluindo que o máximo de fibras adicionadas aos tijolos deve se restringir a 0,5% do peso do solo seco.

As figuras 42 e 43 ilustram o significativo aumento da resistência mecânica dos compósitos estudados em razão da adição de fibras vegetais e do tempo de cura. Observa-se que para a compressão simples a fração “ótima” varia em torno de 0,4 e 0,8%, para ambas as fibras. Analisando a resistência à compressão diametral, observa-se o crescimento linear da adição das fibras de sisal e curauá com comprimento de 25 mm, indicando que o limite ultrapassa 1%. Já os compósitos com fibras de curauá com comprimento de 35 mm apresentaram comportamento linear de crescimento até 0,4%, com desempenho constante a partir de 0,6%, em peso de solo seco.

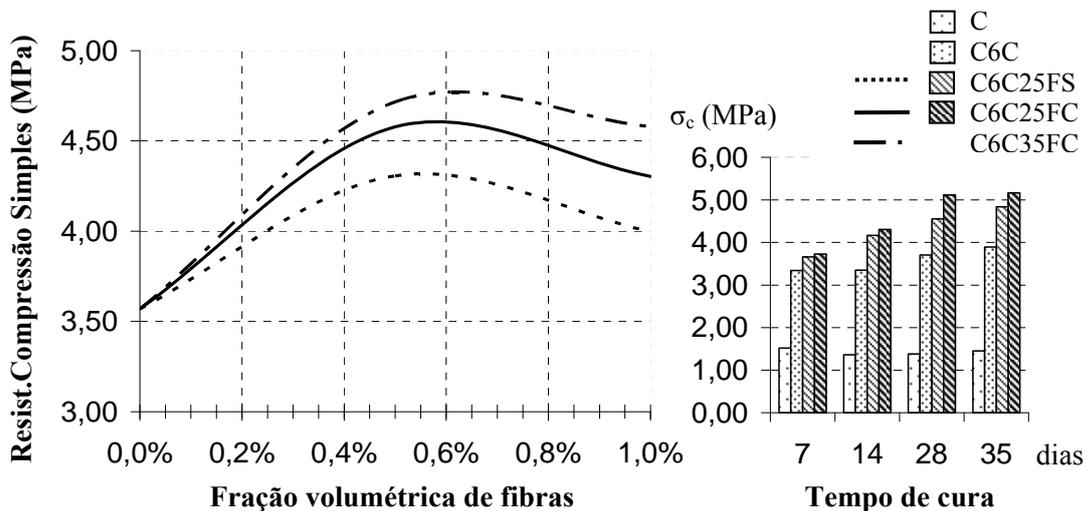


Figura 42. Resistência média à compressão simples por fração volumétrica de fibras.

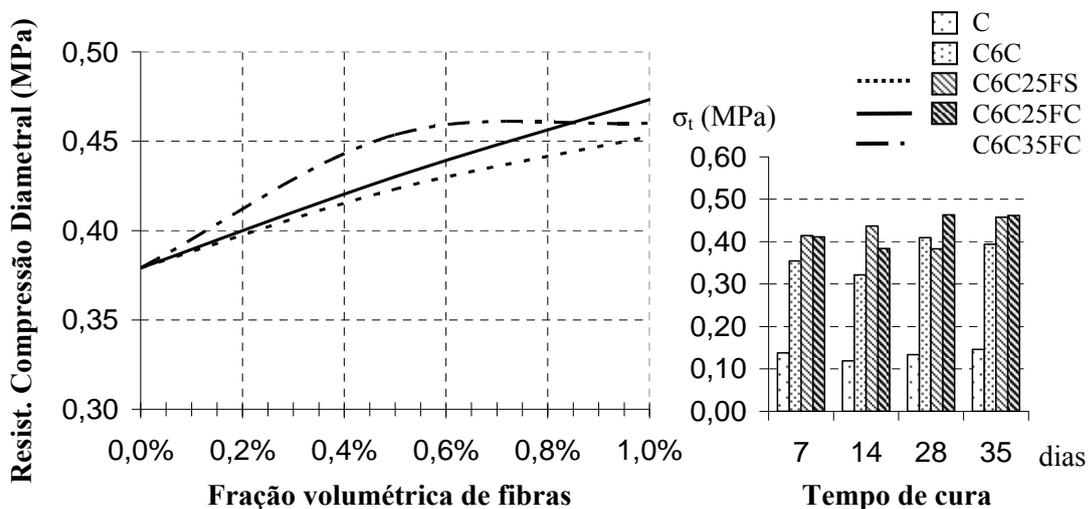


Figura 43. Resistência média à compressão diametral por fração volumétrica de fibras.

4.3.5. Comportamento dos compósitos reforçados

Ghavami et al (1999) investigando a introdução de fibras vegetais (sisal e coco) em matrizes de solo, observaram que o reforço fibroso acresceu na capacidade de absorção de energia dos compósitos. A explicação dada pelos autores fundamenta-se na redistribuição das forças internas do solo para as fibras, mencionando que as fibras trabalham juntamente com o solo, observando que em grande parte houve o arrancamento das fibras. O aumento da capacidade de resistência pós-fissuração em matrizes de solo, também foi observado nos estudos de Yetin et al (2008), Bouhicha et al (2005), Segetin et al (2007), Prabakar e Sridharb (2002), entre outros.

Nos espécimes estudados, as fibras vegetais modificaram satisfatoriamente o comportamento frágil das matrizes de solo. *Strain-gages* forneceram dados que demonstram o comportamento dúctil com significativo acréscimo de resistência pós-fissuração, permitindo ao compósito grande capacidade de absorção de energia (tenacidade). Porém, a instrumentação não foi muito favorecida pela pequena resistência das matrizes de solo. Embora a cola utilizada (Araldite) seja suficientemente deformável, observou-se em todos os casos, o desprendimento da instrumentação por falha na matriz. Assim, além dos *strain-gages* foi utilizado um medidor de deslocamento (LVDT) para auxiliar nas medições. Os gráficos individuais dos ensaios de compressão simples e diametral encontram-se no Apêndice B.

A figura 44 ilustra o comportamento tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso, fibras de curauá e sisal com comprimento de 25 mm e fração volumétrica de 1%. Analisando-se a influência da adição de aglomerante, tanto à compressão simples quanto para diametral, nota-se um aumento substancial de rigidez da mistura de solo-cimento (C6C) em contraposição ao solo sem aglomerante (C). Quanto à inserção de reforço fibroso, observa-se um considerável aumento na capacidade de deformação com o enrijecimento do compósito. Os espécimes C6C25FC1 apresentaram valores de rigidez à compressão simples e diametral equiparável aos compósitos sem fibras (C6C), enquanto nos compósitos com sisal (C6C25FS1) observa-se o decréscimo.

Conjectura-se que a relação de aspecto (razão entre comprimento e diâmetro) das fibras tenha sido responsável pelo comportamento adverso das misturas.

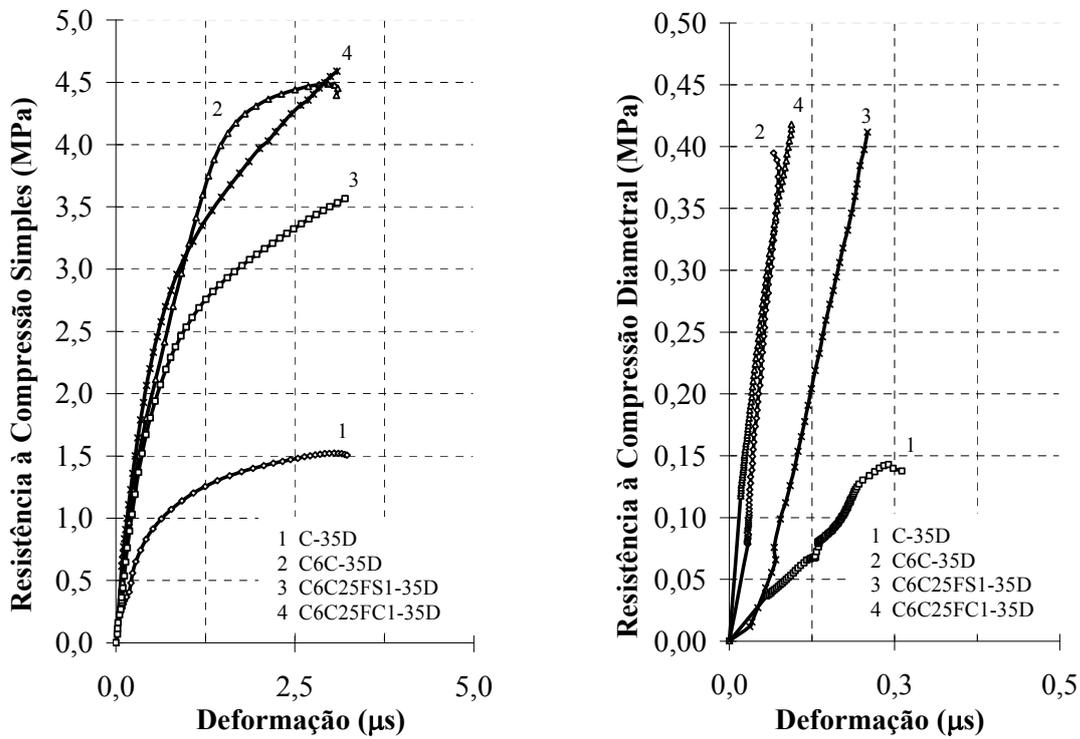


Figura 44. Tensão-deformação dos compostos com solo argiloso, fibras de curauá e sisal com comprimento de 25 mm e fração volumétrica de 1%.

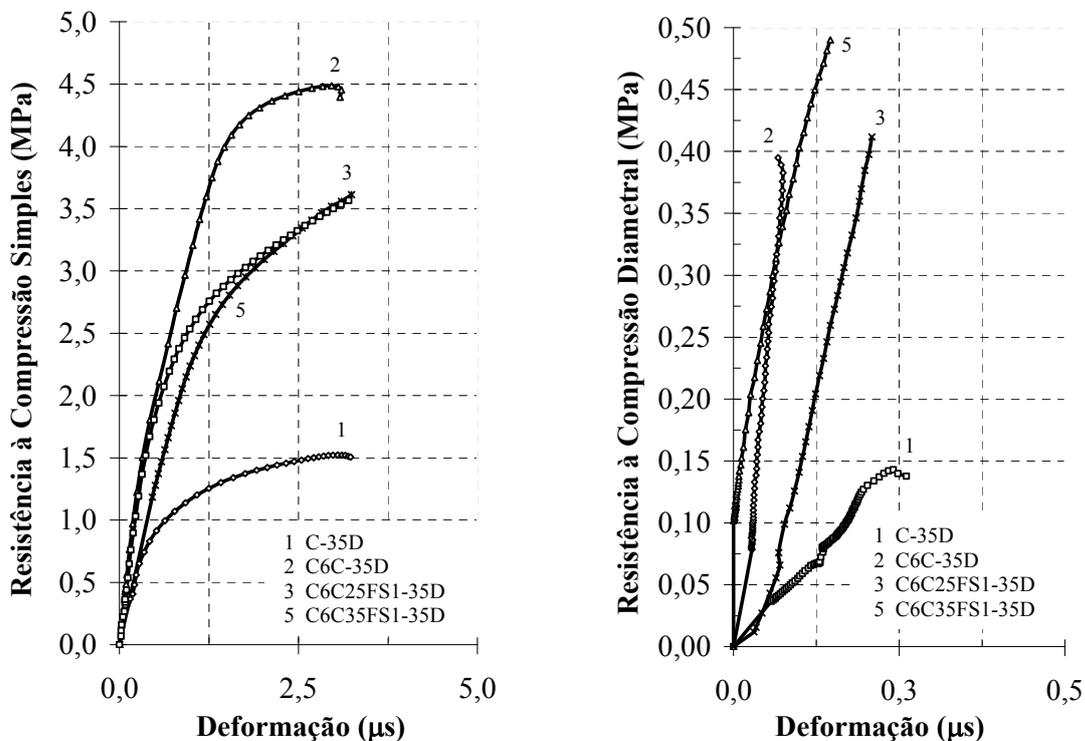


Figura 45. Tensão-deformação dos compostos com solo argiloso, fibras de sisal com comprimento de 25 e 35 mm e fração volumétrica de 1%, aos 35 dias.

Na figura 45 é ilustrado o comportamento da variação do comprimento da fibra de sisal. Na compressão simples observa-se o decréscimo de aproximadamente 73% na rigidez, entretanto na compressão diametral os compósitos com fibras de 35 mm apresentaram rigidez superior aos espécimes com reforço de 25 mm. A figura 46 se refere ao comportamento tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso e arenoso, com fibras de curauá de 25 mm de comprimento e 1% de fração volumétrica. Observa-se que a rigidez a compressão simples das matrizes argilosas é superior as matrizes arenosas. Conjectura-se que influenciado pela elevada atividade higroscópica da fibra de curauá, aliada ao fato que solos argilosos apresentam uma forte ligação entre as partículas de água, resultou em um maior número de áreas (pontos) de contato entre matriz e fibra. Análises microscópicas são necessárias para uma melhor compreensão do comportamento observado. Com a inclusão do reforço fibroso, para a compressão diametral, observa-se a queda de rigidez com aumento da capacidade de deformação para o solo arenoso. Guimarães (1990), em seus estudos, observa que um melhor desempenho foi obtido quando a relação de aspecto das fibras foi aumentada. Porém, segundo o autor, existe um limite, onde a rigidez e resistência do compósito são reduzidas.

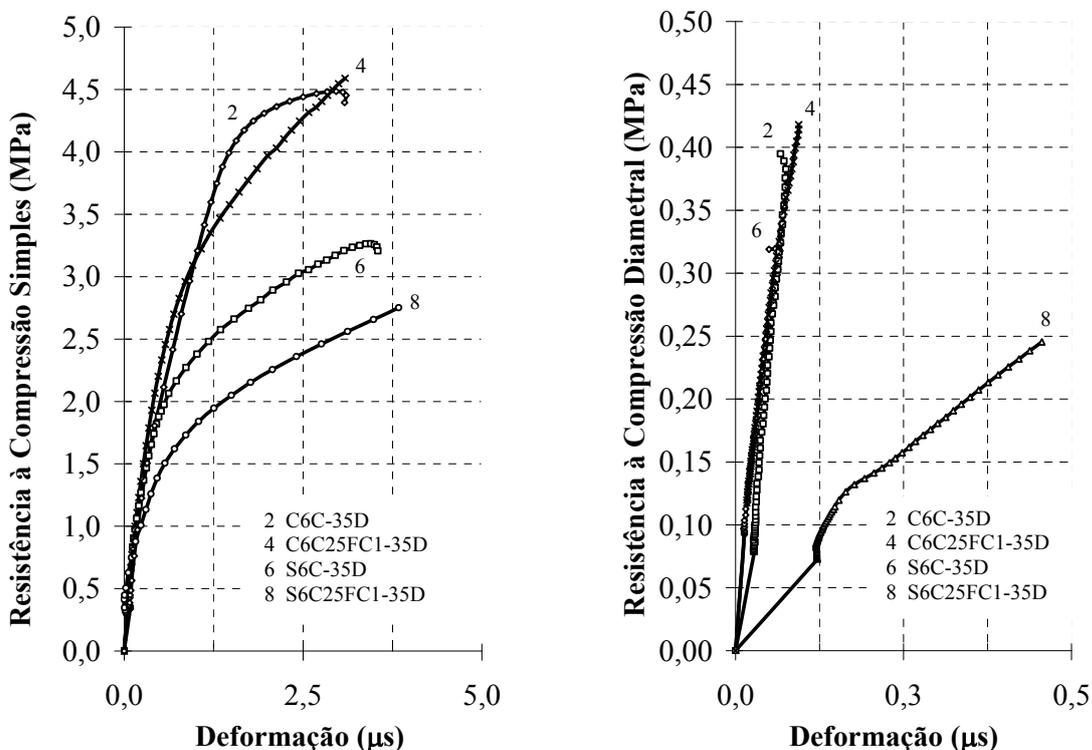


Figura 46. Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso e arenoso, fibras de curauá com comprimento de 25 mm e fração volumétrica de 1%.

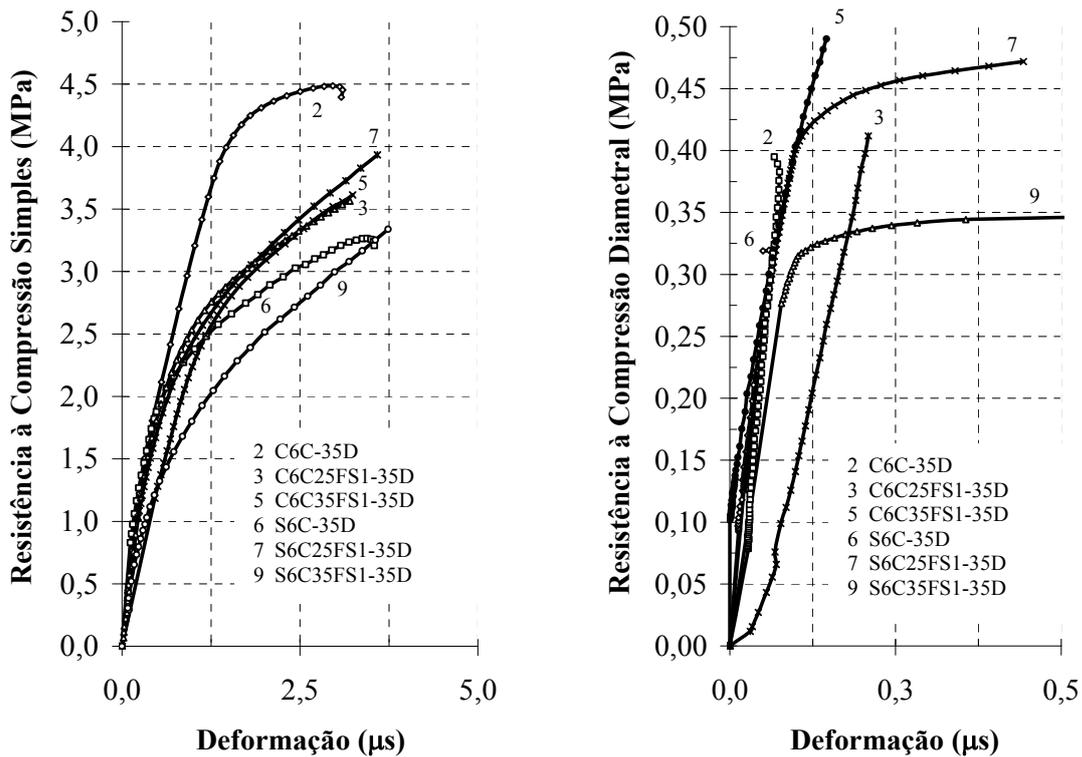


Figura 47. Tensão-deformação dos compósitos com solo argiloso e arenoso, com fibras de sisal com comprimento de 25 e 35 mm e fração volumétrica de 1%.

A figura 47 ilustra o comportamento dos compósitos (C e S) reforçados, com fibras de sisal com 25 e 35 mm de comprimento, adicionados volumetricamente em 1%, do peso do solo seco. Observa-se, para a matriz argilosa, que a adição de fibras de 35 mm elevaram a rigidez, em contrapartida, para as matrizes arenosas o aumento do comprimento da fibra ocasionou o decréscimo da rigidez.

A variação de comprimento das fibras de curauá para matrizes arenosas é ilustrado na figura 48. Na observação há o indicio da influência da ancoragem na rigidez dos compósitos ensaiados. Para as fibras de curauá, o maior comprimento das fibras proporcionou uma melhor ancoragem na matriz de solo. Presume-se que a presença de maior número de pontos de contato na interface das fibras de 35mm de comprimento, melhora a distribuição de tensão da matriz para as fibras, consequentemente, eleva a rigidez do compósito, embora, apresente rigidez inferior aos espécimes sem fibras.

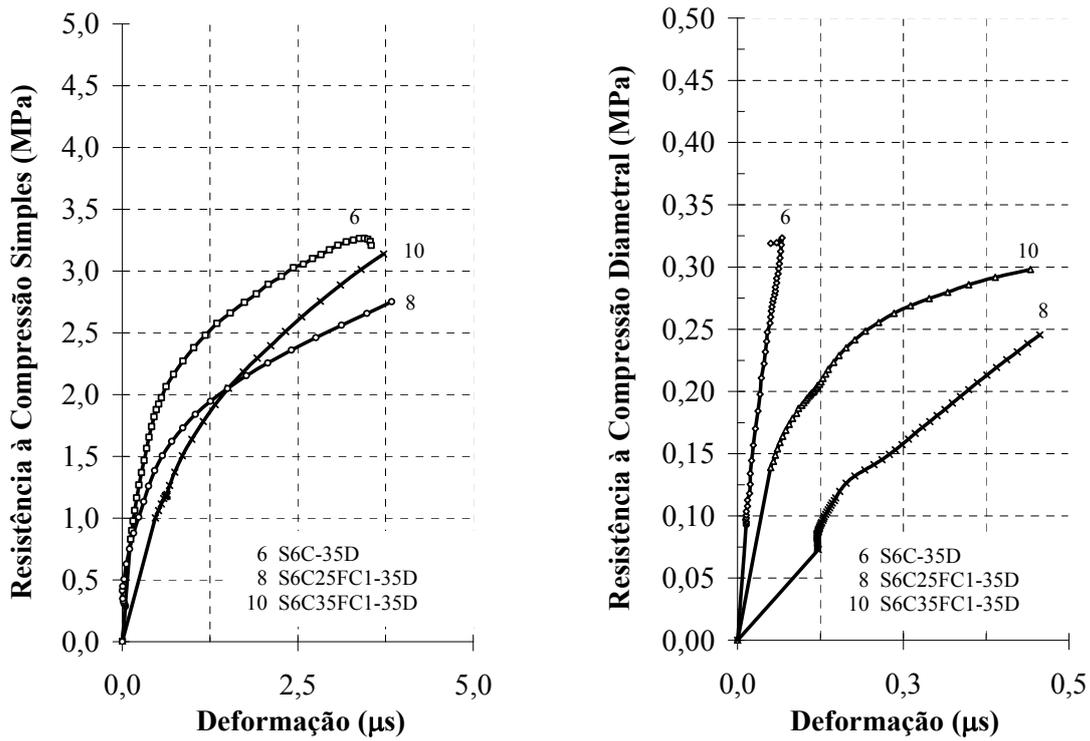


Figura 48. Tensão-deformação dos compósitos com solo arenoso, fibras de curauá com comprimento de 25 e 35 mm e fração volumétrica de 1%.

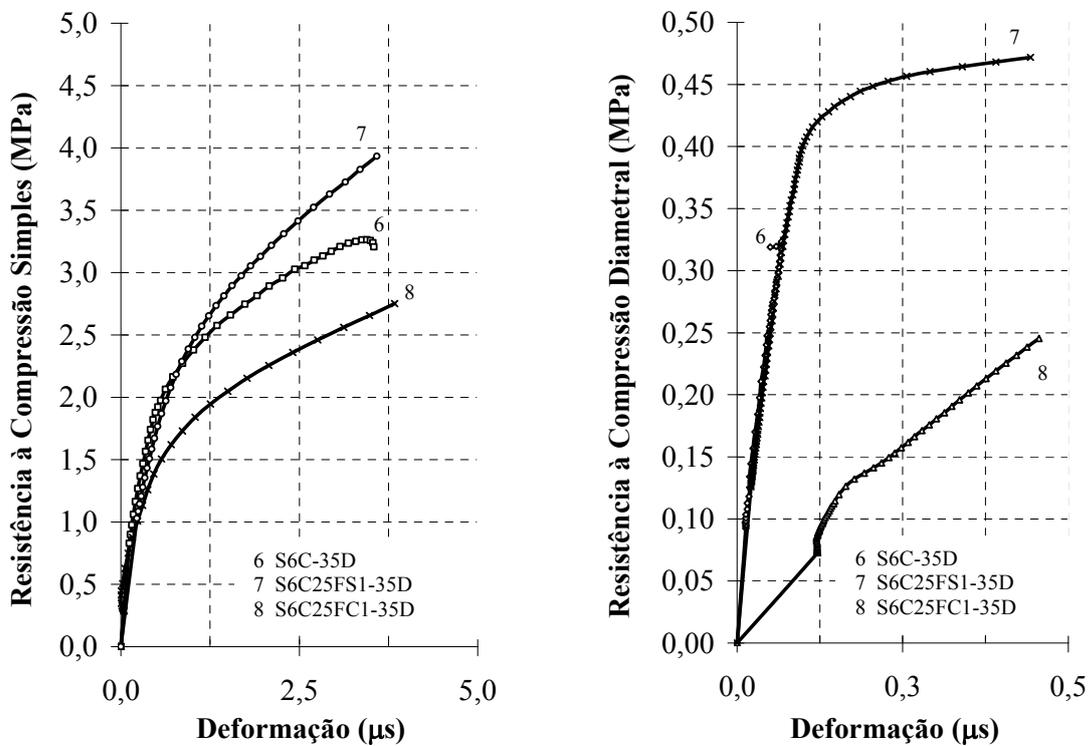


Figura 49. Tensão-deformação dos compósitos com solo arenoso, fibras de sisal e curauá com comprimento de 25 mm e fração volumétrica de 1%.

Na figura 49, compara-se a rigidez dos compósitos, de uma mesma matriz (S), porém com tipos diferentes de fibras, de mesmo comprimento e inclusão volumétrica. Conforme ilustrado, nos ensaios a compressão simples e diametral, é evidente o acréscimo de rigidez dos compósitos reforçados com sisal sob os compósitos com fibras de curauá. É necessário frisar que as fibras adicionadas têm comprimento de 25 mm, para as fibras de 35 mm, baseando-se nas observações anteriores, o comportamento é contrário.

O módulo de elasticidade foi calculado a partir do diagrama tensão-deformação conforme recomendado pela ASTM C469 e sugerido por Toledo Filho (1997) aos 35 dias. O módulo é a inclinação da reta entre dois pontos fixos no diagrama. O ponto inferior é o ponto onde a deformação é zero enquanto o ponto mais alto é o ponto onde a tensão corresponde a 40% da tensão última. O módulo de elasticidade é calculado pela equação 6, onde $\epsilon_{40\%}$ corresponde a deformação longitudinal produzida pela tensão $\sigma_{40\%}$. Os resultados podem ser observados na tabela 17.

$$E = \frac{(\sigma_{40\%})}{\epsilon_{40\%}} \quad (6)$$

Tabela 17. Módulo de elasticidade na compressão simples, em GPa.

	C	C6C	C6C25FC1	C6C25FS1	C6C35FS1
<i>E</i>	2,35	4,24	5,00	4,15	2,40
	S6C	S6C25FC1	S6C25FS1	S6C35FC1	S6C35FS1
<i>E</i>	5,01	4,30	4,46	2,01	3,16

Observa-se, em geral, que tanto para solos argilosos quanto para arenosos, a inclusão das fibras vegetais ocasionou o decréscimo do módulo de elasticidade em comparação aos espécimes de referência (C6C e S6C). Comportamento análogo ao observado por Barbosa (1996). Segundo o autor, o módulo de elasticidade obtido para o solo estabilizado com emulsão asfáltica atingiu valores médios de 5,69 GPa, com a adição de fibras de sisal (0,7% em peso de solo) houve o aumento da flexibilidade do compósito, com módulo de elasticidade de 3,45 GPa. Ghavami et al (1999), observa o aumento da flexibilidade dos compósitos com a adição de fibras vegetais. Os autores estudaram a adição de fibras de sisal e coco com comprimento de 50 mm e adição volumétrica de 4%. Para os espécimes com

fibras de sisal a redução do módulo de elasticidade foi de aproximadamente 17%. Para as fibras de coco a redução foi de 58%.

Nas tabelas 18 a 21 são apresentados a resistência média final à compressão simples e diametral dos compósitos arenosos e argilosos com reforço fibroso. Estabelecendo-se uma comparação entre os dois tipos de fibras (sisal e curauá), observa-se a significativa superioridade de resistência dos compósitos de matriz argilosa com fibras de curauá sob as de sisal e, o comportamento inverso para o solo arenoso – compósitos com fibras de sisal sob fibras de curauá.

Tabela 18. Resistência média à compressão simples (MPa), compósitos argilosos.*

	Tempo de Cura			
	7D	14D	28D	35D
C6C	3,34 (3,71)	3,35 (3,90)	3,71 (4,74)	3,89 (13,47)
C6C25FS0,5	3,66 (3,08)	4,17 (2,29)	4,55 (5,22)	4,84 (2,05)
C6C25FC0,5	3,73 (3,33)	4,31 (4,95)	5,12 (1,89)	5,16 (6,44)
C6C35FS0,5	3,58 (2,42)	3,60 (4,25)	4,24 (3,67)	4,23 (11,12)
C6C35FC0,5	4,22 (0,87)	4,43 (3,72)	5,16 (2,07)	5,05 (3,30)
C6C25FS1	3,82 (3,06)	3,95 (7,71)	4,18 (4,60)	4,03 (2,00)
C6C25FC1	3,73 (3,84)	4,27 (4,43)	4,60 (7,53)	4,62 (6,56)
C6C35FS1	3,79 (2,36)	4,03 (5,65)	4,75 (2,32)	4,38 (6,33)
C6C35FC1	3,98 (4,36)	4,43 (0,81)	4,93 (2,87)	4,98 (6,03)

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

Tabela 19. Resistência média à compressão diametral (MPa), compósitos argilosos.

	Tempo de Cura			
	7D	14D	28D	35D
C6C	0,355 (14,91)	0,322 (7,44)	0,409 (15,22)	0,394 (0,97)
C6C25FS0,5	0,414 (3,68)	0,437 (5,77)	0,383 (4,56)	0,458 (6,75)
C6C25FC0,5	0,411 (1,34)	0,384 (10,01)	0,463 (4,13)	0,462 (10,30)
C6C35FS0,5	0,389 (3,79)	0,381 (4,75)	0,454 (5,39)	0,377 (7,28)
C6C35FC0,5	0,427 (1,19)	0,424 (2,47)	0,461 (5,61)	0,503 (5,38)
C6C25FS1	0,474 (7,15)	0,486 (7,02)	0,432 (5,32)	0,419 (0,79)
C6C25FC1	0,482 (0,45)	0,439 (7,76)	0,460 (6,09)	0,512 (11,03)
C6C35FS1	0,517 (21,00)	0,447 (4,01)	0,529 (11,81)	0,458 (10,58)
C6C35FC1	0,401 (1,15)	0,452 (14,27)	0,464 (6,35)	0,524 (2,91)

Tabela 20. Resistência média à compressão simples (MPa), compósitos arenosos.*

	Tempo de Cura			
	7D	14D	28D	35D
S6C	2,76 (3,34)	2,38 (11,47)	2,87 (6,60)	2,85 (11,58)
S6C25FS0,5	3,62 (2,44)	4,55 (4,95)	4,35 (2,72)	4,52 (9,51)
S6C25FC0,5	3,57 (5,84)	4,21 (8,23)	5,08 (3,12)	5,10 (3,58)
S6C35FS0,5	3,83 (4,46)	4,37 (0,85)	5,52 (4,66)	4,19 (3,16)
S6C35FC0,5	3,57 (6,90)	4,04 (7,16)	3,97 (9,06)	3,88 (5,08)
S6C25FS1	4,64 (1,22)	5,34 (8,77)	5,70 (2,28)	6,00 (6,84)
S6C25FC1	3,80 (3,69)	4,69 (3,85)	4,94 (4,49)	4,80 (8,01)
S6C35FS1	4,26 (7,48)	5,59 (3,51)	5,25 (7,36)	5,35 (6,29)
S6C35FC1	4,39 (0,87)	4,85 (5,96)	5,86 (4,60)	5,75 (1,49)

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

Tabela 21. Resistência média à compressão diametral (MPa), compósitos arenosos.*

	Tempo de Cura			
	7D	14D	28D	35D
S6C	0,265 (5,26)	0,231 (17,11)	0,204 (9,52)	0,316 (2,44)
S6C25FS0,5	0,392 (1,95)	0,431 (1,79)	0,453 (9,68)	0,466 (10,00)
S6C25FC0,5	0,404 (10,24)	0,444 (1,73)	0,524 (7,81)	0,479 (4,57)
S6C35FS0,5	0,413 (4,04)	0,437 (0,82)	0,449 (4,66)	0,411 (1,01)
S6C35FC0,5	0,332 (6,13)	0,355 (10,31)	0,501 (2,90)	0,448 (12,98)
S6C25FS1	0,47 (5,02)	0,55 (1,92)	0,60 (7,70)	0,61 (9,50)
S6C25FC1	0,46 (8,75)	0,48 (5,83)	0,52 (2,16)	0,54 (7,63)
S6C35FS1	0,48 (12,38)	0,59 (6,06)	0,53 (6,71)	0,59 (5,80)
S6C35FC1	0,46 (5,43)	0,56 (5,17)	0,62 (4,75)	0,61 (14,71)

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

Para ambos os solos, a análise da fração volumétrica das fibras indica que, para as fibras de sisal de 25 e 35 mm de comprimento, o acréscimo na fração volumétrica aumentou a resistência final à compressão simples (1% sob 0,5%), exceto para compósitos argilosos com fibras de 25 mm de comprimento, adições de 0,5% sob 1%. Para as fibras de curauá, notadamente se observa o aumento de resistência dos compósitos com adições de 0,5% sob adições de 1%, exceto para fibras de 35 mm (1% sob 0,5%). Para a compressão diametral as maiores resistências foram obtidas em compósitos com maior quantidade de fibras.

4.3.6. Ensaio de absorção d'água

Os ensaios de absorção realizados em compósitos são, em geral, testes para medir a durabilidade do material (BAHAR et al, 2004). Visto que, a porosidade traz inconvenientes as matrizes, com representativa queda de resistência mecânica, além da susceptibilidade a erosão. Venkatarama e Jagadish (1987) observaram o rápido decréscimo da denominada razão de erosão (ER) – razão entre o volume de solo removido pelo volume de água respingada – com a redução da porosidade, proporcionado pelo aumento da densidade.

A porosidade admite a percolação da água, ocasionando danos nas estruturas e/ou elementos de terra. Walker e Stace (1997) comentam que a absorção de água aumenta concomitantemente à adição de argila na mistura. Relacionando a quantidade de aglomerante e o índice de absorção do bloco de terra, os autores observam que os elementos com uma maior concentração de cimento têm reduzidas suas taxas de absorção d'água.

O aumento da porosidade do solo também pode ser decorrente da adição de fibras, proporcionado por sua alta atividade higroscópica. Nesta pesquisa, observou-se que as fibras de curauá têm índice de absorção de água mais elevado em comparação às fibras de sisal, o que leva à suposição de que a zona de transição nos compósitos com fibras de curauá é mais espessa e com menor número de pontos de contato e assim maior quantidade de vazios. Porém os ensaios de absorção realizados não demonstram tal comportamento. A tabela 22 apresenta a taxa de absorção d'água, imersos por 24 horas.

Tabela 22. Taxa de absorção d'água dos compósitos estudados, em %.*

	C6C	C6C25FS1	C6C25FC1	C6C35FS1	C6C35FC1
Média	19,97 (0,60)	19,99 (1,87)	20,20 (1,00)	20,17 (0,71)	19,70 (2,09)
	S6C	S6C25FS1	S6C25FC1	S6C35FS1	S6C35FC1
Média	13,59 (0,67)	14,27 (1,15)	14,19 (2,36)	14,24 (0,83)	14,20 (0,38)

* os valores entre () representam o coeficiente de variação (CV), em %.

Embora a influência da porcentagem de finos no solo, confirme o comportamento observado por Walker e Stace (1997) – a taxa de absorção aumenta com a quantidade de argila –, nos compósitos fibrosos, observou-se que as taxas de absorção permanecem próximas às de compósitos sem fibras,

indicando que a adição do reforço fibroso não influenciou no aumento da porosidade do material, mesmo havendo fibras de atividade higroscópica distintas. Nota-se que a taxa de absorção permanece sob um mesmo patamar, $\approx 20\%$ para solos argilosos e, $\approx 14,2\%$ para solos arenosos. O comportamento dos compósitos pode ser decorrente da compressibilidade das fibras vegetais. Coutts e Warden (1990, apud SAVASTANO, 1992) e Rodrigues (2004), observam que as fibras vegetais, além de higroscópicas, são compressíveis. A compactação age retirando boa parte da água absorvida pelas fibras (devolvendo-a a matriz), além de comprimi-las, melhorando a zona de transição (maior número de pontos de contato diminuindo a porosidade), além de enrijecer a matriz de modo a impedir que as fibras voltem a seu formato tubular original. Entretanto, observações em nível microscópico, aliadas ao processamento digital de imagens, permitem uma análise mais concisa sobre a zona de transição (fibra e matriz) e, são fundamentais e necessários para o prosseguimento desta pesquisa em trabalhos futuros.