

# ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL EM EMBARCAÇÕES AMAZÔNICAS

**Flávio SOARES (1); Walter VIDAL(2) Luzia GUIMARÃES(3)**

(1) Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM - CMDI: [acadaf@gmail.com](mailto:acadaf@gmail.com)

(2) Universidade Federal de Pernambuco – UFPE - [wbritto1@gmail.com](mailto:wbritto1@gmail.com)

(3) IFAM - CMDI, [luclaudia01@yahoo.com.br](mailto:luclaudia01@yahoo.com.br)

## RESUMO

Este trabalho propõe um estudo preliminar sobre a estabilidade transversal de embarcações regionais que operam na região Amazônica, onde o transporte fluvial se constitui no principal meio de deslocamento de cargas e passageiros. Infelizmente é comum a ocorrência de naufrágios envolvendo este tipo de embarcação. A instabilidade transversal é uma das causas dos naufrágios. Para o desenvolvimento deste estudo se utilizou o desenho de um barco regional e foi construído um barco em escala reduzida. Sobre este modelo foram feitos testes estáticos e dinâmicos a fim de se identificar o seu comportamento dinâmico. Em seguida foi construído um servomecanismo de deslocamento de uma massa na tentativa de reduzir a amplitude das oscilações transversais sobre a embarcação modelo.

**Palavras-chave:** instabilidade transversal, embarcações regionais, naufrágios.

## 1 INTRODUÇÃO

Na região amazônica as embarcações regionais desempenham um papel fundamental no transporte de cargas e passageiros. A malha rodoviária é pequena por conta do custo de construção e manutenção das rodovias. O custo é elevado devido às características do solo argiloso, a grande precipitação pluviométrica e os altos níveis de umidade durante seis meses por ano.

Apesar da importância do transporte fluvial, infelizmente diversos acidentes ocorrem anualmente com estas embarcações. Abaloamentos, tombamentos, choques com troncos submersos, incêndios, etc. Algumas medidas têm sido adotadas pela autoridade naval, como a proibição da construção de cascos de madeira, produzidos artesanalmente em toda a região. Estes devem ser substituídos por cascos confeccionados em chapas de ferro-carbono. No caso de choques com troncos submersos os cascos feitos de madeira tendem a se romper, provocando seu alagamento. Cascos feitos com chapas de ferro-carbono tendem a se deformar plasticamente o que deve evitar a ruptura dos mesmos.

Este trabalho se dedica estudar o comportamento da estabilidade transversal de um barco amazônico. A estabilidade transversal corresponde à capacidade da embarcação de atenuar as oscilações transversais que ela está naturalmente submetida, por operar em um ambiente dinâmico. Se os limites de estabilidade transversal são ultrapassados ocorre o tombamento destas embarcações.

Para desenvolver este estudo foi construído um barco em escala reduzida, que foi instrumentado e submetido a uma série de ensaios de modo a se levantar alguns parâmetros físicos, fundamentais em seu comportamento dinâmico.

Apesar do estudo se limitar a avaliação de um único casco pode-se estender seus resultados para a grande maioria das embarcações amazônicas, uma vez que elas seguem o mesmo padrão construtivo, cuja variedade de embarcações se dá basicamente pela variação da escala construtiva, mantendo o mesmo formato do casco.

Uma vez identificada a dinâmica da embarcação, foi empregado um servomecanismo de estabilização. O dispositivo consiste em se medir o ângulo de inclinação, em relação a um referencial externo e gerar um momento oposto a esta inclinação. Este momento será obtido com o deslocamento de uma massa, no sentido transversal do casco.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Estabilidade é a propriedade de se manter um casco de embarcação em estado de equilíbrio, seja o equilíbrio estático ou dinâmico. Tal propriedade é de vital importância para qualquer tipo de embarcação, pois ela está imersa em um ambiente dinâmico nas quais as forças externas, dos ventos, das correntes fluviais e das ondas atuam como distúrbios e podem desestabilizar as embarcações.

A abordagem do problema da estabilização tem sido feita através de modelos teóricos clássicos como se pode ver nos trabalhos de Gilmer e Johnson(1982) e de Clayton e Bishop(1982). Estes modelos são embasados em medidas experimentais feitas sobre barcos construídos em escala reduzida, de acordo com os procedimentos da mecânica dos fluidos, como pode ser visto em Carneiro(1993).

Recentemente novos modelos foram propostos por Fossen(1994) e Perez(2005) e tem sido empregados para a estabilização de grandes navios de carga. Neste trabalho utilizaremos apenas os conceitos relativos aos modelos clássicos.

No modelo clássico a estabilidade da embarcação se dá pela posição relativa entre o centro de massa  $G$ , que é o ponto onde se concentra a força peso, e o metacentro transversal  $M$ , Ver figura 1.

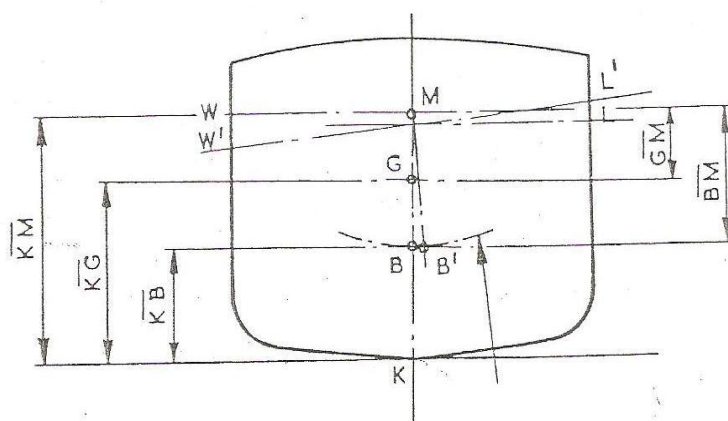


Figura 1 – Elementos geométricos da análise de estabilidade. Figura retirada de Gilmer e Johnson(1982).

Se as cargas dentro do casco estiverem firmemente fixadas e não apresentarem deslocamento, então se admite que  $G$  não se altera quando o casco se inclinar sob a ação de uma força externa como ondas, correntes fluviais ou o vento.

A posição do metacentro transversal  $M$ , medida em relação à linha de base na quilha  $K$ , depende do ponto em que a força de empuxo, proporcional ao volume submerso do casco, é aplicada sobre o centro de flutuação  $B$  que se encontra submerso. A medida que varia a inclinação do casco, varia a posição do ponto  $B$ , isso ocorre devido a falta de similaridade da forma do casco que se encontra submerso, ver figuras 1 e 2.

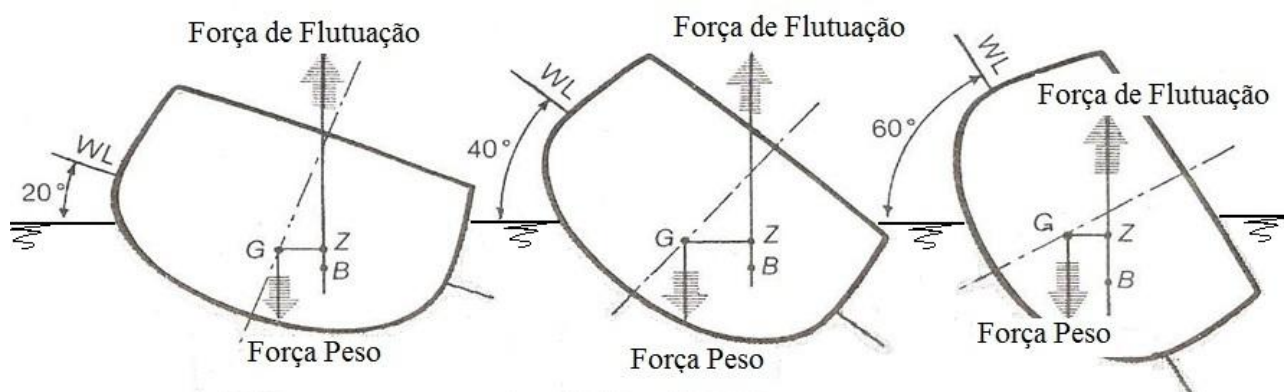
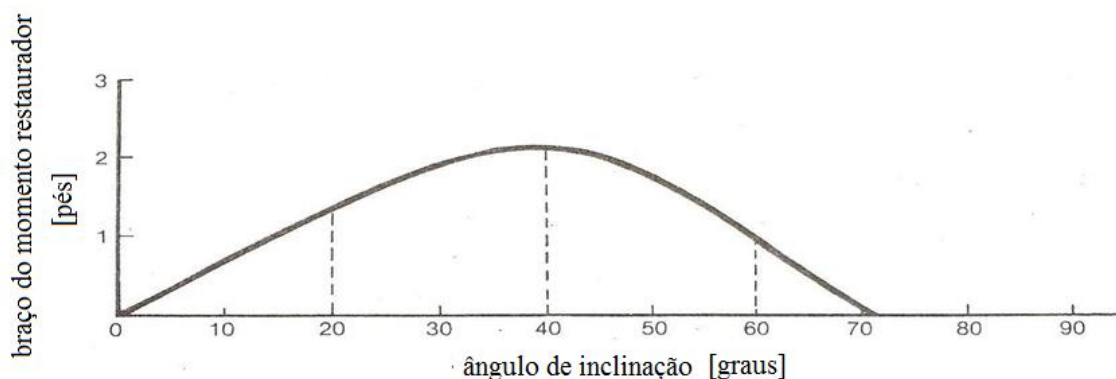


Figura 2 – Momento binário que define a condição de estabilidade da embarcação. Figura adaptada de Gilmer e Johnson(1982).

Desta forma, dependendo do ângulo de inclinação do casco, em relação à linha d'água WL, a posição da força peso agindo sobre o CG e a força de empuxo agindo sobre B, geram um binário de forças. Este momento tende a restaurar o barco para a condição de equilíbrio. A intensidade deste momento depende da amplitude do braço GZ. Acontece que à medida que este ângulo aumenta a amplitude do momento restaurador varia, alcançando valor nulo no ângulo limite de estabilidade transversal. A partir deste ponto o sentido de rotação do binário se inverte e o momento resultante favorece o tombamento da embarcação. O comportamento dinâmico pode ser visto na figura 3.



**Figura 3 – Curva de estabilidade de uma embarcação. Figura adaptada de Gilmer e Johnson(1982).**

### 3 DESCRIÇÃO DA PROPOSTA

O barco modelo deve ser ensaiado a fim de se levantar os parâmetros do seu comportamento dinâmico, como frequência natural de oscilação, coeficiente de amortecimento transversal, etc. Um servomecanismo desloca uma massa sobre um eixo transversal ao casco, desta forma o deslocamento da massa produzirá um momento adicional sobre o casco. A contribuição deste momento adicional será avaliada como método de atenuação das oscilações transversais.

### 4 METODOLOGIA

Para se estudar a dinâmica de uma embarcação regional, se tomou o desenho de um barco com estas características. Foi construído um barco em escala reduzida, que foi instrumentado e ensaiado, a fim de se levantar o seu comportamento dinâmico.

#### 4.1 O BARCO MODELO E O BARCO PROTÓTIPO

Foi escolhido como objeto de estudos o barco regional “Almirante Monteiro” cujo plano de linhas nos foi cedido pela Capitania dos Portos, ver figura 4a. Este barco apresenta perfil típico das embarcações regionais que operam na calha dos rios Solimões, Negro, Madeira, etc. Foi construído um modelo do casco em escala reduzida, de acordo com a figura 4b abaixo. O CG do barco modelo foi ajustado, adicionando-se massas, figura 4c.



**Figura 4a – Barco protótipo. Figura 4b – Barco modelo, escala 1:25. Figura 4c – Calibração do CG do barco modelo.**

## 4.2 Similaridades entre Modelo e Protótipo

Para que o barco modelo tenha comportamento dinâmico e, portanto, representatividade física com o barco protótipo é preciso que exista similaridade geométrica e similaridade dinâmica entre eles. A similaridade geométrica é obtida pela confecção em escala reduzida do barco protótipo. A similaridade dinâmica é obtida obedecendo-se a similaridade entre os barcos modelo e protótipo de dois números adimensionais bastante utilizados na mecânica dos fluidos, o número de Reynolds e o número de Froude.

$$R_e = \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças viscosas}} \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$Fr = \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças gravitacional}} \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}} \quad [\text{Eq. 04}]$$

Onde: V é a velocidade de deslocamento relativo; L é o comprimento característico, no caso o comprimento do barco e  $\mu$  é a viscosidade cinemática a 25 C°. A velocidade média dos barcos amazônicos é cerca de 20 km/h. Para o barco sob estudo adotou-se os seguintes valores: V= 5.5m/s; L= 28.5m e  $\mu= 0,897 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ , segundo Streeter(1984).

$$Re_m = Re_p \quad [\text{Eq. 05}]$$

$$Fr_m = Fr_p \quad [\text{Eq. 06}]$$

Segundo Clayton e Bishop (1982) as equações 5 e 6 podem ser satisfeitas fazendo-se:

$$\frac{V_m}{V_p} = S^{3/2} \quad [\text{Eq. 07}]$$

Onde S é o fator de escala, no nosso caso S =1:25, de modo que obtemos  $V_m = 0,65\text{m/s}$ .

Como estamos interessados nas oscilações transversais e não no deslocamento longitudinal do modelo, precisamos determinar a frequência de oscilações do modelo, o que pode ser feito utilizando-se o número de Strouhal.

$$Sr = \frac{fl}{V} \quad [\text{Eq. 08}]$$

Onde f é a frequência de oscilação

$$Sr_m = Sr_p \quad [\text{Eq. 09}]$$

$$\frac{f_m \cdot l_m}{V_m} = \frac{f_p \cdot l_p}{V_p} \quad [\text{Eq. 10}]$$

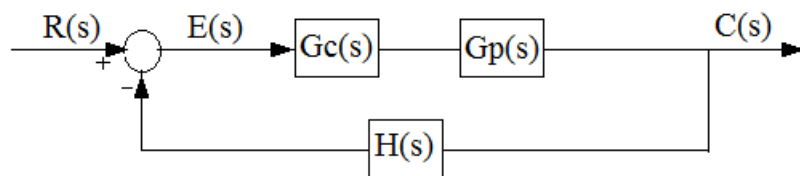
$$f_m = f_p \cdot \frac{l_p}{l_m} \cdot \frac{V_m}{V_p} \quad [\text{Eq. 11}]$$

A similaridade dinâmica foi obtida fazendo-se com que o barco modelo em escala reduzida apresentasse o centro de gravidade CG em posição equivalente, considerando-se a redução em escala. Desta forma é possível garantir que os ensaios de inclinação e de oscilação tenham comportamento dinâmico similar ao barco real que é o objeto de estudo, ver figura 4c.

#### 4.4 Servomecanismo:

Existe na literatura uma série de sistemas utilizados para a estabilização transversal de embarcações. Eles podem ser passivos ou ativos. Neste trabalho abordaremos um servossistema de controle ativo baseado no deslocamento de uma massa num eixo transversal ao casco. A idéia básica é gerar um momento restaurador auxiliar, de modo a conferir à embarcação a atenuação do ângulo limite, relativo à curva de estabilidade, impedindo que a embarcação ultrapasse os seus limites de estabilidade, conferindo maior nível de segurança à embarcação.

Estes dispositivos são capazes de seguirem um sinal de referência, para isso utilizam o princípio da realimentação. Um sinal de entrada  $R(s)$  é dado para que um controlador  $G_c(s)$  acione um atuador  $G_p(s)$ . Sua resposta dinâmica é o sinal de saída  $C(s)$ , lido por um sensor  $H(s)$  que envia este sinal para a entrada e compara com o sinal de referência que entra na malha de controle  $R(s)$ , ver figura 5.

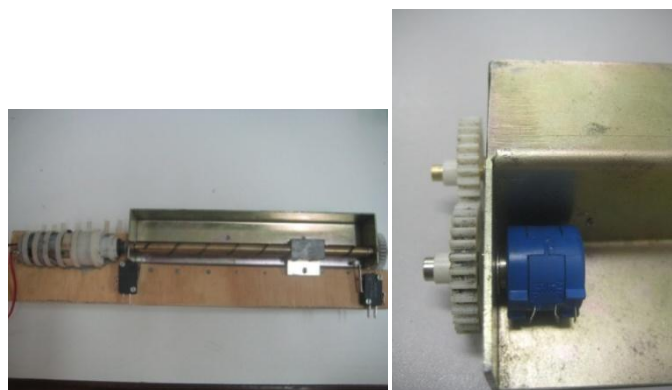


**Figura 5 – Malha fechada de controle.**

A diferença entre o sinal enviado e o sinal lido é denominada erro de controle  $E(s)$ . É possível demonstrar matematicamente que alguns tipos de controladores conseguem zerar este erro de controle ao longo de um determinado período de tempo, Ogata(2003).

O controlador lê o sinal de entrada e alimenta um circuito de acionamento para que um determinado atuador seja acionado a uma determinada velocidade. O atuador é um motor DC acoplado a um amplificador de torque. A saída do moto-redutor está conectada a um fuso mecânico. Este fuso será usado para deslocar uma massa ao longo da linha de centro, concêntrica ao fuso. A posição do angular do eixo é monitorada por um sensor, ver figuras 6a e 6b.

O algoritmo de controle do servomecanismo é implementado através de um microcontrolador, PIC18F4320. Para isso o microcontrolador manda um sinal de controle para um circuito de acionamento do motor, deslocando a massa ao longo do eixo num sentido determinado. Em seguida o microcontrolador lê um sinal de tensão do sensor que acompanha a posição angular do eixo.



**Figura 6a – Forma construtiva do servomecanismo. Figura 6b - Potenciômetro empregado como um sensor de posição.**

Observe na figura 6a e 6b que o fuso desloca um elemento que transporta a massa. Duas chaves de fim de curso servem como elementos de redundância, uma vez que a realimentação da posição foi feita utilizando-se um potenciômetro de precisão, ver figura 6b. Desta forma a posição da massa será dada pelo nível de tensão sobre o potenciômetro. O circuito de acionamento do moto-redutor pode ser visto na figura 7.

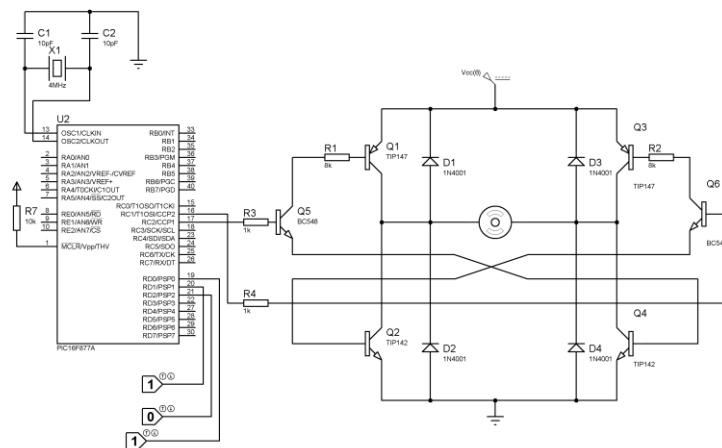


Figura 7 – Circuito elétrico de acionamento do moto-redutor e pinos de ligação ao microcontrolador.

## 5 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que fosse possível calibrar o barco em escala reduzida foi levantada a curva de deslocamento do casco. Esta curva foi obtida adicionando-se massa a embarcação e medindo-se o seu calado.

Foi feito um ensaio de extinção das oscilações na qual o barco em escala reduzida foi excitado com uma entrada impulso de  $13^\circ$ , que foi deixado oscilar livremente, sendo o sinal da oscilação angular apresentado na figura 8a abaixo. Verifica-se o comportamento dinâmico de um sistema amortecido, caracterizado pela atenuação da senoide.

Da análise da figura 8b, verifica-se que o período de oscilação é de  $T = 1,1s$  o que significa que  $w_d = 5,71rad/s$  e o coeficiente de amortecimento transversal  $\xi = 0,076$ .

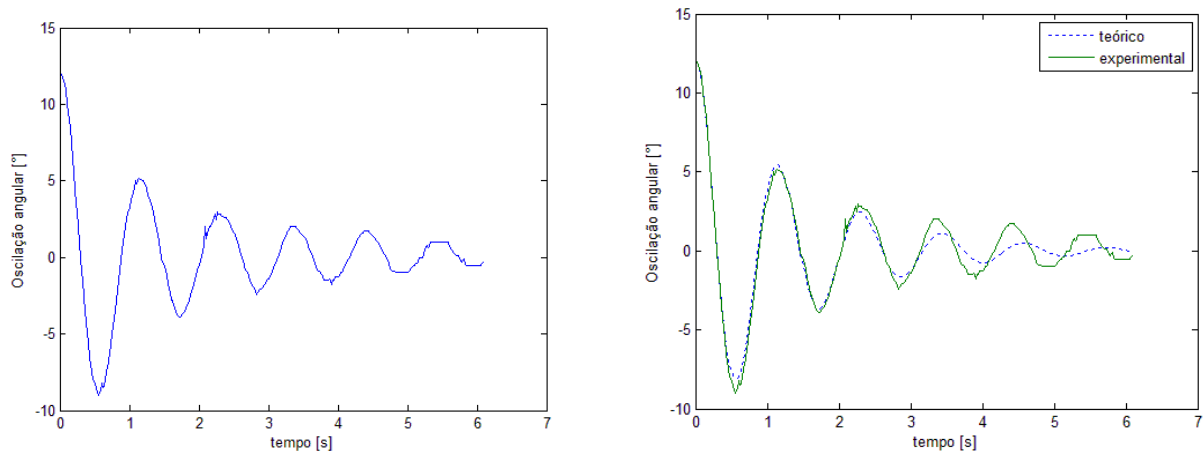
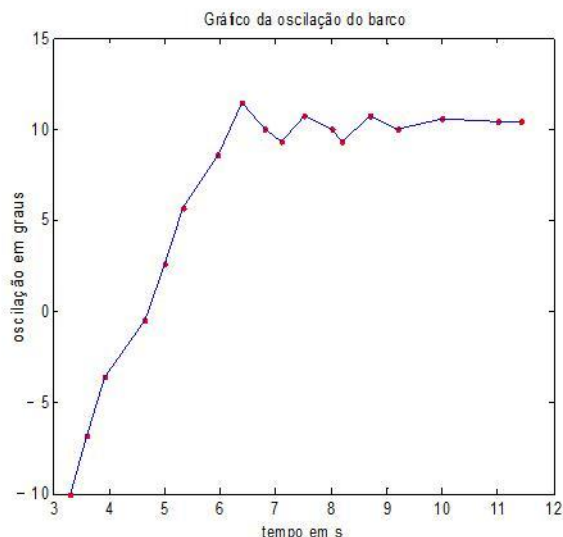


Figura 8a- Resposta livre do barco em escala reduzida para uma entrada impulso. Figura 8b – Resposta real versus Resposta ideal.

A resposta real foi comparada com a resposta de uma equação senoidal, modulada por uma equação exponencial decrescente, ver equação 12, e a comparação é apresentada na figura 9, abaixo.

$$F_{ext} = M\ddot{x} + b\dot{x} + kx$$

[Eq 12]



**Figura 9 – Resposta servomecanismo sobre o barco em escala reduzida.**

A comparação do modelo real com o modelo teórico apresenta razoável fidelidade para as primeiras oscilações, mas o ajuste do modelo teórico conduz a uma atenuação da amplitude maior do que a que foi medida experimentalmente, de modo que  $\xi = 0,126$ . Acreditamos que esta discrepância se deve a efeitos não lineares não incluídos na equação 12.

Foi construído um servomecanismo para gerar um momento adicional baseado no deslocamento de uma massa sobre um eixo. O dispositivo apresenta velocidade média de  $0,156\text{m/s}$ , aceleração média de  $0,03\text{m/s}^2$ , torque de  $-0,219\text{Kg.m}$  a  $+0,219\text{Kg.m}$ , para uma massa de  $925\text{g}$  se deslocando numa amplitude de  $+115\text{mm}$  a  $-115\text{mm}$ , tendo o servomecanismo um peso total de  $1773\text{g}$ .

Foi feito um ensaio de deslocamento de massa com o servomecanismo, o que serviu para verificar a oscilação gerada pelo deslocamento da massa.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um estudo preliminar da estabilidade de embarcações amazônicas, no qual se tomou o desenho de uma embarcação típica e se construiu um barco em escala reduzida que foi instrumentado e ensaiado. Foram levantadas as curvas de deslocamento do casco, e oscilação. A partir da curva de oscilação é possível determinar o coeficiente de amortecimento transversal do sistema e assim propor um modelo matemático que represente este comportamento matemático. Testes preliminares demonstraram a capacidade do servomecanismo em gerar um momento auxiliar, de acordo com os dados apresentados acima.

## 7 AGRADECIMENTOS

A Fapeam pelo apoio financeiro ao desenvolvimento deste projeto e a Diretoria do IFAM-CMDI pelo apoio institucional, com laboratórios e piscina para a realização dos ensaios. Ao aluno Alan Tavares pela confecção da ponte H.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTINTAS, Yusuf. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics**, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Editora: Cambridge University Press. 2000. ISBN 978-0521659734.

CLAYTON, B. R., BISHOP, R. E. D. **Mechanics of Marine Vehicles**. Library of Congress Cataloging in Publication Data. EUA. 1982. ISBN 0-87201-897-0.

CARNEIRO, F.L. **Análise Dimensional e Teoria da Semelhança e dos Modelos Físicos**. Editora UFRJ. 2ª. Edição. Rio de Janeiro, 1993. ISBN 85-7108-077-1.

FOSSSEN, I. Thor. **Guidance and Control of Ocean Vehicles**. John Wiley & Sons. Chichester. Inglaterra. 1994.

GILMER, C. T., Johnson. **Introduction to Naval Architecture**. Library of Congress Cataloging in Publication Data. EUA. 1982. ISBN 0-87201-318-0.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª e 4ª edição. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2003. ISBN 978-85-87918-23-9

PEREZ, Tristan. **Ship Motion Control – Course Keeping and Roll Stabilization Using Rudder and Fins**. Springer-Verlag. London. 2005.

SAIMOLESCU, G. and RADU, S. **Stabilisers and Stabiling Systems on Ships**. 8<sup>th</sup> International Conference. 2002.

STREETER, V. L. e WYLIE, E. B. **Mecânica dos Fluidos**. McGraw- Hill. 7ª. Edição. Rio de Janeiro, 1993.