

4.1 - RESULTADOS – SIMULAÇÃO TEÓRICA E AFERIÇÃO DOS MODELOS EM CANANÉIA

O primeiro ponto a ser descrito encontra-se nas imediações da Base “Dr. João de Paiva Carvalho” do Instituto Oceanográfico (Figura 1.2). Em função dos dados descritos por Bonetti Filho (1995) e por Miranda (com. pessoal), este é o único ponto em que poderá ser feita uma comparação das características hidrodinâmicas antes e depois do rompimento da barragem do Valo Grande.

4.1.1 - ESTAÇÃO BASE: ANTES DO ROMPIMENTO DO VALO GRANDE

- EXPERIMENTO DE QUADRATURA (22/02/94)

Tabela 4.1 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx</i> <i>(m)</i>	<i>Largura</i> <i>(m)</i>	<i>Profundidade</i> <i>(m)</i>	$\frac{\overline{\Delta \rho}}{\Delta x}$ (kg m^{-4})	<i>Vazão</i> <i>($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)</i>
Quadratura em 18/02/94	3200	1000	6,9	0,00122	95

Para a aferição de diferentes modelos analíticos de velocidade longitudinal e salinidade a partir de dados experimentais dessas propriedades, é necessário que se estabeleçam valores para determinadas variáveis presentes na formulação matemática dos modelos; do contrário não se pode estimar a distribuição teórica das propriedades em questão, u e S . A fim de melhor comparar os resultados de cada modelo com o dado experimental, algumas variáveis foram mantidas constantes para um mesmo experimento, independentemente da solução utilizada. Na Tabela 4.1 encontram-se os valores que foram atribuídos às variáveis necessárias para a simulação do experimento de 22/02/94. Os parâmetros utilizados nos experimentos seguintes encontram-se nas respectivas Tabelas.

A variável “Fase Lunar” indica a data exata em que ocorreu o pico de quadratura ou sizígia na época do experimento a partir de DHN (1997; 1998; 1999); “Distância” representa a distância (Δx) entre as estações que foram utilizadas para o cálculo do gradiente longitudinal de densidade em questão; “Largura” significa largura da seção transversal; “Profundidade” é equivalente à profundidade média ao longo do ciclo de maré; “ $\frac{\Delta \rho}{\Delta x}$ ” denota o gradiente longitudinal de densidade; “Vazão” representa a descarga de água doce média ao longo do ciclo de maré considerado.

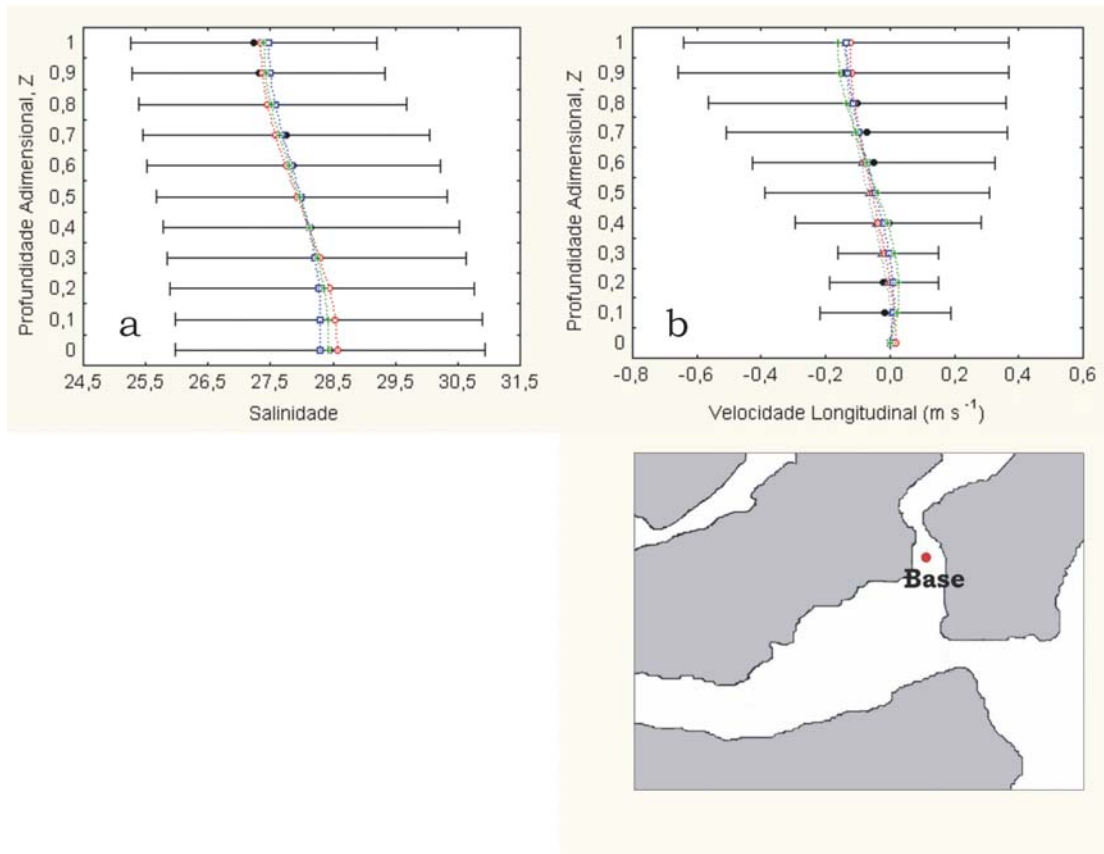


Figura 4.1 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e do componente longitudinal da velocidade (b) às condições experimentais • na estação Base antes do rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

O perfil vertical da salinidade experimental é quase uniforme na coluna de água, típico de estuários bem misturados (Figura 4.1.a). Como nessa época a barragem do Valo Grande limitava a influência da descarga fluvial Rio Ribeira de Iguape – fonte de água doce mais importante desse sistema – predominava sobre a região estuarino-lagunar uma baixa vazão de água doce proveniente apenas da bacia

de drenagem local¹. Dessa maneira, esse canal estuarino era forçado predominantemente pela maré. O desvio padrão da salinidade experimental ao longo do ciclo de maré mostra que, com 95 % de confiança, essa propriedade apresentou também pequena variabilidade ao longo da amostragem, entre 25,5 e 30,5.

As simulações teóricas dos perfis verticais de salinidade foram feitas com as soluções de Fisher *et al.* (1972), Miranda (1998) e Hansen & Rattray (1965), a partir das Equações 3.24 e 3.28 e 3.66, respectivamente. Os perfis teóricos que permitiram o melhor ajuste com os dados experimentais (Tabela 4.2), após alterados os coeficientes cinemáticos de viscosidade e difusão turbulentos, são apresentados comparativamente ao perfil experimental na Figura 4.1.a. Como se observa nessa figura, as simulações teóricas foram bastante semelhantes ao perfil experimental.

Os dados experimentais mostram que o componente longitudinal médio de velocidade (u) é unidirecional, com sentido sul (em direção à Barra de Cananéia) e com redução da intensidade em direção ao fundo (Figura 4.1.b). Essa estrutura de velocidade é característica de estuários bem misturados, nos quais a descarga fluvial tem uma influência menor sobre a circulação estacionária, que é dominada predominantemente pela maré. Entretanto, como o experimento foi realizado em quadratura - fase lunar de menor influência da maré – pode ter havido um equilíbrio entre essas forçantes (descarga de água doce e maré), o que acabou gerando velocidades médias elevadas para uma condição de pequena estratificação de S. O desvio padrão de u indica que, ao longo do ciclo de maré, houve uma variabilidade considerável principalmente nas camadas superiores, onde sua intensidade chegou a atingir $0,6 \text{ m s}^{-1}$ na vazante e aproximou-se de $0,4 \text{ m s}^{-1}$ na enchente. Já as porções inferiores foram caracterizadas pela simetria entre as velocidades de enchente e vazante, resultando em valores médios próximos de zero.

As simulações teóricas desse componente foram feitas com os modelos de Prandle (1985), Fisher *et al.* (1972)², Miranda (1998) e Hansen & Rattray (1965), de acordo com as respectivas Equações: 3.35, 3.37, 3.39, 3.46 e 3.47; 3.22; 3.26 e 3.65 e são apresentadas comparativamente ao perfil experimental. Assim como para S, as simulações foram bastante semelhantes entre si e com relação aos dados

¹ Conforme definido no Capítulo 1, denominou-se de bacia de drenagem local a região que não depende da Bacia do Rio Ribeira de Iguape, mas que deságua no complexo estuarino-lagunar de Cananéia.

experimentais. Para a obtenção dos melhores ajustes dos perfis teóricos aos experimentais, foram alterados os coeficientes de viscosidade turbulenta das soluções analíticas (Tabela 4.2). Vale lembrar que os coeficientes de viscosidade turbulenta dos modelos de Miranda (1998) e Prandle (1985) foram estimados a partir do coeficiente de arrasto de fundo “k” e posteriormente calculado o coeficiente propriamente dito, de acordo com a Equação 2.3.

Como dito no Capítulo 2, o componente w de velocidade só foi estimado para os experimentos de condição parcialmente misturada - cujo gradiente vertical médio de salinidade fosse superior a 5 unidades – o que não foi observado neste experimento.

Tabela 4.2 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ <i>escorreg.</i>)	<i>Miranda</i> (c/ <i>escorreg.</i>)	<i>Fisher et al.</i> (s/ <i>escorreg.</i>)	<i>Hansen</i> (s/ <i>escorreg.</i>)
<i>Velocidade</i>	0,91	0,92	0,95	0,96
<i>Longitudinal</i>				
<i>Salinidade</i>	-	0,98	0,99	0,98

As correlações entre cada resultado teórico com o experimental, tanto para u como para S , são apresentadas na Tabela 4.2. Vale lembrar que o modelo analítico proposto por Prandle (1985) não prevê solução teórica para a salinidade. Os valores dos coeficientes de correlação superiores a 0,6 indicam que os ajustes são estatisticamente consistentes.

Tabela 4.3 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (Az), $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e de difusão turbulenta (Kz), $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

<i>Az - Prandle</i>	<i>Az - Miranda</i>	<i>Az - Hansen</i>	<i>Kz - Miranda</i>	<i>Kz - Hansen</i>
25,3	25,3	50	20	10

² Em virtude dos resultados gerados pelos modelos unidimensional de Officer (1976; 1977) e bidimensional de Fisher *et al.* (1972) serem bastante semelhantes, optou-se pela apresentação apenas do último pois o mesmo apresenta resultados para o componente vertical da velocidade (w).

A distribuição vertical de u , representado por um movimento unidirecional de intensidade moderada, justifica os valores relativamente baixos para os coeficientes teóricos de viscosidade turbulenta. Já os coeficientes de difusão turbulenta proporcionalmente elevados são resultado da pequena estratificação vertical de S (Tabela 4.3).

EXPERIMENTO DE SIZÍGIA (05/12/91)

Tabela 4.4 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx (m)</i>	<i>Largura (m)</i>	<i>Profundidade (m)</i>	$\frac{\overline{\Delta\rho}}{\Delta x}$ ($kg\ m^{-4}$)	<i>Vazão ($m^3\ s^{-1}$)</i>
Sizígia em 05/12/91	3200	1000	5,8	0,000547	50

Assim como no caso anterior, a distribuição experimental de S é verticalmente uniforme, típica de condições bem misturadas (Figura 4.2.a). Entretanto, o efeito da maré de sizígia deve ter causado o deslocamento do perfil médio em direção a maiores valores de salinidade, já que uma maior quantidade de água de origem oceânica é advectada em direção à costa sob essa condição lunar. O desvio padrão da salinidade é praticamente constante ao longo da coluna de água, o que indica pequena variabilidade de S ao longo do experimento. Todas as soluções analíticas de S foram bem ajustadas ao perfil experimental.

Com relação ao experimento anterior, pode-se perceber uma maior influência do efeito baroclínico no perfil vertical de velocidade longitudinal. Isto se observa porque esse perfil já apresenta valores positivos nas camadas inferiores, o que indica a entrada de água de origem oceânica pela porção inferior do estuário (Figura 4.2.b). O desvio padrão da velocidade longitudinal tende a decrescer à medida que se aproxima do fundo, em função do atrito com o mesmo. Assim como para S , todas as soluções teóricas de u foram ajustadas com êxito ao perfil experimental de velocidade.

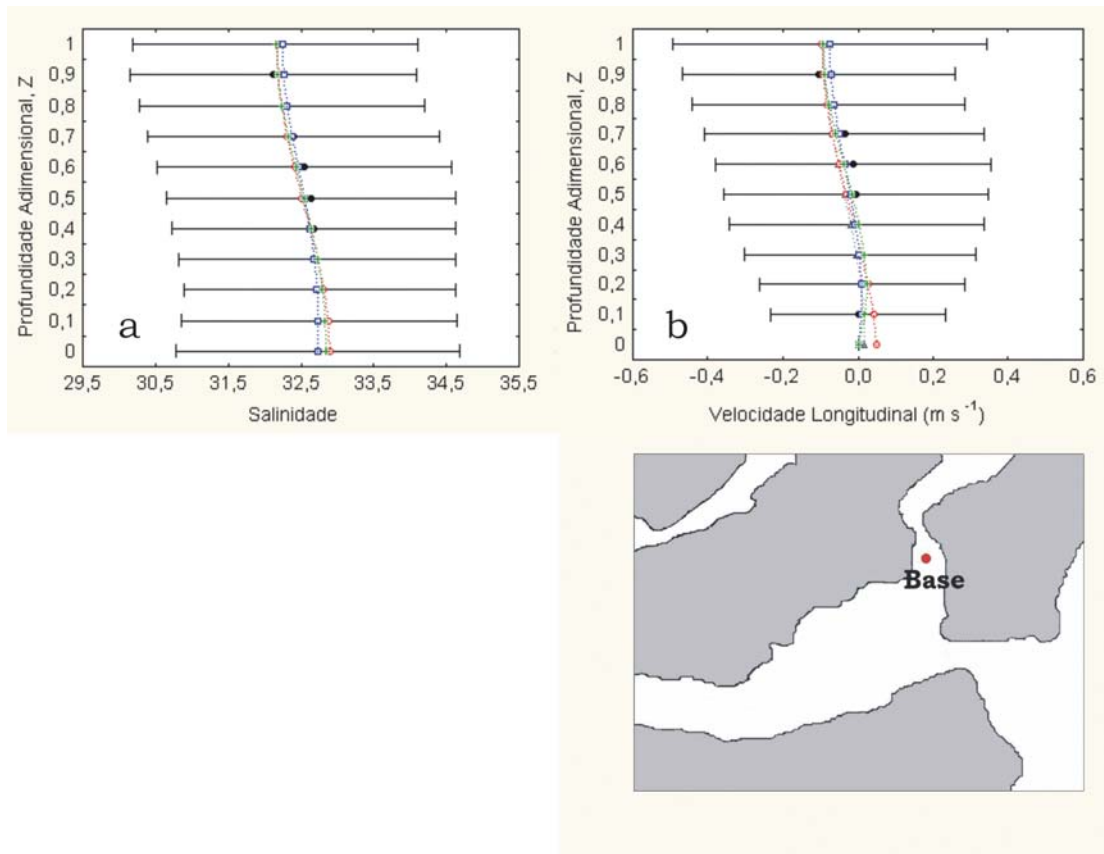


Figura 4.2 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e do componente longitudinal da velocidade (b) às condições experimentais • na estação Base antes do rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

Tabela 4.5 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ escorreg.)	<i>Miranda</i> (c/ escorreg.)	<i>Fisher et al.</i> (s/ escorreg.)	<i>Hansen</i> (s/ escorreg.)
<i>Velocidade Longitudinal</i>	0,88	0,86	0,93	0,94
<i>Salinidade</i>	-	0,94	0,97	0,96

A Tabela 4.5 indica que as correlações encontradas entre os resultados teóricos e experimentais também foram muito boas, em virtude principalmente das pequenas variações na distribuição vertical tanto de u , como de S experimentais em toda a coluna de água.

Tabela 4.6 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (A_z), $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e de difusão turbulenta (K_z), $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

<i>A_z - Prandle</i>	<i>A_z - Miranda</i>	<i>A_z - Hansen</i>	<i>K_z - Miranda</i>	<i>K_z - Hansen</i>
9,3	7,7	5	6	4

Apesar de condições experimentais semelhantes às observadas no experimento anterior (Figura 4.1), os valores teóricos dos coeficientes turbulentos de difusão e de viscosidade apresentaram uma redução, que deve estar relacionada ao fato dos processos de mistura naquela região já estarem mais adiantados ao longo do experimento, resultando na redução dos coeficientes de mistura enquanto no experimento anterior os processos de mistura ainda promoviam a homogeneização da coluna de água, portanto necessitando de valores mais elevados dos coeficientes de mistura (Tabela 4.6).

Quando comparados aos valores experimentais obtidos por Mesquita *et al.* (1992) a partir do mesmo conjunto de dados utilizados nesta análise, os coeficientes teóricos de viscosidade turbulenta reproduziram valores bastante próximos. Os resultados experimentais indicaram valores entre $0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a profundidade de 0,01 m acima do fundo, enquanto os resultados teóricos indicaram coeficientes médios para toda a coluna de água de $9,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Modelo de Prandle, 1985), $7,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Modelo de Miranda, 1998) e $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Modelo de Hansen & Rattray, 1965). Se considerado que os valores dos coeficientes de mistura podem aumentar nas porções médias da coluna de água, então os valores teóricos, em primeira aproximação, representaram bem as condições experimentais.

EXPERIMENTO DE SIZÍGIA (17/08/93)

Tabela 4.7 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx (m)</i>	<i>Largura (m)</i>	<i>Profundidade (m)</i>	$\frac{\overline{\Delta \rho}}{\Delta x}$ (kg m^{-4})	<i>Vazão ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)</i>
-------------------	--	------------------------	-----------------------------	--	---

A distribuição experimental de S também indica pequena estratificação vertical dessa propriedade ao longo do experimento. Em função disso, as diferentes soluções teóricas foram bem ajustadas às condições experimentais (Figura 4.3.a).

O perfil experimental de u nesse caso é típico de situações onde o efeito barotrópico da maré é predominante em detrimento da descarga de água doce, pois apesar da grande variabilidade dessa propriedade, o desvio padrão é bastante simétrico em torno da média (Figura 4.3.b). O fato do experimento ter sido realizado em sizígia, quando normalmente ocorrem as maiores intensidades das correntes de maré, e haver baixa descarga de água doce, estimado a partir de DAEE (1998) e corroborado pelo alto valor médio - em torno de 30,2 - e pouco variável da salinidade, resultaram em um perfil de velocidade com baixas magnitudes. Nessa estação foi observada a menor diferença entre as velocidades médias máxima e mínima, dentre todas as amostragens realizadas em Cananéia. Em função do atrito com o fundo, as velocidades das camadas inferiores sofreram redução na sua intensidade média.

As correlações entre os resultados teóricos e os obtidos em campo foram consideradas estatisticamente confiáveis a 0,95 se os valores fossem maiores do que 0,6. Nessa estação, tem-se uma das soluções de u com correlação de 0,58, o que indica que esta solução teórica não se adequou ao perfil experimental, enquanto as outras três também apresentaram baixas correlações, mas com valores estatisticamente aceitos (Tabela 4.8).

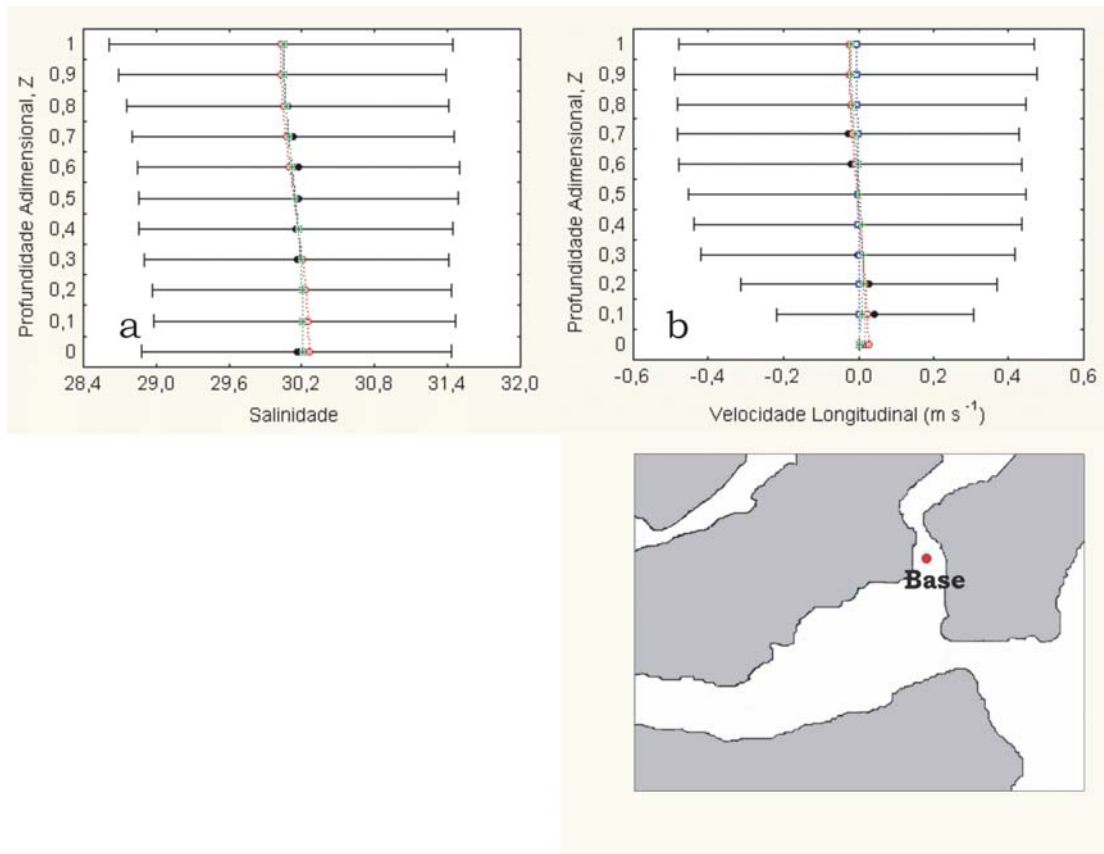


Figura 4.3 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e do componente longitudinal da velocidade (b) às condições experimentais • na estação Base antes do rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

Tabela 4.8 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ escorreg.)	<i>Miranda</i> (c/ escorreg.)	<i>Fisher et al.</i> (s/ escorreg.)	<i>Hansen</i> (s/ escorreg.)
<i>Velocidade Longitudinal</i>	0,69	0,70	0,65	0,58
<i>Salinidade</i>	-	0,85	0,89	0,88

Tabela 4.9 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (A_z), $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e de difusão turbulenta (K_z), $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

<i>A_z - Prandle</i>	<i>A_z - Miranda</i>	<i>A_z - Hansen</i>	<i>K_z - Miranda</i>	<i>K_z - Hansen</i>
8,5	12,8	9	0,5	6

Mais uma vez a grande homogeneidade tanto do perfil de velocidade longitudinal como de salinidade - típicas de estuários bem misturados - induziram

valores baixos para os coeficientes de viscosidade e de difusão turbulentos, respectivamente (Tabela 4.9).

4.1.2 - ESTAÇÃO BASE: APÓS O ROMPIMENTO DO VALO GRANDE

Os próximos experimentos foram realizados sob condições de rompimento da barragem do Valo Grande. Segundo Bérghamo (2000), a descarga de água doce proveniente do bacia de drenagem do Rio Ribeira de Iguape é, em média, em torno de uma ordem de grandeza maior do que no período anterior, o que acarretou em alterações nas características hidrodinâmicas da região.

EXPERIMENTO DE QUADRATURA (16/02/98)

Tabela 4.10 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx (m)</i>	<i>Largura (m)</i>	<i>Profundidade (m)</i>	$\frac{\bar{\Delta\rho}}{\Delta x}$ (kg m ⁻⁴)	<i>Vazão (m³ s⁻¹)</i>
Quadratura em 19/02/98	3200	1000	8,6	0,000572	1500

Diferentemente dos experimentos anteriores, foi observada nesse caso uma estratificação vertical significativa de S, em torno de 8 unidades entre a superfície e o fundo. Essa é, muito provavelmente, uma das conseqüências do aumento da descarga fluvial sazonal no sistema, além de chuvas durante a amostragem (Bérghamo, com. pessoal), e que ficou ainda mais realçada devido ao fato do experimento ter sido realizado durante um período de quadratura e no verão, quando o efeito da maré é menos pronunciado e quando as descargas são maiores, respectivamente (Figura 4.4.a). A configuração do desvio padrão mostra uma maior variabilidade de S experimental nas camadas mais inferiores da coluna de água, o que indica uma interação maior entre a descarga fluvial e a entrada de águas de origem marinha no sistema.

A alteração na distribuição vertical de S também se refletiu na aferição dos modelos teóricos, que começaram a apresentar diferenças entre si quando comparados ao perfil experimental.

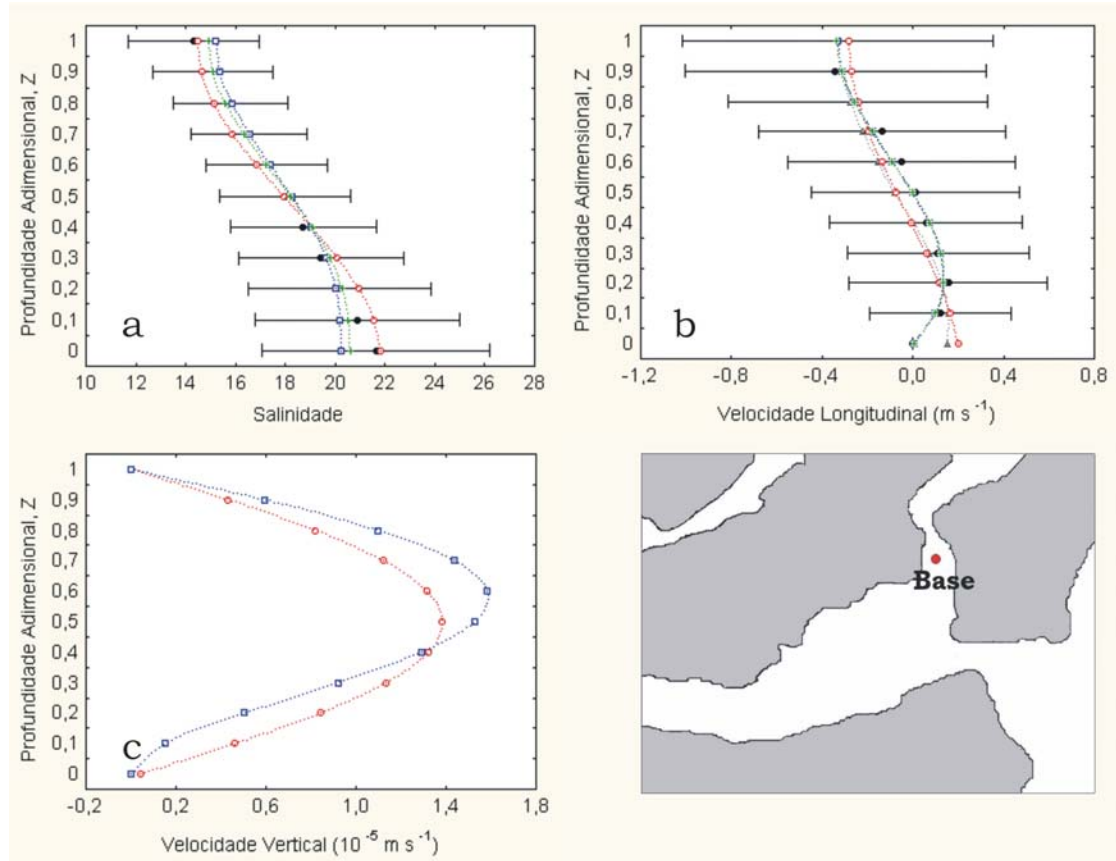


Figura 4.4 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e dos componentes longitudinal (b) e vertical (c) da velocidade às condições experimentais • na estação Base após o rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

Assim como no perfil de S , também foram observadas mudanças no comportamento de u . Dentre elas, destaca-se a presença de um movimento em duas camadas bem constituído, onde as camadas superiores têm sentido em direção à barra, enquanto as inferiores indicam velocidades em direção ao Mar Pequeno. A causa para a ocorrência de circulação gravitacional tão expressiva está relacionada ao aumento da descarga de água doce (Figura 4.4.b). A intensidade média de u é bastante acentuada, onde as velocidades médias de vazante aproximam-se de $0,4 \text{ m s}^{-1}$, enquanto a máxima intensidade de enchente atingiu $0,15 \text{ m s}^{-1}$. O desvio padrão de u é

considerável, o que sugere condições de grande variabilidade provavelmente associada à intensificação da descarga fluvial associada ao rompimento do Valo Grande.

A distribuição teórica do componente vertical de velocidade w foi calculada a partir das seguintes formulações: sem escorregamento no fundo (atrito máximo), de Fisher *et al.* (1972), que corresponde à Equação 3.23 e com escorregamento moderado, de Miranda (1998), cuja solução é dada pela Equação 3.27. A configuração do perfil teórico de w é apresentada na Figura 4.4.c, onde as duas soluções se mostraram bastante semelhantes, ambas com valores positivos. Tal padrão indica movimentos ascendentes, dando continuidade à circulação gravitacional, de acordo com a física desse tipo de estuário. Os valores de w em superfície são considerados nulos para as duas soluções, enquanto no fundo há duas condições de contorno: uma com atrito máximo e outra com atrito moderado. As maiores intensidades foram estimadas para o meio da coluna de água (Z entre 0,5 e 0,6), com valores máximos em torno de $1,4 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Os resultados teóricos foram muito bem ajustados aos dados experimentais (Tabela 4.11), o que mostra a eficiência dos modelos também na simulação de movimentos bidimensionais em estuários parcialmente misturados.

Tabela 4.11 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ escorreg.)	<i>Miranda</i> (c/ escorreg.)	<i>Fisher et al.</i> (s/ escorreg.)	<i>Hansen</i> (s/ escorreg.)
<i>Velocidade Longitudinal</i>	0,92	0,88	0,99	0,99
<i>Salinidade</i>	-	0,99	0,98	0,98

Neste caso, a mudança na hidrodinâmica da região para condições mais energéticas acabou por dificultar os processos de mistura, na medida em que movimentos típicos de circulação gravitacional, associados à uma haloclina bem constituída, representam uma barreira para a mistura entre as diferentes camadas de água. Com exceção do resultado gerado pelo modelo de Hansen & Rattray (1965), a consequência desse processo são baixos valores dos coeficientes de viscosidade e difusão, observados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (A_z), $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e de difusão turbulenta (K_z), $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

$A_z - Prandle$	$A_z - Miranda$	$A_z - Hansen$	$K_z - Miranda$	$K_z - Hansen$
5,6	8,5	350	6	3

EXPERIMENTO DE QUADRATURA (01/06/98)

Tabela 4.13 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx</i> (m)	<i>Largura</i> (m)	<i>Profundidade</i> (m)	$\frac{\overline{\Delta \rho}}{\Delta x}$ (kg m^{-4})	<i>Vazão</i> ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Quadratura em 01/06/98	3200	1000	7,5	0,000825	330

Realizado na época de baixa descarga de água doce, esse experimento apresentou valores de S mais altos do que o caso anterior (Figura 4.4.a). O perfil vertical de salinidade experimental apresentou uma haloclina bem pronunciada, cuja diferença entre a salinidade de fundo e a de superfície foi em torno de 12 (Figura 4.5.a). O desvio padrão de S denota pouca variabilidade dessa propriedade ao longo do ciclo de maré, principalmente nas proximidades do fundo. Como o experimento foi realizado em quadratura e sob condições de baixa descarga fluvial, também foram reduzidos os processos de mistura entre a água doce e a de origem marinha, o que ocasionou a pequena variabilidade dessa propriedade. As soluções teóricas de salinidade não reproduziram bem a estratificação vertical de S experimental (Figura 4.5.a).

De acordo com a Figura 4.5.b, o perfil experimental de u apresenta menores intensidades do que anteriormente (Figura 4.4.b). Também pode-se notar uma migração da camada de velocidade nula em direção à superfície, já que nesse caso esta camada encontra-se na profundidade adimensional (Z) de 0,8, enquanto no experimento anterior encontrava-se em $Z=0,5$. Ainda comparando-se em relação à situação anterior, observou-se nesse experimento uma maior simetria entre as máximas velocidades médias de enchente e vazante, $0,23 \text{ m s}^{-1}$ e $0,28 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. As condições experimentais de u foram reproduzidas com maior precisão pelas soluções teóricas que simularam escorregamento nulo no fundo.

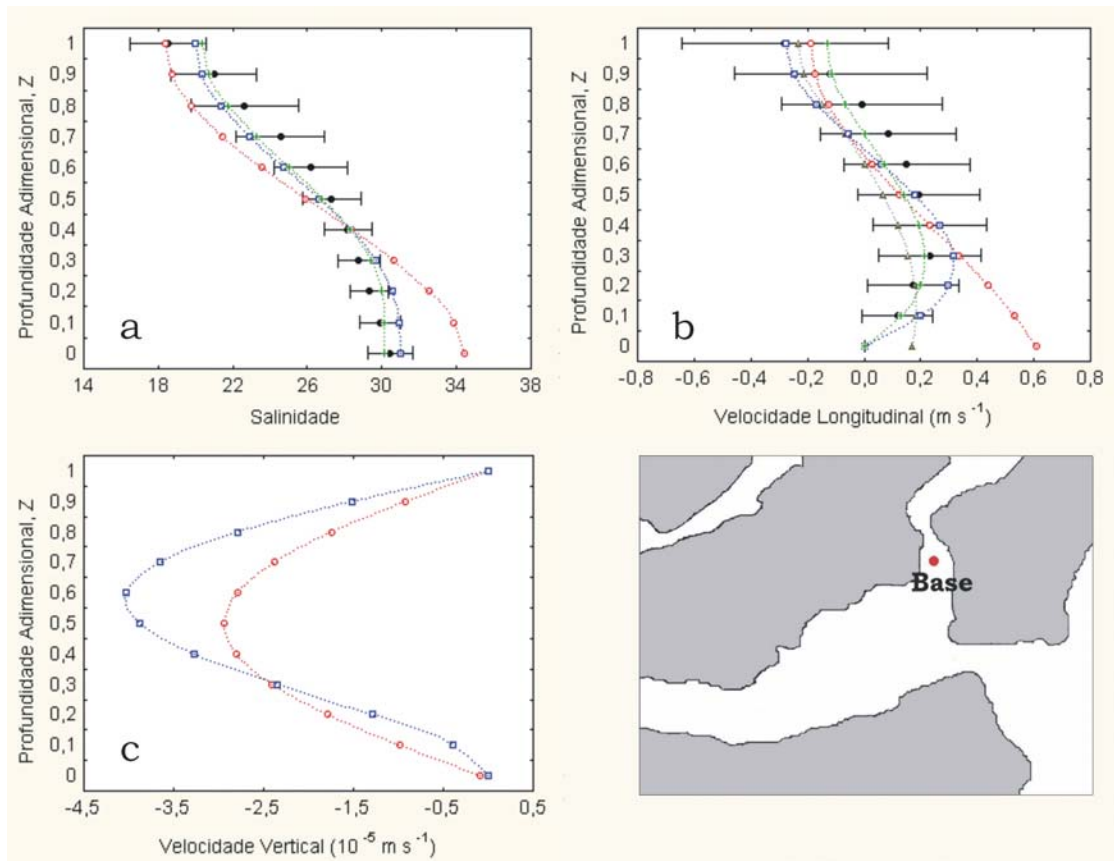


Figura 4.5 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e dos componentes longitudinal (b) e vertical (c) da velocidade às condições experimentais • na estação Base após o rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

Apesar de valores de w apenas um pouco mais altos em relação ao experimento anterior (Figura 4.4.c), o que deve ser ressaltado neste experimento são os valores negativos estimados para este caso (Figura 4.5.c). Esta característica sugere a presença de movimentos descendentes, o que pode ser explicado pelo fato de u nas camadas inferiores ser mais intenso, em média, do que a velocidade nas camadas superiores, além do sentido preferencial de u ser em direção ao interior do estuário. Em suma, para que seja mantida a condição de continuidade, como a velocidade nas camadas inferiores predomina quali-quantitativamente sobre os movimentos nas camadas superiores, há a necessidade de movimentos descendentes. O perfil teórico de w indica uma boa semelhança entre as duas soluções, onde a simulação sem escorregamento no fundo compensa esta condição de contorno com valores mais intensos para w , em torno de $4 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Tabela 4.14 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ escorreg.)	<i>Miranda</i> (c/ escorreg.)	<i>Fisher et al.</i> (s/ escorreg.)	<i>Hansen</i> (s/ escorreg.)
<i>Velocidade</i> <i>Longitudinal</i>	0,78	0,53	0,91	0,92
<i>Salinidade</i>	-	0,94	0,97	0,97

De acordo com a Figura 4.5.b e a Tabela 4.14, u experimental foi melhor correlacionada com as soluções teóricas que se valeram de atrito máximo no fundo, já que a velocidade em $Z=0,1$ vinha sendo atenuada quando comparada aos valores nas camadas superiores. Dentre as soluções teóricas que utilizaram condição de escorregamento no fundo, a de Miranda (1998) não apresentou resultado estatístico confiável (correlação inferior a 0,6). No caso de S também houve problema semelhante, porém só observado visualmente, já que as correlações atingiram valores bastante expressivos. Mais uma vez o considerável cisalhamento vertical de u experimental e a expressiva estratificação de S induziram os coeficientes teóricos de viscosidade e de difusão turbulentas a baixos valores (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (Az), $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e de difusão turbulenta (Kz), $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

<i>Az - Prandle</i>	<i>Az - Miranda</i>	<i>Az - Hansen</i>	<i>Kz - Miranda</i>	<i>Kz - Hansen</i>
17,6	5,3	6	2	3

EXPERIMENTO DE QUADRATURA (25/08/98)

Tabela 4.16 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx</i> (m)	<i>Largura</i> (m)	<i>Profundidade</i> (m)	$\frac{\bar{\Delta\rho}}{\Delta x}$ (kg m^{-4})	<i>Vazão</i> ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Quadratura em 30/08/98	3200	1000	7,7	0,00078	100

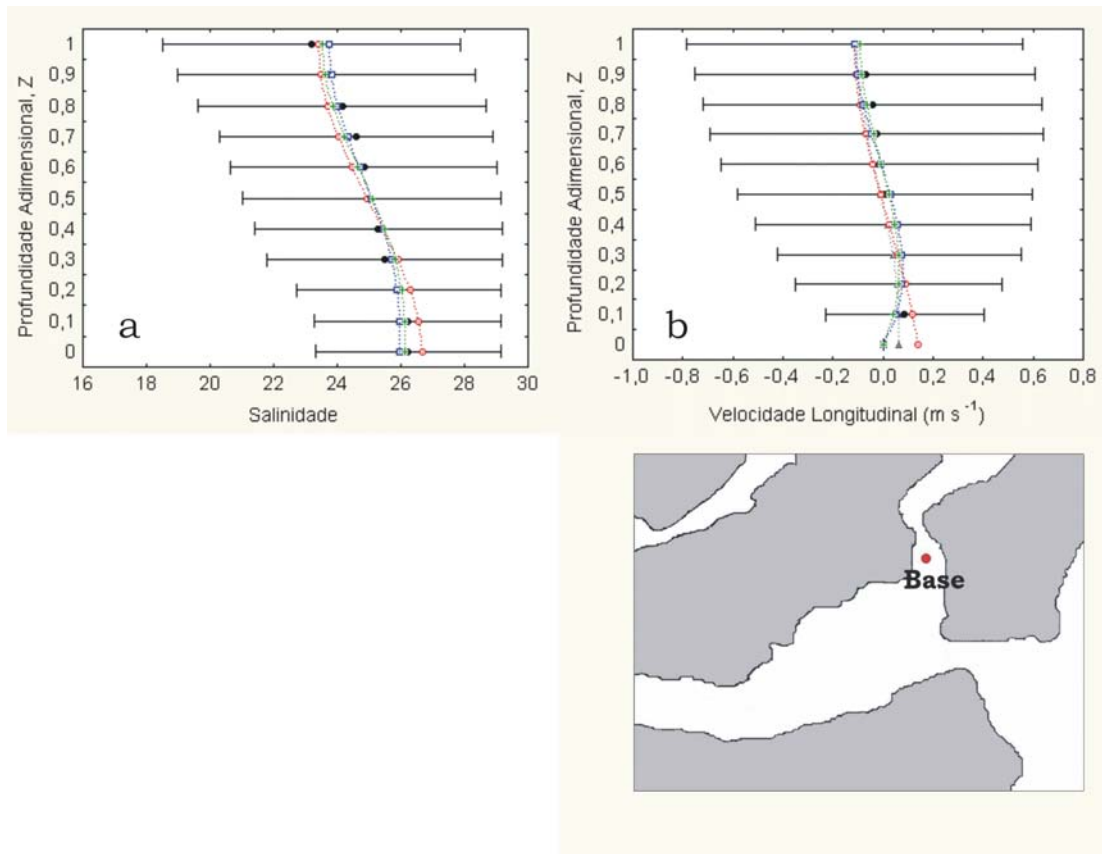


Figura 4.6 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e do componente longitudinal da velocidade (b) às condições experimentais • na estação Base após o rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

De acordo com Bérghamo (2000), agosto é o mês de menor descarga fluvial no sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape (Tabela 1.2). Essa baixa vazão faz com que a região sul do Mar de Cananéia passe a ser dominada pela maré, atenuando a estratificação vertical de salinidade. Esse mecanismo deve ter sido o responsável pelo perfil de S neste experimento (Figura 4.6.a). O desvio padrão de S também acompanhou a pequena estratificação vertical dessa propriedade. Os resultados teóricos foram bem ajustados às condições experimentais.

A Figura 4.6.b mostra que u também sofreu alterações na sua estrutura vertical em função da redução na descarga fluvial, onde um cisalhamento vertical mais tênue foi observado, apesar de mantido o padrão de circulação gravitacional. O desvio padrão de u mostra uma grande variabilidade ao longo do ciclo de maré ao atingir valores de até $0,8 \text{ m s}^{-1}$ na vazante e $0,6 \text{ m s}^{-1}$ na enchente. Entretanto, com o

predomínio da maré, as velocidades médias atingem valores bem inferiores: 0,11 m s⁻¹ na vazante e 0,08 m s⁻¹ na enchente.

Tabela 4.17 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ <i>escorreg.</i>)	<i>Miranda</i> (c/ <i>escorreg.</i>)	<i>Fisher et al.</i> (s/ <i>escorreg.</i>)	<i>Hansen</i> (s/ <i>escorreg.</i>)
<i>Velocidade Longitudinal</i>	0,90	0,83	0,96	0,91
<i>Salinidade</i>	-	0,97	0,97	0,97

Tabela 4.18 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (A_z), 10⁻⁴ m² s⁻¹, e de difusão turbulenta (K_z), 10⁻⁷ m² s⁻¹.

<i>Az - Prandle</i>	<i>Az - Miranda</i>	<i>Az - Hansen</i>	<i>Kz - Miranda</i>	<i>Kz - Hansen</i>
17,8	17,8	35000	5	8

De acordo com a Tabela 4.17, a correlação obtida entre os resultados experimentais e teóricos tornou a ser bastante boa, tanto para u , como para S . A análise da Tabela 4.18 sugere que a grande variabilidade de u ao longo do experimento (Figura 4.6.b) e a redução na estratificação vertical de S (Figura 4.6.c) intensificaram os processos de mistura, o que resultou para quase todas as simulações em aumento dos coeficientes de mistura em relação ao experimento anterior (Tabela 4.15). O aumento exagerado do coeficiente de viscosidade turbulenta do modelo de Hansen & Rattray (1965) deve estar associado à matemática do problema, e não deve estar tão diretamente relacionado à física do experimento.

EXPERIMENTO DE QUADRATURA (27/10/98)

Tabela 4.19 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx</i> (m)	<i>Largura</i> (m)	<i>Profundidade</i> (m)	$\frac{\overline{\Delta \rho}}{\Delta x}$ (kg m ⁻⁴)	<i>Vazão</i> (m ³ s ⁻¹)
Quadratura em 28/10/98	3200	1000	6,9	0,0012	550

O provável aumento na descarga de água doce nos meses de outubro e novembro em relação a agosto (Tabela 1.2) pode explicar a nova condição de

estratificação vertical de salinidade, com haloclina mais pronunciada, apresentando diferença de salinidade entre o fundo e a superfície por volta de 12 (Figura 4.7.a). O desvio padrão de S experimental indica pouca variabilidade dessa propriedade ao longo do ciclo de maré amostrado.

As soluções teóricas de S apresentaram um razoável ajuste com relação às condições experimentais. Cabe salientar que o cálculo da correlação requer, para que os resultados tenham maior confiabilidade estatística, um número mínimo (N) de 20 comparações. Para as correlações aqui calculadas, são comparados 11 pontos apenas (de $Z=0$ até $Z=1$) entre os dados experimentais e cada perfil teórico, seja de S ou de u . Em alguns experimentos – como é o caso da Figura 4.7.a - a correlação é um pouco superior ao que se observa visualmente nas figuras, ou seja, a correlação entre o perfil experimental de S e a solução teórica do modelo de Miranda (1998) é quase tão alta quanto a observada entre a condição experimental e as outras duas soluções, o que de fato não é verdadeiro. Entretanto, tal estimativa foi mantida para auxiliar na interpretação dos resultados.

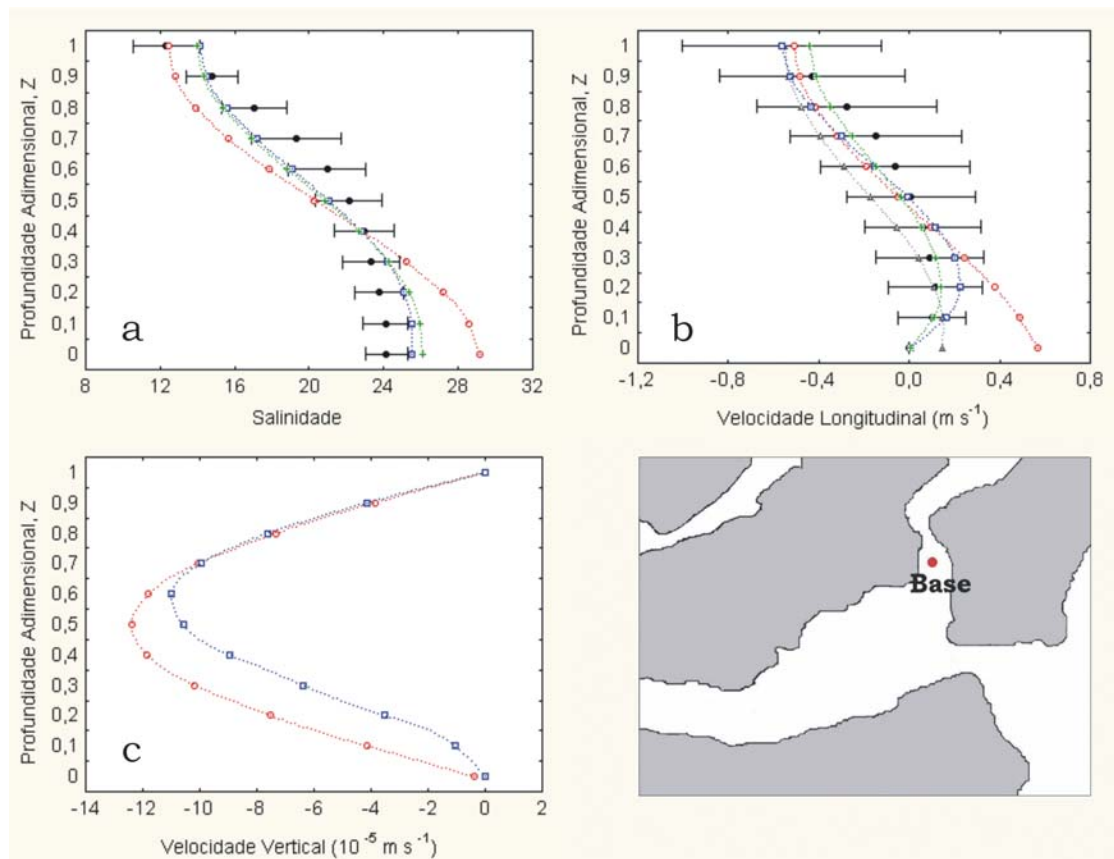


Figura 4.7 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e dos componentes longitudinal (b) e vertical (c) da velocidade às condições experimentais • na estação Base após o rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

Assim como a distribuição de S , u também retomou as características encontradas em situações de grande vazão, como no experimento de fevereiro de 1998 (Figura 4.4.b). O cisalhamento vertical dessa propriedade acentua-se bastante, e a velocidade média em superfície chega a ultrapassar os $0,4 \text{ m s}^{-1}$ em direção à barra (Figura 4.7.b). Mais uma vez, as soluções teóricas que propuseram escorregamento no fundo como condição de contorno não apresentaram bons ajustes com relação aos dados experimentais.

Os resultados teóricos do componente w da velocidade foram bastante semelhantes entre si. Entretanto contrariam a condição de continuidade na medida em que apresenta valores negativos, enquanto o esperado seriam valores positivos de w , pois a velocidade nas camadas superiores em direção à boca do sistema é mais intensa do que a velocidade nas camadas inferiores, que é em direção ao interior do estuário (Figura 4.7.c). Os valores de w neste experimento foram, inclusive, mais altos do que os observados nos experimentos de fevereiro e junho. Esses resultados foram apresentados por terem sido gerados pelas mesmas rotinas computacionais utilizadas nos outros experimentos, o que indica que as condições amostrais do presente experimento não se adequaram à formulação teórica utilizada.

Tabela 4.20 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ escorreg.)	<i>Miranda</i> (c/ escorreg.)	<i>Fisher et al.</i> (s/ escorreg.)	<i>Hansen</i> (s/ escorreg.)
<i>Velocidade</i>				
<i>Longitudinal</i>	0,89	0,84	0,96	0,96
<i>Salinidade</i>	-	0,91	0,95	0,94

Apesar de não comprometer os resultados, as simulações com escorregamento, ou com atrito moderado no fundo, apresentaram menores correlações com os dados experimentais (Tab 4.20).

Tabela 4.21 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (A_z), $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e de difusão turbulenta (K_z), $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

<i>A_z – Prandle</i>	<i>A_z - Miranda</i>	<i>A_z – Hansen</i>	<i>K_z – Miranda</i>	<i>K_z – Hansen</i>
5,9	4,2	20	6	2,8

De acordo com a Tabela 4.21, os coeficientes de viscosidade turbulenta gerados pelos modelos de Prandle (1985) e de Miranda (1998) são compatíveis com o aumento do cisalhamento vertical de u experimental em relação ao experimento anterior (Figura 4.6.b). Já os coeficientes de difusão turbulenta não sofreram uma redução significativa face ao aumento do gradiente vertical de S .

EXPERIMENTO DE SIZÍGIA (11/02/98)

Tabela 4.22 - Valores médios das variáveis utilizadas nos modelos.

<i>Fase Lunar</i>	<i>Distância - Δx (m)</i>	<i>Largura (m)</i>	<i>Profundidade (m)</i>	$\frac{\overline{\Delta \rho}}{\Delta x}$ (kg m^{-4})	<i>Vazão ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)</i>
Sizígia em 11/02/98	3200	1000	7,6	0,000182	1500

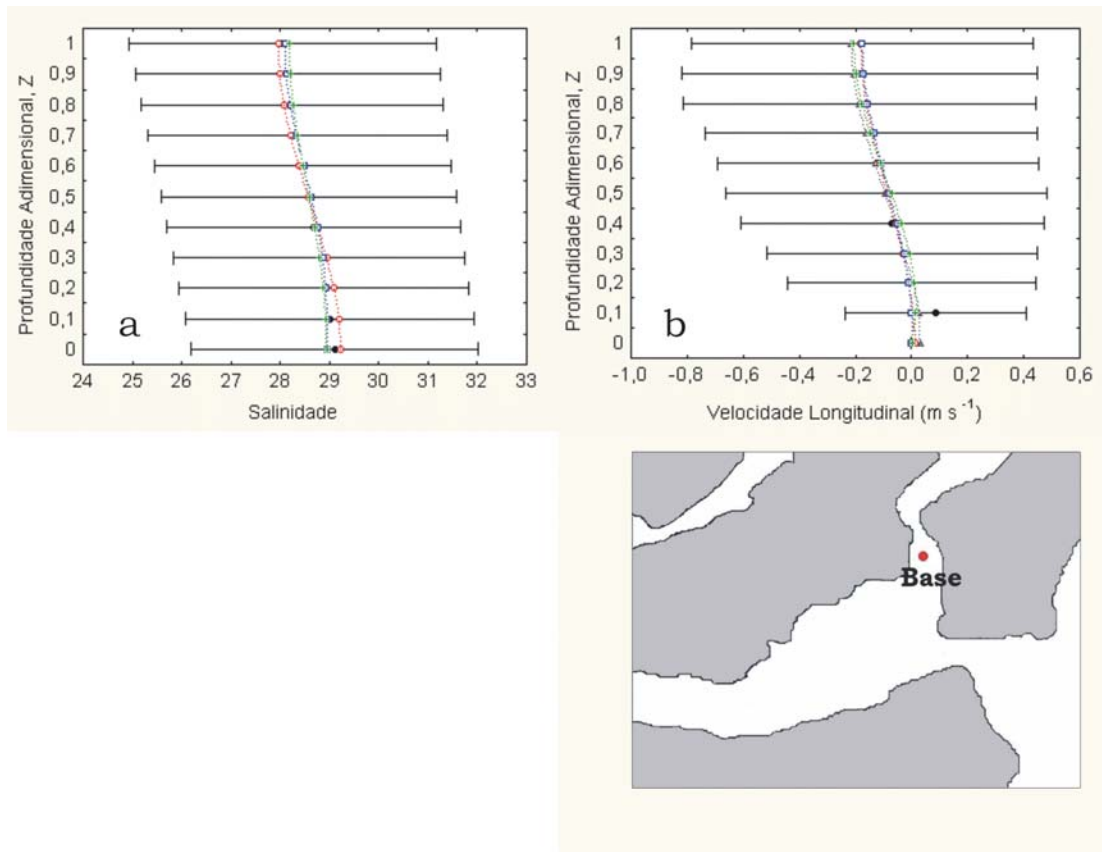


Figura 4.8 - Ajustes dos perfis teóricos de salinidade (a) e do componente longitudinal da velocidade (b) às condições experimentais • na estação Base após o rompimento do Valo Grande, a partir dos modelos de Prandle (1985) Δ com escorregamento de fundo, Miranda (1998) \circ com escorregamento no fundo, Fisher *et al.* (1972) \square sem escorregamento de fundo e Hansen & Rattray (1965) $+$ sem escorregamento de fundo.

A análise da Figura 4.8.a mostra que a estratificação vertical de S indica condições de grande homogeneidade e uma variabilidade uniforme ao longo da coluna de água. Os perfis teóricos de S foram muito bem ajustados às condições experimentais.

O perfil experimental de u indica um pequeno cisalhamento vertical dessa propriedade, cujo sentido preferencial foi em direção à Barra de Cananéia. Se comparado ao experimento de quadratura em fevereiro de 1998 (Figura 4.4.b), percebe-se que nesse houve uma redução na intensidade média de u (Figura 4.8.b). Esse padrão deve estar associado ao efeito da maré de sizígia que, ao reduzir a estratificação de S, atenuou a circulação gravitacional. Apesar da redução nos valores médios de u , o desvio padrão dessa propriedade nas duas situações foi bastante

semelhante. Os resultados dos modelos foram muito bem ajustados aos dados experimentais.

Tabela 4.23 - Correlações entre os resultados experimentais e teóricos com nível de significância de 0,95.

	<i>Prandle</i> (c/ <i>escorreg.</i>)	<i>Miranda</i> (c/ <i>escorreg.</i>)	<i>Fisher et al.</i> (s/ <i>escorreg.</i>)	<i>Hansen</i> (s/ <i>escorreg.</i>)
<i>Velocidade</i> <i>Longitudinal</i>	0,97	0,96	0,96	0,95
<i>Salinidade</i>	-	0,99	0,98	0,99

Os resultados teóricos apresentaram correlações muito boas, mesmo entre as diferentes condições de contorno no fundo (Tabela 4.23). Esse tipo de concordância tem ocorrido especialmente com os perfis com fraca circulação gravitacional, o que torna as soluções com e sem *escorregamento* no fundo bastante semelhantes (Figura 4.8.b). Essas diferenças são minimizadas principalmente para *u* experimental pois, em geral, as correlações entre *S* experimental e teórica são muito boas mesmo sob estratificações verticais mais intensas.

Tabela 4.24 - Valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de viscosidade turbulenta (*Az*), $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e de difusão turbulenta (*Kz*), $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

<i>Az - Prandle</i>	<i>Az - Miranda</i>	<i>Az - Hansen</i>	<i>Kz -</i> <i>Miranda</i>	<i>Kz - Hansen</i>
2,6	3,5	250	4,5	2

Apesar da redução na estratificação de *S* e no cisalhamento de *u* em relação ao experimento de fevereiro de 1998 em quadratura (Figura 4.4), os valores teóricos dos coeficientes cinemáticos de difusão e viscosidade turbulentos diminuíram neste experimento, o que sugere que tais alterações não sensibilizaram a resposta dos modelos, o que em última análise é expressa pelos valores dos coeficientes de mistura (Tabela 4.24).