

Medição dos Esforços nas Amarras das Embarcações em uma Eclusa de Navegação

Guilherme Ruschel Finger, Marcelo Giulian Marques e Paulo Kroeff de Souza

Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

guilherme_finger@hotmail.com, mgiulianm@gmail.com, pksouza@adufgrs.ufrgs.br

Recebido: 27/03/12 - revisado: 12/06/12 - aceito: 12/07/12

RESUMO

Estudos de viabilidade técnica e econômica das eclusas são indispensáveis, assim como de segurança das embarcações durante o processo de transposição de nível. O estudo dos esforços sobre as amarras das embarcações visa minimizar custos e garantir esta segurança através da identificação das situações de ocorrência dos esforços extremos sobre as amarras das embarcações, bem como dos fatores que interferem direta ou indiretamente. Foram realizados ensaios em modelo reduzido de escala 1:25, tanto durante processo de enchimento como de esvaziamento da câmara da eclusa, variando sua velocidade de enchimento/esvaziamento, bem como a composição dos comboios em transposição. Este trabalho apresenta medições de esforços em uma eclusa hipotética de alta queda com sistema de enchimento/esvaziamento hidrodinamicamente balanceado, construída no LAHE (Laboratório de Hidráulica Experimental) de FURNAS Centrais Elétricas, esperando identificar as situações críticas de ocorrência dos maiores esforços.

Palavras-chave – Amarras, Câmara, Eclusa, Esforços, Transposição.

INTRODUÇÃO

Com um grande potencial hidroelétrico formado por uma extensa rede fluvial, o Brasil é um dos países que mais utiliza hidrelétricas para geração de energia. Muitas vezes a utilização destas estruturas implica na construção de barramentos para que sejam atendidas as quedas de água necessárias para suprir a demanda energética. Esses barramentos provocam uma descontinuidade no leito do rio, tornando-os, neste trecho, não navegáveis. Em vista disto, tramita no Congresso Nacional o Projeto de Lei 209/2007, que poderá tornar obrigatório o uso de ascensores de barcos e navios, as chamadas Eclusas. Assim, este trabalho busca conhecer e sugerir técnicas para o projeto das mesmas, buscando maior eficiência e segurança na transposição dos desníveis.

O presente trabalho faz parte do projeto de Pesquisa & Desenvolvimento intitulado “Análise do comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação”, inscrito na ANEEL sob o código 0394-041/2006 para o ciclo 2005-2006 e desenvolvido pela parceria entre ELETROBRAS - FURNAS, o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Eclusas são obras de engenharia capazes de permitirem a transposição das embarcações, de forma segura e eficiente, pelo desnível de rios utilizados para navegação. Essas obras podem ser classificadas como baixa (até 9 metros de desnível), média (desníveis de 9 até 15 metros) e alta queda (desníveis acima de 15 metros). O projeto das eclusas de alta queda são os de maior complexidade. Diferentes sistemas de enchimento/esvaziamento são utilizados, sendo mais comumente adotados os do tipo hidrodinamicamente balanceados. O enchimento e esvaziamento da câmara da eclusa neste tipo de sistema são controlados por comportas tipo segmento invertido. Junto a essas obras identificam-se fenômenos de caráter hidráulico, como cavitação, turbulência e vibrações que podem vir a diminuir a segurança, eficiência e a vida útil da estrutura. Além disso, quando as perdas de energia não são simétricas no sistema de enchimento/esgotamento, a câmara da eclusa, onde ficam as embarcações, pode apresentar desníveis, gerando oscilações que se propagam pelo sistema, causando movimentação indesejada à embarcação.

As eclusas se constituem basicamente por uma câmara, acessos de montante e jusante, sistema de enchimento e esgotamento, sistema de distribuição e restituição, como pode-se visualizar pela Figura 1.

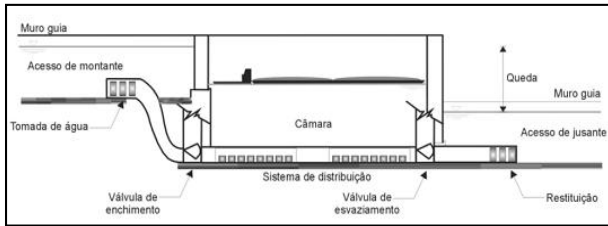


Figura 1 - Esquema da câmara de uma eclusa [1].

Dentre as maiores dificuldades no projeto e na operação dessas obras hidráulicas estão:

- ondulações no interior da câmara (segurança para as embarcações);
- esforços nas amarras (choque nas paredes e contra outras embarcações);
- altas quedas, que proporcionam altas velocidades no interior dos condutos e, conseqüentemente, a diminuição das pressões, favorecendo o fenômeno de cavitação.

Visando minimizar os riscos envolvidos na operação destas eclusas, alguns autores buscaram identificar as situações de ocorrência de esforços críticos nas amarras. Ussami [1980] aponta para a ocorrência dos esforços mais críticos durante o processo de enchimento da câmara, mais especificamente, durante o estágio inicial deste processo. Estudos recentes realizados por Roux [2010], em modelo reduzido, indicam que os esforços na direção longitudinal são superiores aos na direção transversal da embarcação.

De qualquer maneira, como forma de garantir a segurança das embarcações, em muitos países foram adotados limites máximos permissíveis nos esforços de amarração das embarcações durante a eclusagem, desconsiderando as diferenças pontuais.

Nos Estados Unidos, o desenvolvimento do critério de esforço máximo permissível foi baseado em testes de resistência de uma cordoalha de “manila” de 2,5 polegadas de diâmetro. Nestes testes foi concluído que um esforço máximo tanto longitudinal como transversal da ordem de 5,0tf pode ser considerado seguro. Muitos anos de observação em protótipo e de testes em modelos reduzidos têm mostrado que, quando uma eclusa é projetada para não ultrapassar os limites de esforços de amarração no modelo para as diferentes situações apresentadas a seguir, as condições de esforços no protótipo serão satisfatórias [USACE, 1975]:

- Comboio de empurra: para vários tamanhos

e número de chatas e qualquer posição do comboio na eclusa, os esforços de amarração não devem exceder a 5,0tf;

- Automotores de até 50.000t: os esforços não deverão ultrapassar 10,0tf;
- Automotores acima de 50.000t: os esforços máximos podem exceder a 10,0tf, desde que tenham mais linhas de amarração que as embarcações menores. Testes em modelo indicam que se forem atendidas as duas primeiras limitações acima, os esforços não excederão a 25,0tf em barcos de até 170.000t.

No Brasil, a extinta Portobrás vinha adotando o critério de esforço máximo resultante no modelo reduzido de 5,0tf. Estabelece, da mesma maneira, que estes esforços máximos não devam ultrapassar 1/600 do deslocamento da embarcação [Canholi, 1984].

De acordo com Canholi, (1984), na França e na Alemanha o esforço máximo aceito corresponde a 0,17% do deslocamento para embarcações de até 600t.

Na Holanda, dois pesquisadores apresentam diferentes critérios de esforços máximos permissíveis. Segundo Canholi, (1984), estes critérios são especificados conforme segue:

- embarcações de até 300t: esforços máximos de 0,15% até 0,20% do deslocamento ocorrido;
- embarcações entre 300t e 600t: esforços máximos de 0,15% do deslocamento;
- embarcações entre 600t e 1.000t: esforços máximos de 0,10% a 0,15% do deslocamento;
- embarcações entre 1.000t e 2.000t: esforços máximos de 0,10% do deslocamento.

Já os critérios apresentados por Kolkman, (1973) são:

- embarcações de 600t: esforços máximos de 1,2tf;
- embarcações de 1.200t: esforços máximos de 2,0tf;
- comboios de empurra com 4 chatas de 2.500t cada: esforços máximos de 8,0tf.

Os critérios de esforços limites não são uniformes, e como nota-se variam conforme o país em

que são aplicados. No leste europeu foram apresentadas as fórmulas de Michaljof (equação 1) e Semanov (equação 2), segundo Ussami, (1980) e Finger, (2009), que relacionam os máximos esforços (F_{max}) com o peso da embarcação (W).

$$F_{max} = 0,05 \cdot W^{3/5} \quad (1)$$

$$F_{max} = 0,30 \cdot W^{1/3} \quad (2)$$

Alfredini [2005], por sua vez, sugere a seguinte fórmula para estimar os esforços críticos nas amarras das embarcações, a qual relaciona os máximos esforços (F_{max}) com o peso da embarcação (W), a área transversal molhada da eclusa (F_e), a área transversal da seção mestra da embarcação (F_b) e a taxa de variação da vazão no tempo (dQ/dt):

$$F_{max} = 1,75 \frac{W}{g(F_e - F_b)} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

Metodologia

O sistema de medição de esforços foi montado na câmara da eclusa do modelo reduzido escala 1:25, localizada no Laboratório de Hidráulica Experimental LAHE/FURNAS, contando com sensores de força que mensuram os esforços instantâneos da embarcação contra uma haste vertical, nas direções transversal e longitudinal do modelo do comboio. Na disposição dos sensores fixados à embarcação, apresentada na Figura 2, nota-se que os sensores C1 e C2 medem os esforços exigidos no sentido transversal, enquanto C3 e C4 referem-se ao longitudinal.

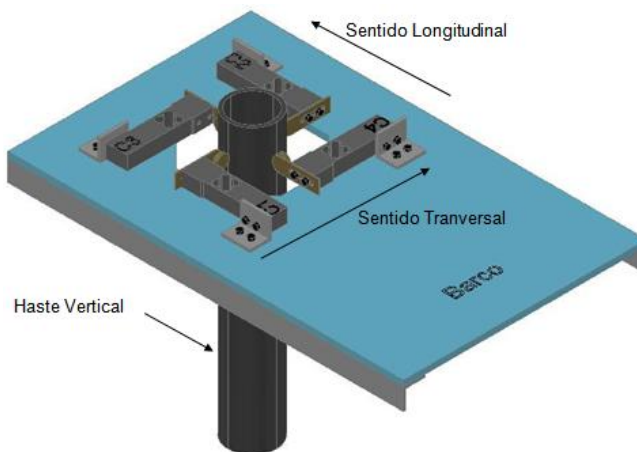


Figura 2 - Esquema de forças do sistema de medição.

Nos sensores são fixadas roldanas que permitem livre movimentação vertical, evitando o travamento do sistema quando dos processos de enchimento e esgotamento da câmara, e eliminando a liberdade de movimento horizontal. A Figura 3 mostra o sistema de medição instalado no modelo.

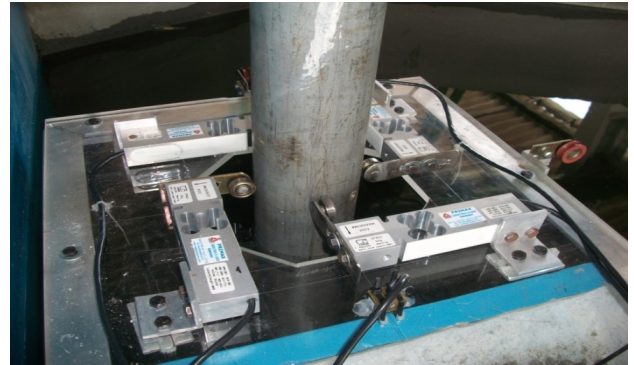


Figura 3 - Foto do sistema de medição instalado.

Na aquisição de dados para observação da linha d'água, foram instalados cinco piezômetros ao longo da linha central longitudinal da câmara da eclusa, conforme Figura 4.



Figura 4 - Posição dos piezômetros na câmara da eclusa.

A. Aquisição de Dados

Para os ensaios, as solicitações de força foram registradas por sensores modelo SP4C3-MR, da marca HBM. A Tabela I apresenta um resumo das especificações do transdutor utilizado.

Tabela I - Características técnicas do transdutor de força

	SP4C3-MR - HBM
Capacidade máxima	5,0 kgf
Sensibilidade	2,0 +/- 0,1% mV/V
Classe de precisão	C3
Faixa de excitação de tensão nominal	0.a.12 V

B. Característica dos Ensaios

Os ensaios foram realizados para os processos de enchimento e esvaziamento da câmara da eclusa com frequência de 10 Hz, tempo de aquisição de dados de 300 segundos e desnível máximo entre montante e jusante de 80cm, equivalente a 20m em protótipo. Para abertura das comportas dos condutos do sistema de enchimento e esvaziamento da câmara da eclusa, foi utilizada lei de abertura linear com velocidades de 0,178cm/s (4rpm), 0,267cm/s (6rpm), 0,311cm/s (7rpm), 0,356cm/s (8rpm), 0,711cm/s (16rpm), 1,422cm/s (32rpm) e 4,444cm/s (100rpm). A Tabela II mostra um resumo das condições de ensaio e uma comparação entre modelo e protótipo.

Tabela II - Características dos ensaios

Rotação do motor (RPM)	4	6	7	8	16	32	100
Tempo modelo (s)	90	60	51,4	45	22,5	11,3	3,6
Tempo protótipo (min)	7,5	5	4,3	3,75	1,9	0,94	0,3
Velocidade protótipo (m/min)	0,5	0,8	0,9	1,1	2,1	4,3	13,3
Velocidade de abertura da comporta modelo (mm/s)	1,8	2,7	3,1	3,6	7,1	14,2	44,4

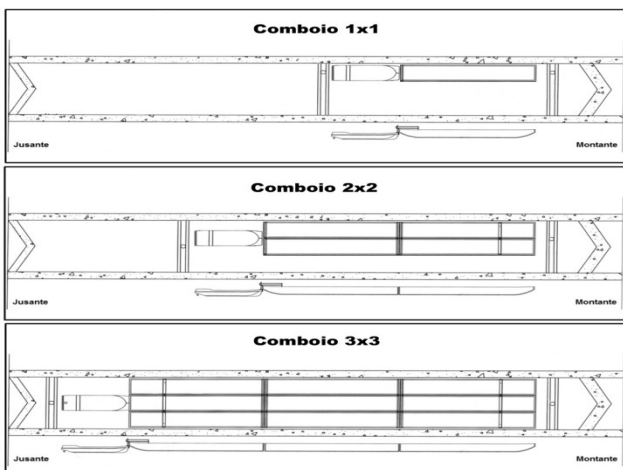


Figura 6 - Formato dos comboios na câmara 1x1, 2x2, 3x3.

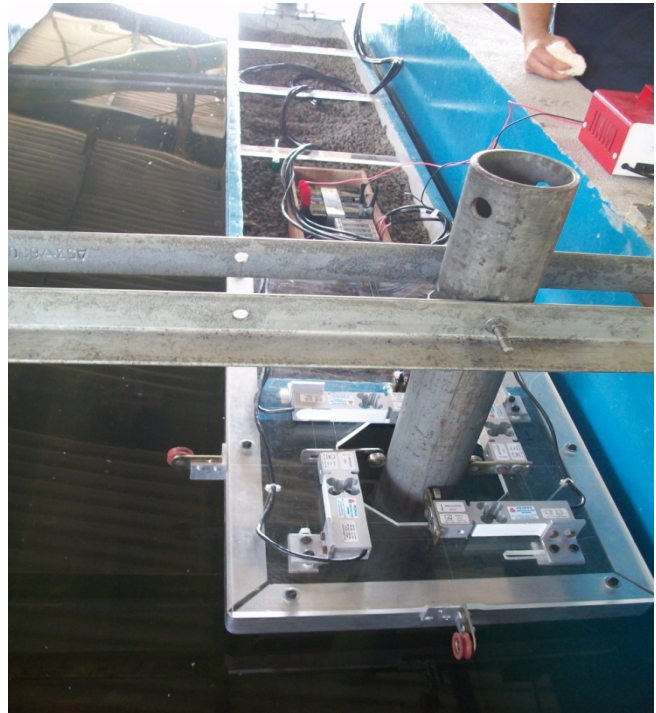


Figura 7 - Disposição do comboio 1x1 na câmara da eclusa.

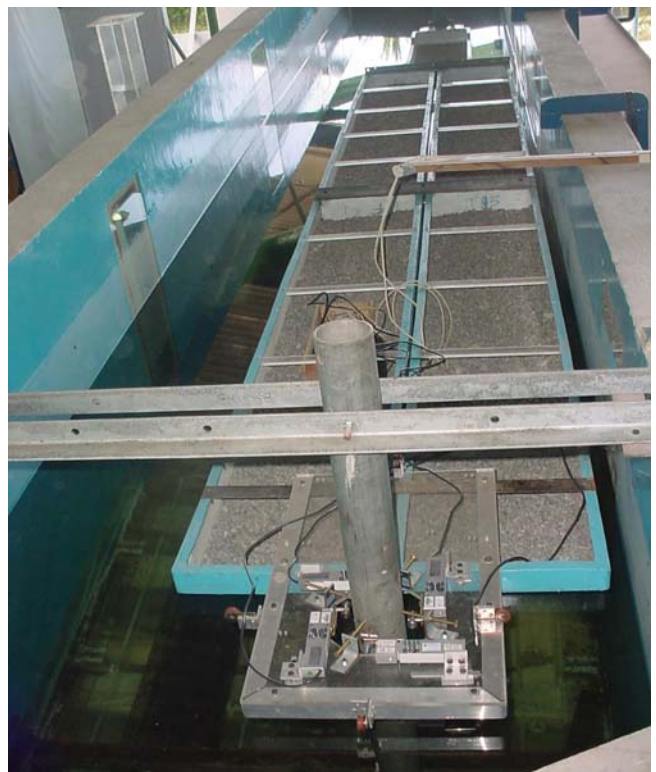


Figura 8 - Disposição do comboio 2x2 na câmara da eclusa.

Foram utilizadas nos ensaios três diferentes composições de comboio, com 1, 4 e 9 chatas, sendo estas chamadas de comboio 1x1, 2x2 e 3x3, conforme mostrado na Figura 6.

Durante a realização dos ensaios, a embarcação foi centralizada na câmara para comboios 3x3 e conforme variou o número de embarcações dentro da eclusa, sua posição foi mudando. Foram três as posições distintas de medição, uma para cada comboio, conforme Figura 7, Figura 8 e Figura 9, com os sensores de medição posicionados sempre no eixo central da embarcação.



Figura 9 - Disposição do comboio 3x3 na câmara da eclusa.

Para o tratamento dos dados coletados nos ensaios, foram utilizadas as relações de área, da câmara e dos comboios dentro da eclusa, e foram medidos os pesos para os três tipos de comboios ensaiados, que são apresentados na Tabela III e na Tabela IV, respectivamente.

Tabela III - Área dos comboios

Área da Câmara da Eclusa	13,58 m ²
Comboio 1x1	1,49 m ²
Comboio 2x2	4,51 m ²
Comboio 3x3	9,55 m ²

Tabela IV - Peso dos comboios

Peso da embarcação (kgf)	Comboio 1x1	Comboio 2x2	Comboio 3x3
Empurrador	29,94	29,94	29,94
Chatas do meio do comboio	-	-	482,63
Chatas das Extremidades do comboio	153,69	614,77	922,15
Total	183,63	644,70	1434,72

Resultados e Discussões

C. Análise dos Esforços Limites

Para a análise dos resultados obtidos foram utilizados os dados dos processos de enchimento e esvaziamento para diferentes velocidades de abertura das comportas, sendo comparados seus valores entre si e com a bibliografia existente. Nas tabelas V e VI é apresentada a comparação entre os esforços longitudinais e transversais, respectivamente, durante os processos de enchimento e esvaziamento da eclusa.

Importante realçar que em todos os ensaios realizados, tanto os esforços longitudinais como transversais, foram observados valores máximos maiores durante o processo de enchimento do que o de esvaziamento. Isto pode ser observado na quinta coluna das tabelas V e VI, onde a razão entre esforços medidos durante o enchimento com os durante o esvaziamento sempre resulta valor superior a 1,0.

Estes resultados comprovam os apontamentos realizados por Ussami [1980] de que os esforços mais críticos ocorrem durante o enchimento da câmara da eclusa.

Este fato pode ser explicado em função da dissipação de energia do escoamento, a qual ocorre dentro da câmara da eclusa durante o enchimento, enquanto que ocorre fora da eclusa durante o processo de esvaziamento.

Tabela V - Esforços longitudinais máximos medidos nos ensaios realizados.

Tipo de Comboio	Velocidade Abertura (rpm)	Esforços Longitudinais (gf)		
		Enchimento	Esvaziamento	Razão
1x1	4	479,04	179,94	2,66
1x1	6	358,99	218,40	1,64
1x1	7	409,18	276,61	1,48
1x1	8	475,41	408,05	1,17
1x1	16	507,64	250,42	2,03
1x1	32	459,90	409,14	1,12
1x1	100	734,10	410,35	1,79
2x2	4	795,03	753,28	1,06
2x2	6	772,32	344,80	2,24
2x2	7	780,55	391,15	2,00
2x2	8	810,33	292,63	2,77
2x2	16	1098,48	254,42	4,32
2x2	32	920,32	272,99	3,37
2x2	100	802,37	467,35	1,72
3x3	4	938,33	529,34	1,77
3x3	6	1029,07	605,88	1,70
3x3	7	876,80	423,39	2,07
3x3	8	994,07	377,69	2,63
3x3	16	1255,87	442,14	2,84
3x3	32	1218,41	418,18	2,91
3x3	100	1323,95	508,43	2,60

Na tabela VII é apresentada a comparação dos esforços máximos longitudinais com os transversais, obtidos nos ensaios de enchimento da câmara da eclusa, para os comboios 1x1, 2x2 e 3x3.

Comparando-se os esforços máximos longitudinais com os transversais, evidencia-se a maior relevância dos esforços longitudinais no dimensionamento dos esforços limites das amarras.

O sistema de medição construído é capaz de medir as forças longitudinais (FL) e transversais (FT), que seguem a orientação indicada na Figura 10, já a força resultante, que é utilizada no cálculo dos esforços limites das amarras, é calculada pela expressão (3), apresentada a seguir, onde C1 e C2 são os sensores que medem os esforços transversais, e C3 e C4, os que medem os esforços longitudinais.

$$F_R = \sqrt{(C_1 + C_2)^2 + (C_3 + C_4)^2} \quad (3)$$

Observe que os sensores da mesma direção são somados, pois estes sensores medem somente em um sentido, deste modo, estará sendo considerado somente o sensor deflexionado em seu sentido de medição.

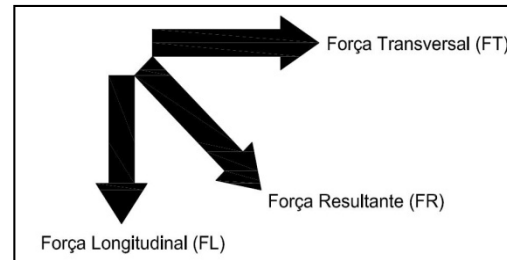


Figura 10 - Representação esquemática da direção das forças medidas.

Tabela VI - Esforços transversais máximos medidos nos ensaios realizados.

Tipo de Comboio	Velocidade Abertura (rpm)	Esforços Transversais (gf)		
		Enchimento	Esvaziamento	Razão
1x1	4	142,02	84,81	1,67
1x1	6	142,64	57,63	2,47
1x1	7	132,77	70,58	1,88
1x1	8	272,99	82,00	3,33
1x1	16	158,00	86,21	1,83
1x1	32	179,35	66,86	2,68
1x1	100	249,02	99,13	2,51
2x2	4	244,52	75,35	3,25
2x2	6	265,80	84,71	3,14
2x2	7	286,00	82,33	3,47
2x2	8	304,73	70,47	4,32
2x2	16	274,35	70,11	3,91
2x2	32	275,19	112,71	2,44
2x2	100	362,09	167,70	2,16
3x3	4	271,61	215,05	1,26
3x3	6	312,61	140,89	2,22
3x3	7	428,72	185,22	2,31
3x3	8	405,07	206,44	1,96
3x3	16	671,60	198,59	3,38
3x3	32	428,93	144,53	2,97
3x3	100	481,25	263,83	1,82

Tabela VII - Comparação dos esforços máximos longitudinais com os transversais medidos durante o processo de enchimento.

Tipo de Comboio	Velocidade Abertura (rpm)	Esforços (gf)		
		Longitudinais	Transversais	Razão
1x1	4	479,04	142,02	3,37
1x1	6	358,99	142,64	2,52
1x1	7	409,18	132,77	3,08
1x1	8	475,41	272,99	1,74
1x1	16	507,64	158	3,21
1x1	32	459,9	179,35	2,56
1x1	100	734,1	249,02	2,95
2x2	4	795,03	244,52	3,25
2x2	6	772,32	265,8	2,91
2x2	7	780,55	286	2,73
2x2	8	810,33	304,73	2,66
2x2	16	1098,48	274,35	4
2x2	32	920,32	275,19	3,34
2x2	100	802,37	362,09	2,22
3x3	4	938,33	271,61	3,45
3x3	6	1029,07	312,61	3,29
3x3	7	876,8	428,72	2,05
3x3	8	994,07	405,07	2,45
3x3	16	1255,87	671,6	1,87
3x3	32	1218,41	428,93	2,84
3x3	100	1323,95	481,25	2,75

A força resultante máxima (F_{RSmax}) e a força longitudinal máxima (F_{LSmax}) apresentam ordens de grandeza similares, como pode ser notado na Tabela VIII.

Tabela VIII - Relação Força máxima e Força resultante para ensaios de enchimento realizados com comboio 3x3

Rotação RPM	V (mm/s)	F_{LSmax}	F_{RSmax}
4	1,8	938,33	938,89
6	2,7	1.029,07	1.032,10
7	3,1	876,80	874,06
8	3,6	994,07	992,32
16	7,1	1.255,87	1.252,76
32	14,2	1.218,41	1.216,80
100	44,4	1.323,95	1.357,16

Os valores da força resultante máxima (F_{RSmax}) coincidem com os valores da força longitudinal máxima (F_{LSmax}), pelo fato de os esforços longitudinais máximos nunca coincidirem com os esforços

transversais máximos.

A Figura 11 apresenta a relação entre o esforço longitudinal máximo para o enchimento (F_{LSmax}) e o esforço resultante máximo de enchimento (F_{RSmax}), onde se pode observar que a relação F_{LSmax}/F_{RSmax} fica em torno de 1, por se tratar de forças de mesma ordem de grandeza.

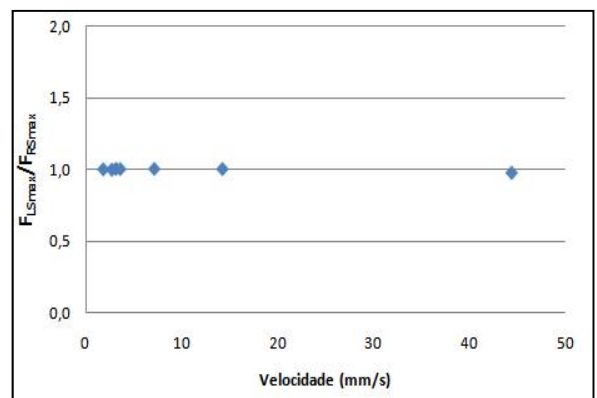


Figura 11 - Relação F_{LSmax} x F_{RSmax}

Analisando-se os esforços resultantes máximos de enchimento (F_{RSmax}) em função da velocidade de abertura da comporta, Figura 12, observa-se que os esforços:

- Aumentam com a velocidade de abertura;
- Estabilizam-se a partir da velocidade de abertura de 0,711 cm/s (16 rpm);
- Comboios de maior área e peso apresentam esforços maiores.

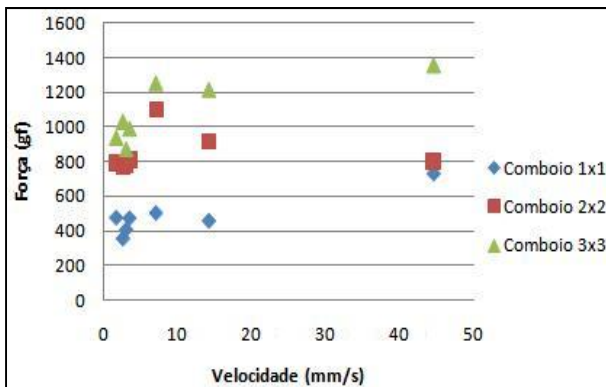


Figura 12 - FRSmax x Velocidade de abertura

Sendo o maior comboio (3x3) o de maior massa e área dentro da câmara, e que apresenta um maior esforço nas amarras, buscou-se uma relação entre estes parâmetros. Ussami [1980] apresentou as fórmulas (1) e (2) de onde se procurou extrair uma relação dividindo a força máxima resultante pelo peso dos comboios na câmara, como mostra a Figura 13.

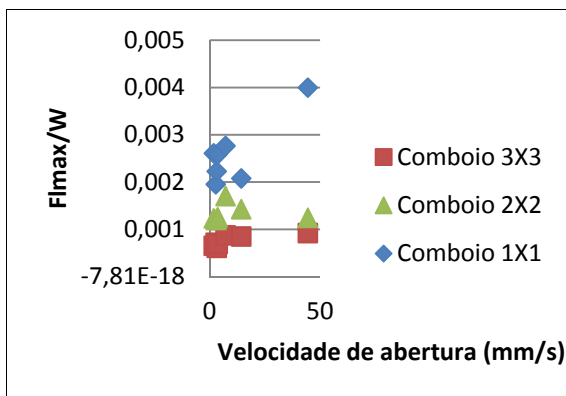


Figura 13 - Relação entre força resultante máxima e o peso do comboio.

Utilizando a equação (1) com os dados adquiridos dos ensaios, obteve-se a Figura 14. Os coefi-

cientes encontrados com os dados ensaiados foram inferiores ao utilizado por Michaljof, na ordem de 2 a 3 vezes.

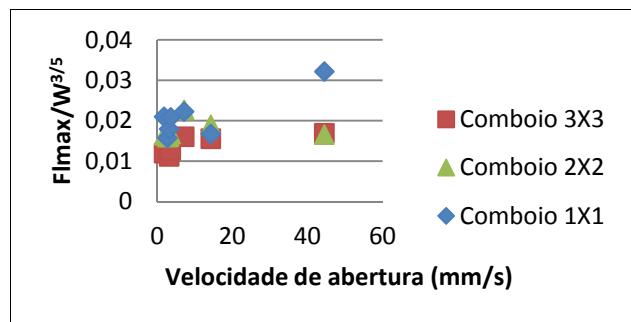


Figura 14 - Resultado com a relação proposta por Michaljof - equação (1).

Da mesma maneira, utilizando-se da equação (2) e dos resultados dos ensaios, encontrou-se coeficientes sempre menores que o utilizado por Semanov, na ordem de 2 a 5 vezes.

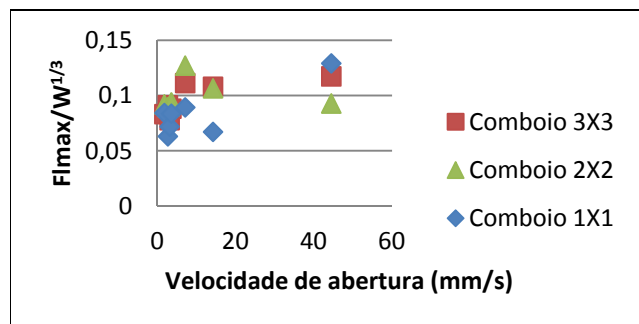


Figura 15 - Resultado com a relação proposta por Semanov – equação (2).

Os resultados destas duas fórmulas apontam para resultados dos ensaios da mesma ordem de grandeza dos utilizados por Semanov e Michaljof.

A Figura 16 apresenta a aplicação dos dados ensaiados na equação (3), gerando valores próximos aos dos esforços máximos medidos.

Comparando as fórmulas propostas e os dados apresentados nos gráficos, a relação esforço/peso mantém a mesma ordem de grandeza sugerida pelos autores para os dados analisados, o que confirma a relação proposta.

Na tentativa de também relacionar entre os parâmetros a área ocupada pelo comboio na câmara, Tabela IX, foi proposta uma nova equação (4) para os esforços limites, que podemos observar na Figura 17.

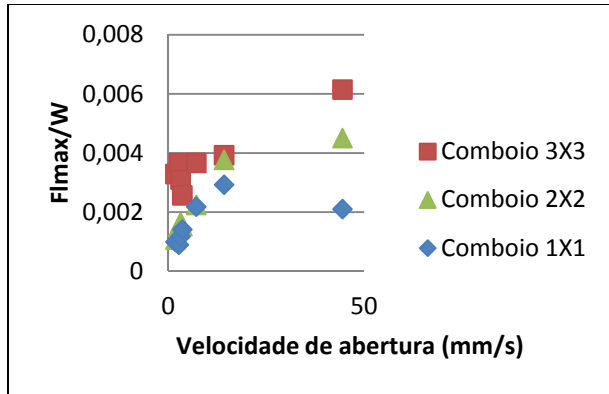


Figura 16 - Resultado com a relação proposta por Alfredini – equação (3).

Tabela IX - Relação entre área da câmara (Ac) e área dos barcos (Ab).

Comboio	Ab /Ac	Ac / Ab
1x1	0,11	9,13
2x2	0,33	3,01
3x3	0,70	1,42

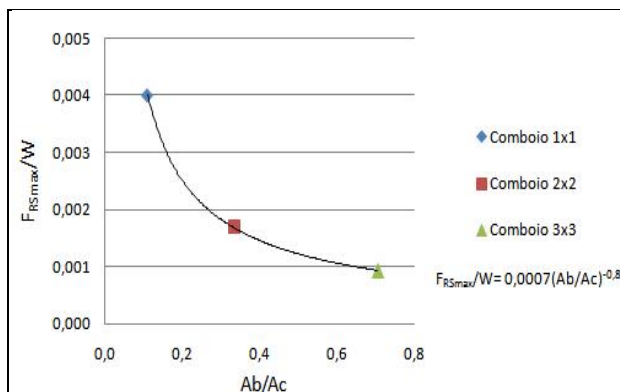


Figura 17 - Relação proposta entre esforço, peso do comboio e as áreas ocupadas.

$$\frac{F_{\max}}{W} = 0,0007 \cdot \left(\frac{A_b}{A_c} \right)^{-0,787} \quad (4)$$

CONCLUSÕES

Com a realização dos ensaios no modelo reduzido escala 1:25, construído no LAHE, foi possível confirmar a ocorrência de esforços críticos maiores

durante o processo de enchimento da câmara da eclusa do que durante o esvaziamento. Da mesma maneira, observou-se que os esforços máximos longitudinais são superiores aos esforços máximos transversais. Com o tratamento dos dados adquiridos, observou-se que a força longitudinal máxima de enchimento e a resultante máxima de enchimento têm relação igual a, aproximadamente, um, para todas as velocidades ensaiadas, permitindo a utilização dos esforços longitudinais máximos para fins de esforços limites, pois são as forças de maior magnitude.

A comparação com as equações de Michal-jof, Semanov e Alfredini demonstram que os resultados ensaiados em modelo reduzido estão compatíveis com os apontados na bibliografia. A relação existente entre os esforços máximos e área e peso das embarcações fica claramente evidenciada, sendo possível, inclusive, equacioná-la.

Os resultados aqui apresentados servem como comparação entre os métodos apresentados, validando os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados. Importante elucidar que este trabalho em nenhum momento visou esgotar as possibilidades de estudo sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- ALFREDINI, P. *Obras e gestão de portos e costas*. São Paulo: Blucher, 2005.
- BATTISTON, C. C. *Estudo do escoamento a jusante de válvulas de eclusa, visando à supressão de cavitação sem adição de ar*. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2008. Exame de qualificação.
- CANHOLI, A. P. *Alguns aspectos dos esforços de amarração no projeto hidráulico de eclusas de navegação*. 1984. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- FINGER, G. R. *Estudo dos esforços sobre as amarrações das embarcações em eclusas*. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KOLKMAN, P. A. *Low-head navigation locks door filling and emptying systems developed by hydraulic investigation*. Delft, Netherlands: Delft Hydraulic Laboratory, 1973. 14 p. (Publication, n. 111).

ROUX, S. Determination of Hawser forces models for the third set of Panama locks studies. In: PIANC MMX CONGRESS, Liverpool UK, 2010. *Proceedings...* Liverpool, 2010.

STOCKSTILL, R. Hydraulic design of lock culverts valves. In: U.S. Army Corps of Engineers Infrastructure Systems Conference, 2011, Atlanta. *Proceedings...* Atlanta: U.S. Army Corps of Engineers, 2011. EM 1110-2-1610. 1975

USSAMI, H. *Comportamento hidráulico dos sistemas de enchimento e esgotamento de eclusas de navegação*. 1980. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

Measurement of Hawser Forces Affecting Vessels in a Navigation Lock

ABSTRACT

Technical and economic feasibility studies on locks, as well as of vessel safety during level transposition procedures are essential. The studies of hawser forces aim at minimizing costs and ensuring this safety by identifying situations of extreme forces on vessel mooring ropes and factors that interfere directly or indirectly. Assays were performed on 1:24 scale models, during the filling and emptying process of the lock chamber varying the speed of filling / emptying and composition of barges. This paper presents measurements of forces in a hypothetical high drop lock with a hydrodynamically balanced filling / emptying system, built at LAHE (Hydraulics Experimental Laboratory), FURNAS, expecting to identify critical situations when the greatest forces occur.

Key-words: *Moorings, lock chamber, locks, hawser forces, transposition.*