

CAPÍTULO

5

***RESULTADOS  
e DISCUSSÕES***

**N**este capítulo são apresentados os resumos de todos os resultados obtidos neste trabalho, assim como a discussão deles e a sua comparação com resultados obtidos por outros autores, quando encontrados na literatura consultada, observando-se que, em função dos objetivos do presente trabalho e destes autores serem muito diferentes, freqüentemente encontraram-se dificuldades em se estabelecerem estas comparações. Por exemplo, a maioria dos autores consultados avaliou as variações temporais e espaciais dos parâmetros estudados, quando neste trabalho foi avaliada a situação de dois pontos, bem definidos (solo na margem esquerda do *compartimento 3* e macrófitas no *compartimento 1*), e num único momento (coleta de solo em março/2001 e de macrófitas em junho/2000). Esta diferença se deu principalmente porque para este trabalho interessava apenas se caracterizar a matéria-prima que seria utilizada na produção do adobe (o solo e as macrófitas), enquanto que, de uma forma geral, o objetivo destes autores era caracterizar o ecossistema como um todo.

Os resultados parciais, tais como relatórios de ensaios, cuja inserção neste capítulo pudessem comprometer o fluxo do texto, e a conseqüente compreensão do mesmo, estão apresentados nos anexos. Para melhor apresentação, foram agrupados por assunto: **macrófitas, solo e tijolos**.

Ao final do capítulo, é apresentada a simulação de um exemplo de aplicação prática dos resultados obtidos neste trabalho.

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS MACRÓFITAS

Neste item são apresentados, e comentados, os resultados da determinação da quantidade de biomassa por unidade de superfície da lâmina d'água; da massa específica aparente em estado solto, e do teor de umidade higroscópica da biomassa triturada; assim como das concentrações e estoques de nutrientes e metais.

### 5.1.1 Biomassa por unidade de superfície dos estandes

Na **tab. 5.01** são apresentados os resultados da determinação da quantidade de biomassa seca, obtida na coleta preliminar (realizada mais próxima à saída do compartimento 1), das 3 espécies de macrófitas aquáticas estudadas, relativas à unidade de superfície de sua cobertura no lago, denominada simplificada por “biomassa” ou “biomassa por unidade de superfície do estande” (**Bps**), calculada pela **eq. (4.1)** e expressa em  $\text{g/m}^2$ . Na **tab. 5.02**, são apresentados os resultados relativos à primeira coleta, realizada mais próxima da entrada do mesmo compartimento. Estes foram os resultados utilizados no restante do trabalho, por se referir a uma amostragem maior.

**Tabela 5.01.** Biomassa por unidade de superfície (**Bps**), na coleta preliminar.

ESPÉCIE	Nº Quadrados <i>n</i> (0,25 m <sup>2</sup> cada)	Massa seca total <i>m<sub>0</sub></i> (g)	Bps (g/m <sup>2</sup> )
<i>Brachiaria arrecta</i>	4	5.369	<b>5.369</b>
<i>Eichhornia crassipes</i>	6	2.318	<b>1.545</b>
<i>Pistia stratiotes</i>	8	548	<b>274</b>

**Tabela 5.02.** Biomassa por unidade de superfície (**Bps**), na primeira coleta.

ESPÉCIE	Nº Quadrados <i>n</i> (0,25 m <sup>2</sup> cada)	Massa seca total <i>m<sub>0</sub></i> (g)	Bps (g/m <sup>2</sup> )
<i>Brachiaria arrecta</i>	10	4.424	<b>1.770</b>
<i>Eichhornia crassipes</i>	25	6.672	<b>1.068</b>
<i>Pistia stratiotes</i>	50	2.936	<b>235</b>

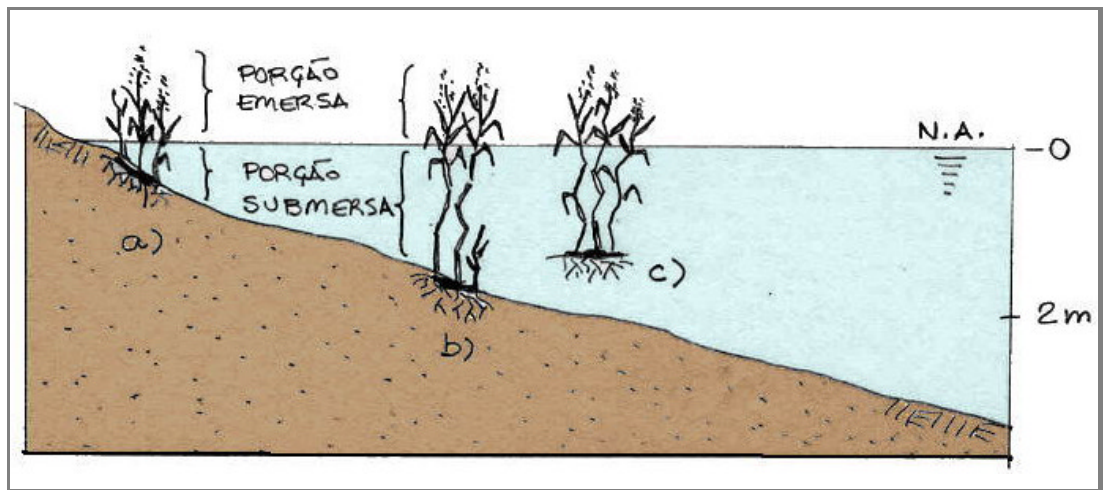
Analisando-se os resultados destas duas tabelas, conclui-se inicialmente que a *B. arrecta* é a macrófita que fornece maior quantidade de biomassa. Entretanto, para esta espécie em particular, há uma variação significativa neste parâmetro, mesmo quando avaliado para um único sistema. FERREIRA (2000), por exemplo, encontrou valores variando entre 1.255 g/m<sup>2</sup> e 2.141 g/m<sup>2</sup>, com média de 1.538 g/m<sup>2</sup>, para este mesmo reservatório. LUCIANO<sup>11</sup> apud FERREIRA (2000), encontrou valores ainda mais discrepantes (mínimo de 175 g/m<sup>2</sup> e máximo de 911 g/m<sup>2</sup>), para a mesma espécie em um outro reservatório, o de Jurumirim.

Isto se explica pelo fato da *B. arrecta* ser uma macrófita emersa, ou seja, possui o sistema radicular fixado no sedimento do fundo do lago, uma parte submersa (principalmente caules) e uma parte emersa (ou aérea, com mais folhas e flores). Também é uma planta que se adapta rapidamente à variação de cota da lâmina d'água (com crescimento da porção submersa), além de habitar desde as margens até regiões mais profundas, com cerca de 2 m, como ilustrado na **fig. 5.01**. Essa variação pode ser evidenciada pela comparação dos resultados destas duas coletas, feita no mesmo lago, porém, em locais com profundidades diferentes.

Como um dos objetivos da coleta preliminar era subsidiar o planejamento da primeira coleta, visando-se obter biomassa em quantidade suficiente para a produção dos tijolos, esta variação de biomassa por unidade de área provocou um erro na previsão, o que obrigou a realização da 2<sup>a</sup> coleta (citada no **item 4.1.1**). Comparativamente, para as duas outras espécies, *E. crassipes* e *P. stratiotes*, esta variação não foi tão expressiva.

---

<sup>11</sup> LUCIANO, S. C. (1996). **As macrófitas aquáticas *E. azureae* (Kunt) e *B. arrecta* (Stent) como armazenadoras de nitrogênio e fósforo na região inundável do rio Taquari (zona de desembocadura na represa Jurumirim – SP)**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 155p.



**Figura 5.01.** Variação da biomassa de *Brachiaria arrecta* ao longo do transecto, podendo ocorrer inclusive desprendimento e flutuação de touceiras (c).

Como exposto, *Bps* é um parâmetro que apresenta grande variação temporal e espacial, para uma mesma espécie e dentro de um mesmo sistema (POTT & POTT, 2000). Apresentar os resultados encontrados por vários autores consultados (tais como, PETRACCO, 1995; LUCIANO, 1996; MEYER, 1996; POMPÊO, 1996 e BITTAR, 1998) mas, que trabalharam em outros reservatórios (com outras espécies), não seria significativo. Portanto, na **tab. 5.03** são apresentados alguns dados comparativos entre os resultados do presente trabalho e os de FERREIRA (2000) e MORAES (1998). A aparente discrepância entre os valores relativos à *B. arrecta* se deve, além das características particulares da planta, à variação de metodologias empregadas, tanto na forma quanto na quantidade da amostragem.

MORAES (1998) fez um levantamento bem detalhado destas três espécies, apresentando também os dados de vários outros autores, principalmente relativos a outros reservatórios, evidenciando as variações temporais e espaciais deste parâmetro. É importante destacar que, no presente trabalho, as macrófitas foram coletadas no compartimento 1, no mês de junho/2000 e que a autora citada coletou nos meses de março, agosto, outubro e dezembro/1997, encontrando significativas variações temporais neste ponto

de coleta, ou seja, para *B. arrecta* encontrou valores variando entre 882 e 1.288 g/m<sup>2</sup>; para *E. crassipes*, entre 671 e 2.210 g/m<sup>2</sup>, e para *P. stratiotes*, entre 232 e 881 g/m<sup>2</sup>.

**Tabela 5.03.** Comparação dos resultados de biomassa por unidade de superfície (*Bps*) do presente trabalho\* com os resultados médios de outros autores (no compartimento I).

ESPÉCIE	Bps (g/m <sup>2</sup> )		
	FARIA (2002)*	FERREIRA (2000)	MORAES (1998)
<i>Brachiaria arrecta</i>	1.770	1.538	1.210
<i>Eichhornia crassipes</i>	1.068	NE	1.369
<i>Pistia stratiotes</i>	235	269	381

NE – não estudado.

O valor de *Bps* relativos à *P. stratiotes* encontrado no presente trabalho foi similar ao de FERREIRA (2000) e ambos relativamente diferente de MORAES (1998), no entanto, o primeiro cita resultados de outros autores que apontam (para a mesma espécie) de 48 a 372 g/m<sup>2</sup> para o reservatório de Itaipú e máximos de 463 e 430 g/m<sup>2</sup> em ambientes naturais na Flórida. Para *B. arrecta* e *E. crassipes*, as diferenças não foram tão significativas.

Finalizando, este parâmetro não deve ser analisado isoladamente, há que se levar em consideração, por exemplo, a taxa específica de crescimento das espécies. Segundo POTT & POTT (2000), a biomassa de *E. crassipes* se duplica a cada duas semanas, valor idêntico ao tempo de duplicação de *P. stratiotes* encontrado por FERREIRA (op. cit.), que foi de 14,5 dias (cerca de duas semanas), para a média dos resultados levantados no inverno e verão, considerando-se diferentes estádios fenológicos (broto, jovens e adultos). Esta autora não estudou *E. crassipes* e o experimento com *B. arrecta* não foi bem sucedido, por incapacidade de adaptação da espécie às condições de laboratório.

### 5.1.2 Massa específica aparente em estado solto da biomassa triturada (úmida e seca) e seu teor de umidade higroscópica

Os resultados do ensaio de determinação do teor de umidade higroscópica ( $U_{hm}$ ), calculado pela eq. (4.2), são apresentados na **tab. 5.04**.

**Tabela 5.04.** Umidade higroscópica da biomassa triturada ( $U_{hm}$ ).

ESPÉCIE	tara T (g)	$M_{mU}$ (g)	$M_{m0}$ (g)	$U_{hm}$ (%)
<i>Brachiaria arrecta</i>	1.005	1.185	1.165	<b>12,50</b>
<i>Eichhornia crassipes</i>	950	1.040	1.030	<b>12,50</b>
<i>Pistia stratiotes</i>	945	1.195	1.175	<b>8,70</b>

Analisando-se os resultados da **tab. 5.04**, observa-se que a *P. stratiotes*, apesar de ser a que apresentava maior teor de umidade quando fresca, foi a que menos adsorveu umidade do ar, enquanto que a *B. arrecta* e a *E. crassipes* apresentaram níveis similares.

Na **tab. 5.05** são apresentados os resultados do ensaio de determinação da massa específica aparente em estado solto da biomassa triturada úmida ( $r_{ap\ macr}$  a  $U_{hm}$ ), calculada pela eq. (4.3), e a seca ( $r_{ap\ macr\ seca}$ ), calculada com estes dados e os da **tab. 5.04** pela eq. (4.4).

**Tabela 5.05.** Resultados do ensaio de determinação da massa específica aparente da macrófita triturada, úmida ( $r_{ap\ macr}$  a  $U_{hm}$ ) e seca ( $r_{ap\ macr\ seca}$ )

ESPÉCIE	$M_{mU}$ (g)			$M_{mU\ média}$ (g)	$r_{ap\ macr}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$r_{ap\ macr\ seca}$ (g/cm <sup>3</sup> )
	1 <sup>a</sup> det.	2 <sup>a</sup> det.	3 <sup>a</sup> det.			
<i>Brachiaria arrecta</i>	155	130	125	137	<b>0,076</b>	<b>0,067</b>
<i>Eichhornia crassipes</i>	125	150	150	142	<b>0,079</b>	<b>0,069</b>
<i>Pistia stratiotes</i>	250	250	250	250	<b>0,139</b>	<b>0,127</b>

Analisando-se os resultados da **tab. 5.05**, observa-se que *B. arrecta* e *E.*

*crassipes* apresentaram praticamente a mesma massa específica aparente seca, enquanto que *P. stratiotes* apresentou o dobro desse valor. Isto significa que no momento de se definir os traços, pode-se reduzir o volume de biomassa de *P. stratiotes* pela metade, com relação às outras duas macrófitas, que mesmo assim ter-se-ão traços equivalentes em massa, como será mostrado oportunamente. Este é um dado prático muito importante porque, em termos de volume, a obtenção de biomassa picada e seca de *P. stratiotes* é mais difícil que as de *E. crassipes* e *B. arrecta*, ou seja, a “quebra” de volume na secagem da *P. stratiotes* é muito grande, como pode ser observado pelos dados da **tab. 5.02**.

Os resultados destes ensaios não puderam ser comparados com os de outros autores, por se tratar de abordagem inédita, com parâmetros não avaliados anteriormente.

### 5.1.3 Concentração e estoque de nutrientes (fósforo total e nitrogênio Kjeldahl total)

Como descrito no **item 4.1.4**, a concentração de fósforo total foi designada por  $P-TOT_m$  e o seu estoque por unidade de superfície do estande de macrófitas, por  $Es_{Pm}$ , calculado pela **eq. (4.5)**, cujos resultados são apresentados na **tab. 5.06**. Analogamente, a concentração de nitrogênio orgânico (Kjeldahl) total foi designada por  $NKT_m$  e seu estoque por unidade de superfície do estande de macrófitas, por  $Es_{Nm}$ , também calculado pela **eq. (4.5)**, cujos resultados são apresentados na **tab. 5.07**.

Assim como no **item 5.1.1**, optou-se por comparar os resultados obtidos apenas com os apresentados por MORAES (1998), já que FERREIRA (2000) se utilizou destes mesmos dados, não apresentando novos valores. Na **tab. 5.08** são apresentados estes resultados, com as unidades de medida já devidamente homogeneizadas, para facilidade de comparações.



**Tabela 5.06.** Concentração ( $P\text{-TOT}_m$ ) e estoque ( $Es_{Pm}$ ) de fósforo total nas macrófitas.

ESPÉCIE	Bps ( $g/m^2$ )	P-TOT <sub>m</sub> ( $\mu g/g$ )	Es <sub>Pm</sub> ( $\mu g/m^2$ )
<i>Brachiaria arrecta</i>	<b>1.770</b>	0,0845	<b>149,57</b>
<i>Eichhornia crassipes</i>	<b>1.068</b>	0,1028	<b>109,79</b>
<i>Pistia stratiotes</i>	<b>235</b>	0,1138	<b>26,56</b>

**Tabela 5.07.** Concentração ( $NKT_m$ ) e estoque ( $Es_{Nm}$ ) de nitrogênio orgânico (Kjeldahl) total nas macrófitas.

ESPÉCIE	Bps ( $g/m^2$ )	NKT <sub>m</sub> (%)	Es <sub>Nm</sub> ( $g/m^2$ )
<i>Brachiaria arrecta</i>	<b>1.770</b>	0,42	<b>7,43</b>
<i>Eichhornia crassipes</i>	<b>1.068</b>	3,90	<b>41,65</b>
<i>Pistia stratiotes</i>	<b>235</b>	4,42	<b>10,39</b>

**Tabela 5.08.** Concentrações e estoques de nutrientes nas macrófitas, no compartimento 1. Resultados do presente trabalho<sup>1</sup> e de MORAES (1998)<sup>2</sup>.

Espécie	FÓSFORO				NITROGÊNIO			
	FARIA (2002) <sup>1</sup>		MORAES (1998) <sup>2</sup>		FARIA (2002) <sup>1</sup>		MORAES (1998) <sup>2</sup>	
	P-TOT <sub>m</sub> ( $\mu g/g$ )	Es <sub>Pm</sub> ( $mg/m^2$ )	P-TOT <sub>m</sub> ( $\mu g/g$ )	Es <sub>Pm</sub> ( $mg/m^2$ )	NKT <sub>m</sub> (%)	Es <sub>Nm</sub> ( $g/m^2$ )	NKT <sub>m</sub> (%)	Es <sub>Nm</sub> ( $g/m^2$ )
B	0,08	0,15	3.400	7.740	0,42	7,43	2,31	49,98
E	0,10	0,11	3.200	7.650	3,90	41,65	2,27	56,90
P	0,11	0,03	5.200	3.420	4,42	10,39	3,07	19,53

**B:** *Brachiaria arrecta*; **E:** *Eichhornia crassipes*; **P:** *Pistia stratiotes*

<sup>2</sup> dados médios relativos aos meses de março, agosto, outubro e dezembro/1997.

Analisando-se os dados apresentados na **tab. 5.08**, pode-se notar uma grande discrepância entre os estoques de fósforo encontrados no presente trabalho e aqueles apresentados por MORAES (1998). Este fato se deve, provavelmente, às diferenças de metodologia na amostragem (quantidades

coletadas) e determinação em laboratório, à diferença de datas (um trabalhou em 2000, o outro em 1997), além das já comentadas variações sazonais e espaciais, valendo lembrar que nenhum parâmetro relativo às macrófitas aquáticas pode ser analisado isoladamente. Neste caso, para uma análise mais aprofundada, deveriam ser levadas em consideração as demais variáveis do sistema, como a dinâmica do aporte de nutrientes, em cada uma das datas.

Mais importante que comparar os números absolutos, é verificar as relações entre eles. Neste aspecto, ainda considerando a estocagem de fósforo, tanto em um quanto em outro autor, pode-se verificar que *P. stratiotes* se mostrou a menos eficiente, enquanto que *B. arrecta* e *E. crassipes* apresentaram eficiências similares, com leve vantagem para a primeira, ambas com estoque cerca de 2 vezes superior ao de *P. stratiotes*.

Quanto aos resultados relativos a estocagem de nitrogênio, não houve tanta discrepância de valores entre os dois autores comparados. Pelo presente trabalho, a macrófita que se mostrou mais eficiente foi *E. crassipes*, com estoque 5,6 vezes superior ao de *B. arrecta* e 4,0 vezes ao de *P. stratiotes*. Já segundo os dados de MORAES (1998), *E. crassipes* também se mostrou a mais eficiente, mas com uma inversão nas posições de *B. arrecta* e *P. stratiotes*, ou seja, o estoque de *E. crassipes* foi de 1,1 vez o de *B. arrecta* e de 2,9 vezes o de *P. stratiotes*.

Finalizando, apesar de *P. stratiotes* ter apresentado o menor estoque de nutrientes, sua taxa de decomposição (bem como de crescimento) é mais rápida, disponibilizando nutrientes em menor intervalo de tempo. MORAES (1998) também menciona que a razão entre o estoque de nutrientes e a biomassa é maior em *P. stratiotes*, o que indica maior capacidade de concentrar elementos químicos em relação às demais. Neste estudo, a razão entre o estoque de nutrientes e a biomassa foi maior para *P. stratiotes* (0,1572), em comparação com *B. arrecta* (0,0887) e *E. crassipes* (0,1418).

No mesmo reservatório, BITAR (1998) também reconheceu a importância de *E. crassipes* e *P. stratiotes*, calculando, para ambas, uma retirada de nitrogênio de aproximadamente 2.797,2 kg N/dia, sendo 87,5 % apenas para *E. crassipes*.

#### 5.1.4 Concentração e estoque de metais

Na **tab. 5.09** são apresentados os resultados da determinação da concentração de 10 metais pesados ( $Mp_m$ , expressa em mg/g) e do cálculo do estoque destes metais ( $Es_{Mp_m}$ , expressa em g/m<sup>2</sup>) nas três espécies de macrófitas estudadas, calculado pela **eq. (4.5)**.

Estes resultados serão úteis na estimativa da quantidade de substâncias químicas que os tijolos de adobe serão capazes de encapsular. No entanto, são escassos os trabalhos que tratam do assunto, mesmo sabendo-se na “comunidade limnológica” que as macrófitas aquáticas desempenham papel importante como produtores primários de oxigênio e nutrientes, além da reciclagem de nutrientes e na estabilidade dos sedimentos, próximos às margens do corpo d’água, segundo APHA<sup>12</sup> apud LIMA & PEDROZO (2001).

Mesmo um dos mais renomados centros de estudo da ecotoxicologia dos metais, o NEAMA-CRA, só faz referência ao estudo de um metal (o ferro) em uma espécie de macrófita aquática (a *Eichhornia crassipes*), num de seus cadernos da série “*Cadernos de Referência Ambiental*”, o produzido por LIMA & PEDROZO (2001). Neste trabalho são apresentados os resultados de detecção de ferro, separadamente, nas extremidades e nas raízes de *E. crassipes*, porém, em um lago do Zimbábue. Para este sistema, foram encontrados níveis de concentração de ferro variando entre 0,60 e 2,14 mg/g, para as extremidades, e entre 6,12 e 20,70 mg/g, para as raízes (cerca de metade do encontrado no presente trabalho), com fatores de

<sup>12</sup> APHA/AWWA/WEF. (1998). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed. Washington.

bioacumulação de 8.000 e 15.000, respectivamente, comparados com os níveis de ferro na água do sistema, o que indica o alto poder de bioacumulação deste metal pela *E. crassipes*.

**Tabela 5.09.** Concentração ( $M_{p_m}$ , em mg/g) e estoque de metais ( $ES_{M_{p_m}}$ , em  $g/m^2$ ) nas macrófitas aquáticas (com indicação de Bps abaixo do título de cada espécie)

METAIS	$M_{p_m}$ (mg/g)			$ES_{M_{p_m}}$ ( $g/m^2$ )		
	<i>B. arrecta</i>	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	<i>B. arrecta</i> (1.770 $g/m^2$ )	<i>E. crassipes</i> (1.068 $g/m^2$ )	<i>P. stratiotes</i> (235 $g/m^2$ )
Ferro	22,977	39,646	39,656	40,67	41,15	9,32
Cádmio	0,019	0,020	0,022	0,03	0,02	0,01
Cálcio	35,590	95,775	113,077	62,99	99,41	26,57
Cobre	0,158	0,247	0,280	0,28	0,26	0,07
Chumbo	0,308	0,381	0,396	0,55	0,40	0,09
Cromo	0,350	0,272	0,254	0,62	0,28	0,06
Manganês	3,419	17,439	21,250	6,05	18,10	4,99
Magnésio	14,856	26,858	30,127	26,30	27,88	7,08
Níquel	0,166	0,282	0,318	0,29	0,29	0,07
Zinco	0,939	0,945	1,414	1,66	0,98	0,33

Assim como para os nutrientes, estes resultados serão comparados com os apresentados por MORAES (1998), o trabalho mais abrangente sobre o tema, encontrado na bibliografia consultada. Como os valores de biomassa encontrados por esta autora já foram apresentados na **tab. 5.03**, optou-se por apresentar na **tab. 5.10** apenas os estoques de metais, visto que, caso se deseje os valores das concentrações, os mesmos são facilmente calculáveis à partir destes dois parâmetros. Dessa forma evitou-se estender desnecessariamente esta tabela, observando-se que MORAES (1998) não estudou o níquel mas, estudou outros quatro elementos químicos.

Também são apresentados na **tab. 5.11**, para efeito de comparação, os

resultados encontrados por PINTO-COELHO & GRECO (1998) com 5 metais pesados estocados por *E. crassipes*, no reservatório da Pampulha, em Belo Horizonte – MG.

**Tabela 5.10.** Estoque de metais ( $E_{S_{Mp m}}$ , em  $g/m^2$ ) nas macrófitas aquáticas encontrados no presente trabalho<sup>1</sup> e por MORAES (1998), no compartimento 1.

METAIS	MORAES (1998)			FARIA (2002) <sup>1</sup>		
	<i>B. arrecta</i>	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>	<i>B. arrecta</i>	<i>E. crassipes</i>	<i>P. stratiotes</i>
Ferro	6,23	16,95	6,32	40,67	41,15	9,32
Cádmio	--	--	--	0,03	0,02	0,01
Cálcio	8,23	11,50	4,70	62,99	99,41	26,57
Cobre	0,014	0,047	0,023	0,28	0,26	0,07
Chumbo	0,006	0,022	0,008	0,55	0,40	0,09
Cromo	0,008	0,06	0,05	0,62	0,28	0,06
Manganês	0,027	0,088	0,60	6,05	18,10	4,99
Magnésio	8,11	25,73	19,54	26,30	27,88	7,08
Níquel	n.e.	n.e.	n.e.	0,29	0,29	0,07
Zinco	0,18	0,38	0,17	1,66	0,98	0,33
Potássio	48,28	70,16	35,42	n.e.	n.e.	n.e.
Enxofre	7,34	9,38	9,06	n.e.	n.e.	n.e.
Sódio	3,59	8,47	5,14	n.e.	n.e.	n.e.
Boro	0,35	1,07	0,85	n.e.	n.e.	n.e.

-- abaixo do limite de detecção      n.e. não estudado

**Tabela 5.11.** Concentração de metais pesados (mg/g) encontrados em *E. crassipes* e concentrações aceitáveis para água e solo não-poluídos e a dose letal ( $LD_{50}$ ) para mamíferos (adaptado de PINTO-COELHO & GRECO, 1998).

Metal	<i>E. crassipes</i>	Água	Solo	$LD_{50}$
Arsênio	0,00014	0,0050	0,0907	0,0060
Cádmio	0,00092	0,0005	0,0029	0,0013
Mercúrio	0,00031	0,0001	-	0,0015
Chumbo	0,00789	0,0250	0,0655	0,0700
Zinco	0,06902	0,0600	0,1346	-

Analisando-se os dados da **tab. 5.10**, notam-se divergências entre os resultados individuais do presente trabalho e o de MORAES (1998), provavelmente pelos mesmos motivos já expostos no **item 5.1.3**, observando-se que por se tratar de estoque de substâncias químicas, existe também a influência das divergências entre os valores de *Bps* apresentados pelos dois autores (Cf. **tab. 5.03**).

Continuando com esta análise, observa-se que os quatro metais com maiores estoques, nas três espécies de macrófitas, encontrados no presente trabalho, são o **ferro**, o **cálcio**, o **manganês** e o **magnésio**, três dos quais também em mesma situação no trabalho de MORAES (1998), só divergindo no estoque de manganês. Neste trabalho também foram estudados mais três macro-nutrientes, com expressivos estoques: potássio, enxofre e sódio, além de mais um micro-nutriente, o boro, com baixa estocagem pelas macrófitas.

É importante destacar que para os quatro metais, com estoques mais expressivos, no presente trabalho, *E. crassipes* se mostrou a mais eficiente, seguida pela *B. arrecta* e em último lugar, pela *P. stratiotes*. O estoque de **ferro** em *E. crassipes* é praticamente igual em *B. arrecta* e 4,4 vezes maior que em *P. stratiotes*. Para o **cálcio**, estas relações são de 1,6 e 3,7, respectivamente; para o **manganês**, de 3,0 e 3,6 e, para o **magnésio**, de 1,1 e 3,9. Situação semelhante se observa para as substâncias químicas já destacadas no trabalho de MORAES (1998).

Comparando-se os dados de concentrações de metais em *E. crassipes* das **tab. 5.09** e **5.11**, para zinco, chumbo e cádmio, nota-se que os valores individuais são divergentes, por se tratar de reservatórios diferentes, porém, as relações entre os três metais são as mesmas, ou seja, *E. crassipes* se mostra mais eficiente na concentração de zinco, depois em chumbo e, por último, em cádmio. Analisando-se a dose letal (LD<sub>50</sub>) para mamíferos, tanto o cádmio quanto o chumbo se apresentam em concentrações acima das

aceitáveis, nas três macrófitas aquáticas do reservatório de Salto Grande. No entanto, é necessário analisar melhor este parâmetro, antes de se emitir uma opinião conclusiva sobre o nível de toxicidade e periculosidade destas plantas.

Os resultados obtidos permitem avaliar a capacidade das macrófitas em estocar nutrientes e metais, tendo, portanto, importante papel na remoção e degradação dos elementos químicos. Segundo alguns autores, a eficiência de assimilação de metais varia de 68% a 80% em áreas alagáveis construídas, envolvendo processos de adsorção, precipitação, sedimentação e absorção (KANTAWANICHKUL & ANH, 1998). Tal fato tem justificado o manejo de áreas alagadas naturais e a construção de alagados artificiais como forma de remoção de materiais oriundos das atividades antropogênicas, como amplamente discutido por FERREIRA (2000).

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Neste item são apresentados e comentados os resultados dos ensaios de classificação do solo, da determinação de seus índices físicos, além da caracterização física do barro, ou seja, da mistura de solo com biomassa e água.

### 5.2.1 Caracterização e classificação do solo

Neste subitem são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física (**teor de umidade natural** e **massa específica aparente, em estado solto**) e química do solo (**concentração e acumulação, ou estoque, de nutrientes e metais** e **potencial hidrogeniônico - pH**), não normalizados. Também são apresentados os seguintes ensaios de classificação do solo (normalizados e usuais em mecânica dos solos): **composição granulométrica; consistência** (LL e

LP); **limite de contração**; **adsorção de azul de metileno**; e **classificação MCT** (mini-MCV e perda por imersão de solos compactados).

Não serão apresentados comentários mais aprofundados sobre os resultados dos ensaios de classificação do solo, por não se tratar do objetivo principal deste trabalho. Estes índices foram determinados apenas para uma melhor e mais completa caracterização do solo utilizado, facilitando futuras interpretações dos resultados deste trabalho, assim como comparações com outros tipos de solos que venham a ser utilizados com o mesmo fim, ou seja, produção de adobe. Cabe salientar que estes parâmetros de classificação fornecem indicativos sobre o comportamento do solo, em função das especificidades de cada um deles.

#### a) Umidade natural

Os resultados do ensaio de determinação do teor de umidade natural do solo ( $U_s$ ) foram calculados pela eq. (4.6) e são apresentados na **tab. 5.12**. O valor médio de três determinações,  $U_s = 27,92 \%$ , será adotado nos próximos cálculos.

**Tabela 5.12.** Teor de umidade natural do solo ( $U_s$ ).

Cápsula nº	tara T (g)	$M_{sU}$ (g)	$M_{s0}$ (g)	$U_s$ (%)
110	33,28	88,63	76,57	27,86
111	30,77	84,21	72,57	27,85
112	31,65	80,36	69,69	28,05
<b>média</b>				<b>27,92</b>

#### b) Massa específica aparente em estado solto

A determinação da massa específica aparente em estado solto, do solo úmido ( $r_{ap\ solo}$ ), já definida no **item 4.2.3**, e calculada pela **eq. (4.7)**, é apresentada na **tab. 5.13**. Para efeito de cálculos futuros, será considerado o valor médio de  $r_{ap\ solo} = 0,866 \text{ g/cm}^3$ .



**Tabela 5.13.** Massa específica aparente do solo solto e úmido ( $r_{ap\ solo}$ ).

	1ª det.	2ª det.	3ª det.	
$M_{s\ U}$ (g)	5.435	5.405	5.435	média
$\rho_{ap. solo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,868	0,862	0,868	0,866
Tara = 1.095 g				

Com este valor médio e  $U_s$ , calculou-se, pela eq. (4.8), a massa específica aparente do solo em estado solto e seco, obtendo-se  $r_{ap\ solo\ seco} = 0,624\ g/cm^3$

Este parâmetro será importante para o cálculo da acumulação de nutrientes e metais e na operação de conversão dos traços de volume para massa, no item 5.2.2.

### c) Concentração e acumulação de nutrientes e metais

Na tab. 5.14 são apresentados os valores de concentração ( $Conc_s$ , determinada em laboratório) e estoque por unidade de volume ( $Ev_s$ ) de nutrientes e metais no solo, calculado pela eq. (4.9). Como a amplitude das concentrações varia muito de uma substância a outra e os métodos de sua determinação fornecem resultados em unidades variadas, por exemplo, a concentração de fósforo ( $P-TOT$ ) é dada em  $mg/g$ ; a de nitrogênio ( $NKT$ ), em % e a dos metais, em  $mg/g$ , optou-se por expressá-las todas em  $mg/g$  (ou  $10^{-6}\ g/g$ ) para que pudessem ser agrupadas em uma mesma tabela. Além disso, expressando-se  $r_{ap\ solo\ seco}$  em  $g/m^3$ , tem-se o seu valor, do item anterior, igual a  $0,624 \times 10^6\ g/m^3$ , o que facilita o cálculo de  $Ev_s$ .

Para as concentrações de nutrientes e metais no solo, também não foram encontradas referências na bibliografia consultada, relativas à área de estudo, com a mesma metodologia nem o mesmo objetivo do presente trabalho. Apenas alguns autores, como FERREIRA (2000), apresentam resultados médios da concentração de nutrientes no sedimento da área

alagada (compartimento 1). No entanto, estabelecer comparações com estes resultados não faz muito sentido porque são situações bem diferentes, assim como comparar com trabalhos que analisam o solo do ponto de vista do interesse agrícola, inclusive, as unidades de medida dos parâmetros são diferentes, ou seja, no presente trabalho adotou-se a unidade de massa para as substâncias químicas em relação à unidade de volume do solo solto e seco ( $\text{g/m}^3$ ), enquanto que na área agrícola se expressam as concentrações em “*ppm*”. FERREIRA (op. cit.), por exemplo, estudou o sedimento, que é um local onde há grande precipitação e adsorção de nutrientes, principalmente em solos argilosos e com altos teores de matéria orgânica, como é o caso do sedimento deste reservatório, que apresentou teor médio de 5,75 %, segundo COELHO (1993).

**Tabela 5.14.** Concentração ( $\text{Conc}_s$ ) e estoque ( $\text{Ev}_s$ ) de nutrientes e metais no solo, relativo à massa de solo seco.

Substância	$\text{Conc}_s$ ( $\mu\text{g/g}$ )	$\text{Ev}_s$ ( $\text{g/m}^3$ )
<b>nutrientes</b>		
Fósforo	P-TOT <sub>s</sub> = 0,0111	<b>0,0069</b>
Nitrogênio	NKT <sub>s</sub> = 1.200	<b>748,80</b>
<b>metais</b>		
Ferro	1.493	<b>931,63</b>
Cádmio	15	<b>9,36</b>
Cálcio	3.103	<b>1.936,27</b>
Cobre	18	<b>11,23</b>
Chumbo	288	<b>179,71</b>
Cromo	246	<b>153,50</b>
Magnésio	926	<b>577,82</b>
Manganês	188	<b>117,31</b>
Níquel	77	<b>48,05</b>
Zinco	111	<b>69,26</b>

#### d) Potencial hidrogeniônico

Os resultados do ensaio de determinação do potencial hidrogeniônico do solo ( $pH$ ) estão apresentados na **tab. 5.15**.

**Tabela 5.15.** Potencial hidrogeniônico do solo, medido em água destilada ( $pH_{H_2O}$ ) e em solução de cloreto de potássio ( $pH_{KCl}$ ).

	1 <sup>a</sup> det.	2 <sup>a</sup> det.	3 <sup>a</sup> det.	Média $\pm$ s
$pH_{H_2O}$	4,91	5,23	5,08	<b>5,07 <math>\pm</math> 0,16</b>
$pH_{KCl}$	4,37	4,42	4,37	<b>4,39 <math>\pm</math> 0,03</b>

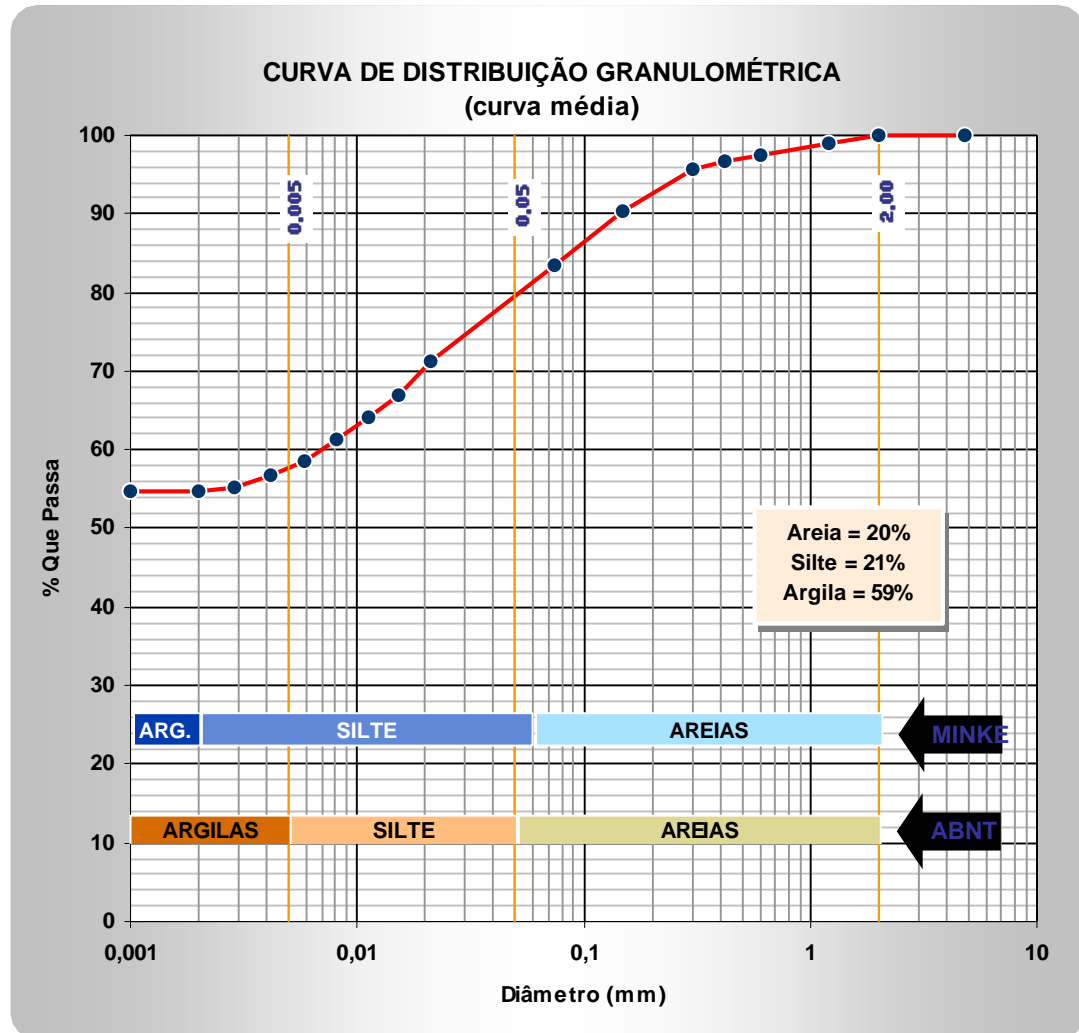
Pela **eq. (4.10)**, tem-se  $DpH = -0,68$ . Portanto, conclui-se que o solo possui capacidade de retenção de cátions e esse é um parâmetro muito importante, que tem grande influência na adsorção de nutrientes e metais, como já apresentado no **item 4.2.3**. Por exemplo, a acidez de um solo está associada à sua pobreza em bases permutáveis (Ca, Mg, K e Na) e à presença de matéria orgânica.

No caso do solo estudado, que se encontrava na linha d'água, seu valor de pH em contato com a água do local também fornece indicativos de seu comportamento, considerando-se que o pH médio desta água (margem esquerda do compartimento 3) variava entre 7 e 9, segundo LEITE (1998), e mais recentemente, na mesma época da extração do solo (março/2001), era de 6,59 (DORNFELD, 2002), notando-se a variação temporal e espacial deste parâmetro.

#### e) Composição granulométrica

A curva média de distribuição granulométrica do solo é apresentada na **fig. 5.02**. Os resultados completos de três determinações deste ensaio são apresentados no **ANEXO A**, sendo que para este ensaio é necessário antes se fazer a determinação da massa específica dos sólidos ( $g_s$ ), cujo resultado

foi  $g_s = 2,901 \text{ g/cm}^3$ .



**Figura 5.02.** Curva média de distribuição granulométrica do solo, com indicações dos limites segundo ABNT e MINKE (1995a).

A **fig. 5.02** mostra a distribuição, em porcentagem, das partículas do solo, quanto às suas dimensões, o que (pelo critério da ABNT) nos indica ser ele composto por 59% de argila ( $\phi < 0,005 \text{ mm}$ ), 21% de silte ( $0,005 < \phi < 0,05 \text{ mm}$ ) e 20% de areia ( $0,05 < \phi < 2 \text{ mm}$ ). Porém, esse é apenas um dos critérios de classificação. Segundo VARGAS (1978), existem vários outros, sendo um deles apresentado na mesma figura.

Como já afirmado anteriormente, o conhecimento da fração argila do solo é importante, não somente para sua classificação mas, também, para auxiliar

na compreensão do seu comportamento, na presença de metais e nutrientes.

#### f) Índices de consistência

Os ensaios de determinação dos índices de consistência, cujo relatório é apresentado no **ANEXO A**, forneceram os seguintes parâmetros:

- limite de liquidez,  $LL = 41 \%$ ;
- limite de plasticidade,  $LP = 28 \%$ ;
- índice de plasticidade,  $IP = 13$ ;
- índice de consistência,  $IC = 0,97$ ; e
- índice de grupo,  $IG = 9$

Com estes parâmetros, o solo pode ser classificado como “**Argila rija, medianamente plástica**” e, segundo CAPUTO (1978), pela **tab.4.02**, como “**solo argiloso A-7-6 (HRB)**”, significando esta última classificação que o solo tem comportamento “*regular a mau*”, para fins de pavimentação.

#### g) Limite de contração

O ensaio de determinação do limite de contração, cujo relatório é apresentado no **ANEXO A**, forneceu os seguintes parâmetros:

- limite de contração,  $LC = 38 \%$ ; e
- grau de contração,  $C = 9 \%$ ;

Com estes parâmetros, o solo pode ser classificado como “**solo regular**”, no que diz respeito à compressibilidade, tendo em vista seu uso em pavimentação.

#### h) Adsorção de azul de metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno, ou avaliação do grau de atividade de argilo-minerais no solo, cujo relatório é apresentado no **ANEXO A**, forneceu os seguintes parâmetros:

- valor de azul,  $V_a = 19,6 \times 10^{-3} \text{ g/g}$ ; e
- coeficiente de atividade,  $CA = 33,2 \times 10^{-3} \text{ g/g}$

Com estes parâmetros, os argilo-minerais presentes no solo podem ser classificados como “**ativos**”, segundo FABBRI (1994), num sistema de classificação onde poderiam ser também “*pouco ativos*” ou “*muito ativos*”. Esta classificação dá indicações sobre a superfície específica das partículas coloidais do solo, o que também auxilia na previsão de seu comportamento no que diz respeito à adsorção de nutrientes e metais.

### i) Classificação MCT

O ensaio de classificação MCT do solo, que na verdade é composto por dois ensaios (mini-MCV e perda de massa por imersão de solos compactados), cujos relatórios são apresentados no **ANEXO A**, forneceu os seguintes índices:

- $c' = 1,65$
- $d'' = 100$
- $P_i = 92 \%$
- $e' = 1,04$

Com estes índices e o ábaco do sistema de classificação proposto por NOGAMI & VILLIBOR (1995), para solos tropicais, o solo pode ser classificado como “**solo argiloso laterítico (LG')**”. Este sistema de classificação, reconhecido internacionalmente, fornece indicativos bastante definidos sobre o comportamento mecânico do solo.

## 5.2.2 Características do barro

Neste item são mostrados os resultados dos ensaios realizados com o barro, ou seja, o solo misturado com a biomassa triturada e água, para a produção dos tijolos.

### a) Adequações e conversão dos traços

Inicialmente, havia se planejado trabalhar com os traços de 10, 20, 30, 40 e 50 %, em volume de biomassa triturada relativo ao volume de solo à umidade natural. No entanto, após os cálculos de massa específica aparente da biomassa triturada e seca (**item 5.1.2**), percebeu-se que poderia ser reduzido o volume de *Pistia stratiotes*, sem alterar significativamente o traço final em massa, com relação às outras duas macrófitas, já que também se dispunha de um volume menor desta macrófita. Dessa forma, mediu-se o volume total da biomassa picada de *P. stratiotes* e calculou-se o máximo que seria possível se utilizar em cada uma das cinco massadas, mantendo-se as proporções de 1/15, 2/15, 3/15, 4/15 e 5/15 deste volume total.

Por outro lado, durante o processo de preparação do barro, notou-se que a biomassa picada de *E. crassipes* se mostrou mais “dócil” que a de *B. arrecta*, ou seja, a primeira se incorporava com mais facilidade ao barro, ao passo que a segunda, mais “rebelde” (dura e com fragmentos pontiagudos), se mostrou menos “amigável”. Resumindo, foi possível se utilizar até 70% em volume de biomassa de *E. crassipes* mas, com a *B. arrecta* com os 50% já se tornou muito trabalhoso, produzido um barro com aparência muito crespa.

Na **tab. 5.16** são apresentados os traços relativos às várias massadas, em volume e em massa, calculados pela **eq. (4.12)**, considerando-se que:

- para a *B. arrecta*,  $r_{ap\ macr\ seca} = 0,067\ g/cm^3$ ;
- para a *E. crassipes*,  $r_{ap\ macr\ seca} = 0,069\ g/cm^3$ ;
- para a *P. stratiotes*,  $r_{ap\ macr\ seca} = 0,127\ g/cm^3$ ;
- para o solo,  $r_{ap\ solo\ seco} = 0,624\ g/cm^3$ ;

Para o controle, ou padrão de referência, foram realizadas duas massadas, **C1** e **C2**, uma no início da produção dos tijolos e outra no final, para que se pudesse treinar os operadores, que eram inexperientes. Foram adotados os

resultados dos tijolos produzidos apenas com a massada **C2**.

**Tabela 5.16.** Resumo dos traços em volume ( $T_V$ ) e em massa ( $T_M$ ).

ESPÉCIES	Traços em volume $T_V$ (%)					Traços em massa $T_M$ (%)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<i>B. arrecta</i>	10	20	30	40	50	1,07	2,15	3,22	4,29	5,37
<i>E. crassipes</i>	10	20	30	50	70	1,11	2,21	3,32	5,53	7,74
<i>P. stratiotes</i>	4,44*	8,88	13,33	23,33	33,33	0,90	1,81	2,71	4,75	6,78

\* para a *P. stratiotes*, os valores fracionados de  $T_V$  se devem ao fato de se ter utilizado 90 l de solo (como para todas as massadas) e múltiplos de 4 l de biomassa triturada.

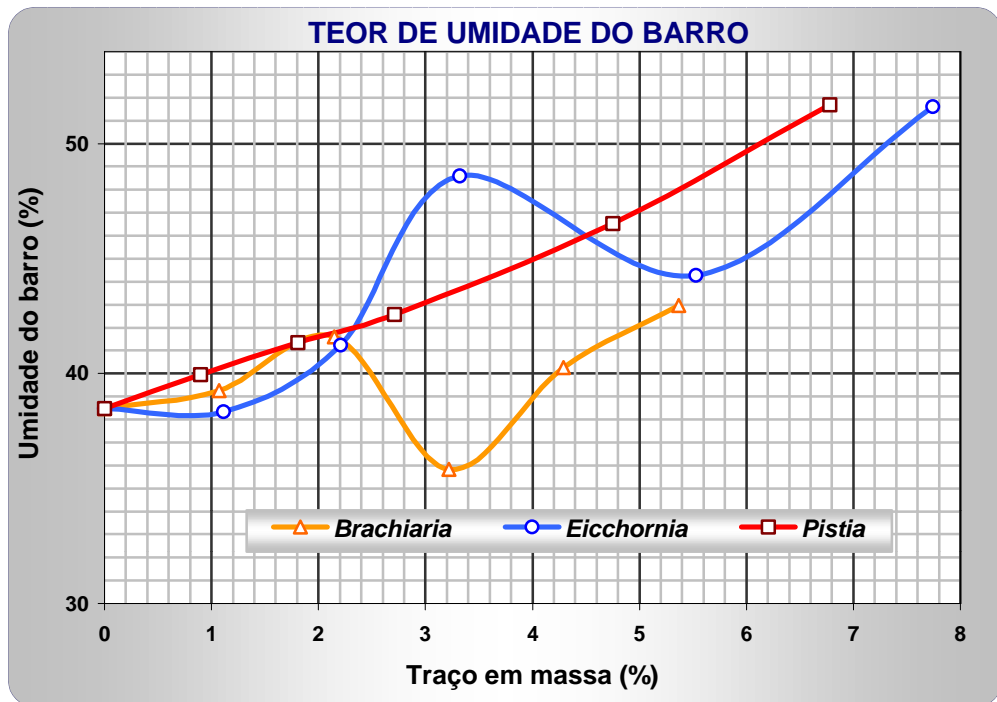
## b) Teor de umidade de amassamento

O resumo dos resultados dos ensaios de determinação do teor de umidade de amassamento do barro ( $U_b$ ), que foi calculado pela eq. (4.6b) (ANEXO A), estão apresentados na tab. 5.17. Os resultados completos destes ensaios estão no mesmo anexo. Para melhor visualização destes resultados, estes dados estão representados nas curvas da fig. 5.03.

**Tabela 5.17.** Resumo dos teores de umidade de amassamento do barro ( $U_b$ ), com indicação do traço em volume ( $T_V$ ) de cada massada.

		<i>Brachiaria arrecta</i>					
Massada	C2	B1	B2	B3	B4	B5	
$T_V$ (%)	0	10	20	30	40	50	
$U_b$ (%)	38,48	39,25	41,60	35,84	40,25	42,95	
		<i>Eichhornia crassipes</i>					
Massada	C2	E1	E2	E3	E4	E5	
$T_V$ (%)	0	10	20	30	50	70	
$U_b$ (%)	38,48	38,34	41,23	48,60	44,26	51,60	
		<i>Pistia stratiotes</i>					
Massada	C2	P1	P2	P3	P4	P5	
$T_V$ (%)	0	4,44	8,88	13,33	23,33	33,33	
$U_b$ (%)	38,48	39,96	41,34	42,57	46,53	51,67	





**Figura 5.03.** Curvas de variação do teor de umidade de amassamento do barro ( $U_b$ ) com o traço em massa ( $T_M$ ).

Observando-se estas curvas, nota-se o que já havia sido levantado na bibliografia, ou seja, que o acréscimo de fibras vegetais ao barro aumenta a necessidade de água de amassamento, já que a biomassa seca absorve mais água que o solo. As variações para traços em torno de 3 % se deveram ao fato de que não existe um padrão definido para a umidade de amassamento do barro, este parâmetro é um tanto quanto subjetivo, já que depende da sensibilidade e habilidade do operador, o qual decidirá, empiricamente, a melhor plasticidade e trabalhabilidade para o barro produzido naquele momento.

O elevado teor de argila também contribui com a necessidade de elevação do teor de umidade de amassamento, como pode ser notado em comparações com trabalhos desenvolvidos anteriormente (FARIA, 1998), onde foi analisada a influência do teor de argila sobre características de adobe, estudando-se solos com 14 (típico de Bauru-SP), 22, 30 e 38 % de argila. Um resumo destes resultados é apresentado na **tab. 5.18**, sendo os solos identificados por “2002(59)”, relativo ao presente trabalho, e “A(14)”,

“B(22)”, “C(30)” e “D(38)”, relativos ao trabalho citado, com o teor de argila entre parênteses.

**Tabela 5.18.** Teores de umidade de amassamento do barro ( $U_b$ ) para solos com diferentes teores de argila, indicados entre parênteses.

SOLOS (% argila)	A (14)*	B (22)*	C (30)*	D (38)*	2002 (59)**
$U_b$ (%)	18,0	18,4	19,9	23,6	38,5

\* dados de FARIA (1998); \*\* resultados do presente trabalho

Acerca da produção do barro, são pertinentes algumas observações, decorrentes do desenvolvimento do trabalho. Por exemplo, notou-se que o barro sem biomassa (massadas C1 e C2), se mostrou de difícil amassamento, era muito pegajoso nas botas, o que tornou o pisar muito pesado. Na expressão popular, a argila deixa o barro com muita “liga”. À medida que foram sendo aumentadas as quantidades de biomassa, de uma forma geral, esta operação se tornou mais leve.

Sobre o uso da biomassa de *B. arrecta*, observou-se que o melhor traço para se trabalhar foi o **B3**, onde houve uma melhor integração entre biomassa e solo. Já para o traço **B5** foi encontrada muita dificuldade para o amassamento e, principalmente, para a moldagem dos tijolos sem “bicheiras” (grandes espaços vazios), devido à “rebeldia” dos fragmentos de biomassa. Para todos os traços, houve produção de odores, durante o repouso do barro e nos tijolos frescos. Talvez, para se contornarem estas dificuldades, seja recomendado na prática que se umedeça a biomassa picada, após medí-la e antes da sua mistura ao solo.

Sobre a biomassa de *E. crassipes*, observou-se que a sua incorporação ao solo foi excelente e fácil, possibilitando inclusive o acréscimo de volume, nos últimos traços (como já comentado anteriormente). Tanto o amassamento quanto a moldagem dos tijolos, foram facilitados pela “docilidade” da biomassa picada. Porém, também houve produção de odores.

A biomassa de *P. stratiotes* foi a de melhor incorporação ao barro, aparentando inclusive, que não surtiria efeito algum no produto final, o que surpreendentemente não se confirmou na análise final. Foi a que produziu o barro mais homogêneo e os tijolos com melhor acabamento superficial mas, por outro lado, foi a espécie que mais produziu odores, provavelmente pela liberação de nitrogênio amoniacal, já que além de ter sido a espécie que apresentou maior concentração de NKT (Cf. **tab. 5.07**), foi a que teve a sua biomassa reduzida a fragmentos menores, quase pó.

Outro fato que deve ser levado em consideração, foi o período de produção do barro e moldagem dos tijolos, numa época de muita chuva e conseqüente excesso de umidade relativa do ar, retardando a sua secagem e propiciando o desenvolvimento de bolor na sua superfície.

### c) Retrações linear e relativa

A retração do barro ao secar, foi medida nos corpos-de-prova (designada por **RL** – retração linear) e nos tijolos (designada por **RR<sub>m</sub>** retração relativa média), de acordo com o **item 4.4.2**. **RL** foi medida em “mm” mas, para efeito de comparação com **RR<sub>m</sub>** foi também calculada em “%”, dividindo-se **RL** pelo comprimento do corpo-de-prova (600 mm). O resumo dos resultados destes ensaios é apresentado na **tab. 5.19**, cujos resultados completos estão apresentados no **ANEXO B**.

Para melhor visualização destes resultados e comparações entre os mesmos, os dados da **tab. 5.19** estão representados graficamente nas curvas da **fig. 5.04**. Analogamente ao apresentado no item anterior, na **tab. 5.20** é apresentado um resumo destes resultados, em comparação com os trabalhos de FARIA (1998).