



## ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE PROPULSORES NAVAIS DO TIPO HÉLICE, FABRICADOS NA AMAZÔNIA, ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Newton Sure Soeiro\* – e-mail: [nsoeiro@ufpa.br](mailto:nsoeiro@ufpa.br)

Fábio Augusto Canté Lopes\* – e-mail: [fabiolop@ufpa.br](mailto:fabiolop@ufpa.br)

Alan Rafael Menezes do Vale\* – e-mail: [alanvale@bol.com.br](mailto:alanvale@bol.com.br)

Antônio Guilherme Barbosa da Cruz\* – e-mail: [agbc@ufpa.br](mailto:agbc@ufpa.br)

Thiago Antônio Reis Pinto\* - e-mail: [tarp@bol.com.br](mailto:tarp@bol.com.br)

(\*) Universidade Federal do Pará – UFPA – Departamento de Engenharia Mecânica – Campus  
Universitário do Guamá – CEP: 66075-900 – Belém – Pará – Brasil

**Resumo:** A Amazônia possui a maior bacia hidrográfica do mundo, e inúmeros rios navegáveis, dependendo social e economicamente das embarcações impulsionadas pelos propulsores do tipo hélice produzidos nesta região. No entanto, a produção local dos hélices é feita empiricamente resultando em perfis subdimensionados para os esforços em operação do hélice, isto acarreta inúmeras fraturas nos propulsores, gerando prejuízos em função da reposição dos propulsores e do tempo parado que os barcos esperam para a troca. No intuito de analisar o quanto se pode evoluir, no que diz respeito à resistência mecânica, foram utilizados dois programas: o GOSTFIM.FOR, escrito em linguagem FORTRAN, para o cálculo de coeficientes de pressão nos perfis da pá dos rotores e o ANSYS, que constrói a geometria da pá do hélice, e através do método dos elementos finitos, utiliza os campos de pressões obtidos no programa GOSTFIM.FOR para a análise das tensões em toda a pá do propulsor. Através dos resultados obtidos, verificam-se as solicitações, e caso estas sejam acima do admissível, modificações são sugeridas ao propulsor a fim de se eliminar concentrações de tensões. Os perfis otimizados podem ser aplicados na produção de hélices na Amazônia, fazendo com que este produto adquira uma qualidade satisfatória.

**Palavras-chave:** Perfis, resistência, análise de tensões, elementos finitos.

### 1. INTRODUÇÃO

Com uma área em torno de 5,1 milhões de km<sup>2</sup>, a Amazônia representa, atualmente, um dos centros de atenções mundiais em função de suas riquezas minerais, biodiversidade, ecoturismo, aspectos antropológicos, etc. Porém, nesta região, há uma realidade caracterizada por muitos municípios e comunidades ribeirinhas sem a mínima infraestrutura necessária à condição de vida uma vez que o único meio de comunicação com a civilização é o transporte hidroviário.

Assim, o mesmo apresenta uma elevada importância, devido à extensão de rios

navegáveis e à ausência de transportes alternativos na região, além do fato de constituir-se em uma forma bastante econômica de integração local.

O projeto e a produção de embarcações e seus componentes são bastante complexos devido à variedade de itens como eixos, hélices, motores, redutores e a própria estrutura da embarcação, sendo que grande parte dos propulsores navais utilizados por embarcações na Amazônia é fabricada em oficinas de fundição situadas na região que utilizam procedimentos empíricos, levando dessa forma, freqüentemente, perfis subdimensionados para os esforços em operação dos mesmos, provocando fratura em inúmeros propulsores com um baixo tempo de uso nas embarcações, o que gera prejuízos consideráveis em função do período em que os barcos permanecem parados. Com base no exposto, simulou-se o escoamento potencial nos perfis lineares das pás de hélices, sendo o modelo NS18 aplicado nestas pesquisas, devido a sua grande utilização na região.

Os resultados fornecidos pelo escoamento foram comparados à resistência do material do propulsor (liga de cobre-zinco), para se analisar a suscetibilidade do hélice naval a fraturas em funcionamento, através da criação de um modelo tridimensional desse propulsor e uma análise pelo método de elementos finitos, sem levar em consideração os choques com galhos e troncos de árvores. Havendo constatação de solicitações no hélice acima do admissível, redimensionamentos tornam-se necessários a fim de se reduzir a possibilidade de falhas no funcionamento deste rotor.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho contou com a aplicação de diversos softwares, bem como metodologias que possibilitaram uma ampla visão acerca da distribuição de pressão hidrodinâmica, por consequência do escoamento fluido, em diversos perfis dos propulsores navais. As etapas que constituíram a execução do trabalho em questão são descritas a seguir.

### 2.1. Levantamento e Aquisição de Dados

Foram realizados na Capitania dos Portos da Amazônia Oriental, bem como em 11 (onze) municípios do estado do Pará e em 1 (um) do estado do Amapá, Tab. (1), um criterioso levantamento de dados, através de um questionário técnico, o qual objetivou a aquisição dos dados referentes às embarcações e seus respectivos sistemas propulsores. É importante salientar, que o aludido questionário possui um levantamento das características dos hélices navais, como diâmetro e número de pás do propulsor e diâmetro do eixo, parâmetros estes que foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. Através das entrevistas realizadas, constatou-se que grande parte dos propulsores navais não estava atendendo às necessidades dos usuários locais, haja vista que o comportamento mecânico dos mesmos mostrou-se insatisfatório.

Tabela 1. Municípios visitados onde foi aplicado o questionário técnico.

Municípios	Produtores	Usuários	Total
Belém	11	6	17
Santarém	2	-	2
Marabá	2	-	2
Bragança	1	4	5
Abaetetuba	1	7	8
Breves	1	-	1
Soure	3	-	3
Almerim	1	10	11
Igarapé-Miri	-	5	5
Vigia	4	6	10
Maracá	2	9	11
Macapá/AP	2	7	9
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>54</b>	<b>84</b>

A matéria-prima utilizada na produção dos propulsores navais da região, foi devidamente analisada com o intuito de serem obtidas as composições químicas das amostras coletadas. Estas são representadas pela Tab. (2). As propriedades mecânicas do material são dados de entrada de considerável importância na análise numérica via método dos elementos finitos. Na Tabela (2), nota-se que a maioria das amostras são constituídas de latão, ou seja, ligas de cobre e zinco (Cu e Zn).

Tabela 2. Composições químicas (%) de propulsores navais tipo hélice produzidos na área metropolitana de Belém e em alguns municípios do Estado do Pará.

Amostra	Cu	Zn	Sn	Al	Si	Fe	S	Pb	Ni	Mo	Mn	P
Belém 1	81,72	15,02	2,27	-	-	0,79	0,21	-	-	-	-	
Belém 2	81,26	15,35	2,31	-	-	0,84	0,25	-	-	-	-	
Belém 3	77,91	19,92	1,45	-	-	0,59	0,13	-	-	-	-	
Belém 4	77,47	20,50	1,50	-	-	0,48	0,06	-	-	-	-	
Abaeté 1	84,77	12,43	1,41	-	-	0,82	0,58	-	-	-	-	-
Abaeté 2	59,58	5,15	14,34	1,36	2,54	12,46	1,29	2,41	-	-	-	0,87
Breves 1	74,28	16,22	2,70	0,40	0,58	2,29	-	3,41	-	-	-	0,13
Breves 2	90,40	3,90	0,78	1,22	1,84	1,67	0,13	-	-	-	-	0,07
Marabá 1	64,01	32,26	-	0,50	-	-	-	2,55	-	-	0,67	
Marabá 2	-	-	-	60,40	37,47	2,12	-	-	-	-	-	
Santarém 1	49,58	28,77	-	0,67	-	1,39	-	19,6	-	-	-	
Santarém 2	0,34	0,32	-	95,22	-	2,40	-	-	-	-	1,73	
Vigia 1	88,80	6,00	4,28	-	-	0,54	0,38	-	-	-	-	
Vigia 2	74,29	18,78	1,97	-	0,22	0,83	0,72	-	1,60	1,58	-	
Bragança	76,46	15,72	2,38	-	0,52	0,88	1,56	-	0,68	1,78	-	
Soure	78,68	13,54	1,26	0,65	1,73	4,16	-	-	-	-	-	-

## 2.2. Escolha do Hélice Mais Adequado para Análise

De acordo com as entrevistas e com os dados levantados em campo, escolheu-se o propulsor naval do tipo hélice, modelo NSB18, de 310 mm de diâmetro, que atua em conjunto com o motor YANMAR, de mesma especificação, para ser objeto da análise de escoamento potencial, visto que este conjunto é muito utilizado na região amazônica (cerca de 100 unidades mensais comercializadas), onde é predominante a presença de pequenas embarcações de madeira. Na Figura (1) é mostrado o propulsor naval onde foi simulado escoamento fluido no entorno do hélice.

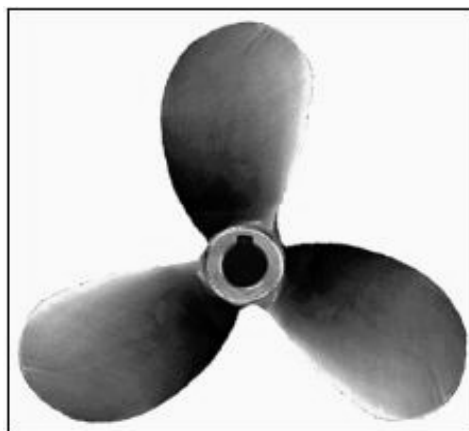


Figura 1. Hélice, modelo NS18, utilizado na modelagem

### 2.3. Definição das Estações Lineares das Pás do Hélice

Para construir o modelo apenas da pá, local da grande ocorrência de fraturas do rotor, recorreu-se aos perfis das estações lineares, espaçados de 32 em 32 mm, onde as coordenadas do perfil foram medidas através do software Markgraf, escrito em linguagem Borland C, o qual mede as estações através de suas imagens digitalizadas, na extensão Bitmap (BMP).

Para gerar o modelo, foram utilizados dois planos (XY e XZ). Com estes, recuperou-se a geometria tridimensional da pá do propulsor. Os planos do rotor são mostrados nas Fig. (2) e (3) a seguir.

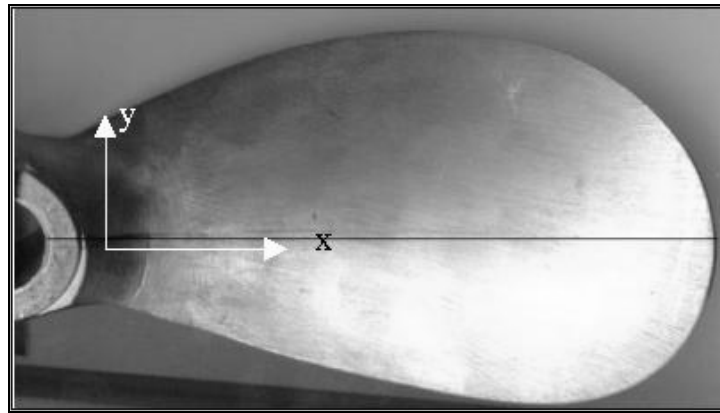


Figura 2. Definição do plano XY de uma pá do hélice

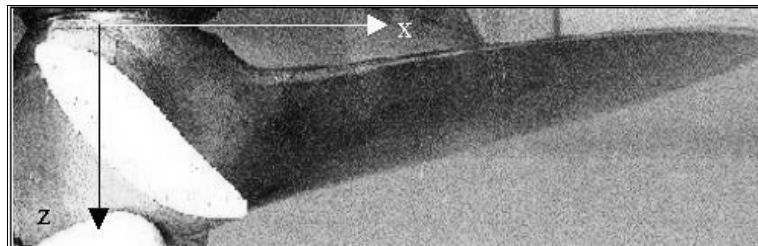


Figura 3. Representação do plano XZ da mesma pá

A partir das estações, determinou-se a linha de esqueleto, que define a entrada e a saída do escoamento nos perfis lineares da pá do hélice. Com esta curva, pôde-se determinar matematicamente os ângulos ( $\beta_1$ ) entre a horizontal e a entrada do escoamento no perfil através da Eq. (1).

$$\beta_1 = \arctg(dy / dx) \Big|_{x=0} \quad (1)$$

A rotação da estação em relação à horizontal, a qual é característica de cada raio adotado para os perfis, fornece um parâmetro utilizado no projeto dos hélices navais, chamado ângulo de construção ou de montagem ( $\beta$ ). Este valor pode ser determinado geometricamente, através do arco tangente das diferenças de cota entre as coordenadas Y e Z, mantendo-se o raio da estação constante.

### 2.4. Obtenção dos Coeficientes de Pressão nos Perfis das Pás do Hélice

Através do programa GOSTFIM, escrito em linguagem FORTRAN, desenvolvido por Nelson Manzanares Filho – CTA – ITA, fez-se a análise de escoamento potencial nos perfis lineares, ou

seja, verificou-se o comportamento estático do propulsor ao ser submetido a um escoamento no qual foram desprezadas as influências da rugosidade (acabamento superficial) do hélice. Este fluxo gera um gradiente de pressão nas pás que, por consequência, ocasiona um diferencial de tensões. Estas são quantificadas através de análise via método dos elementos finitos. Na figura (4) são mostradas as distribuições dos coeficientes de pressões ( $C_p$ ) em função da corda unitária de cada perfil, dados de saída do programa GOSTFIM.

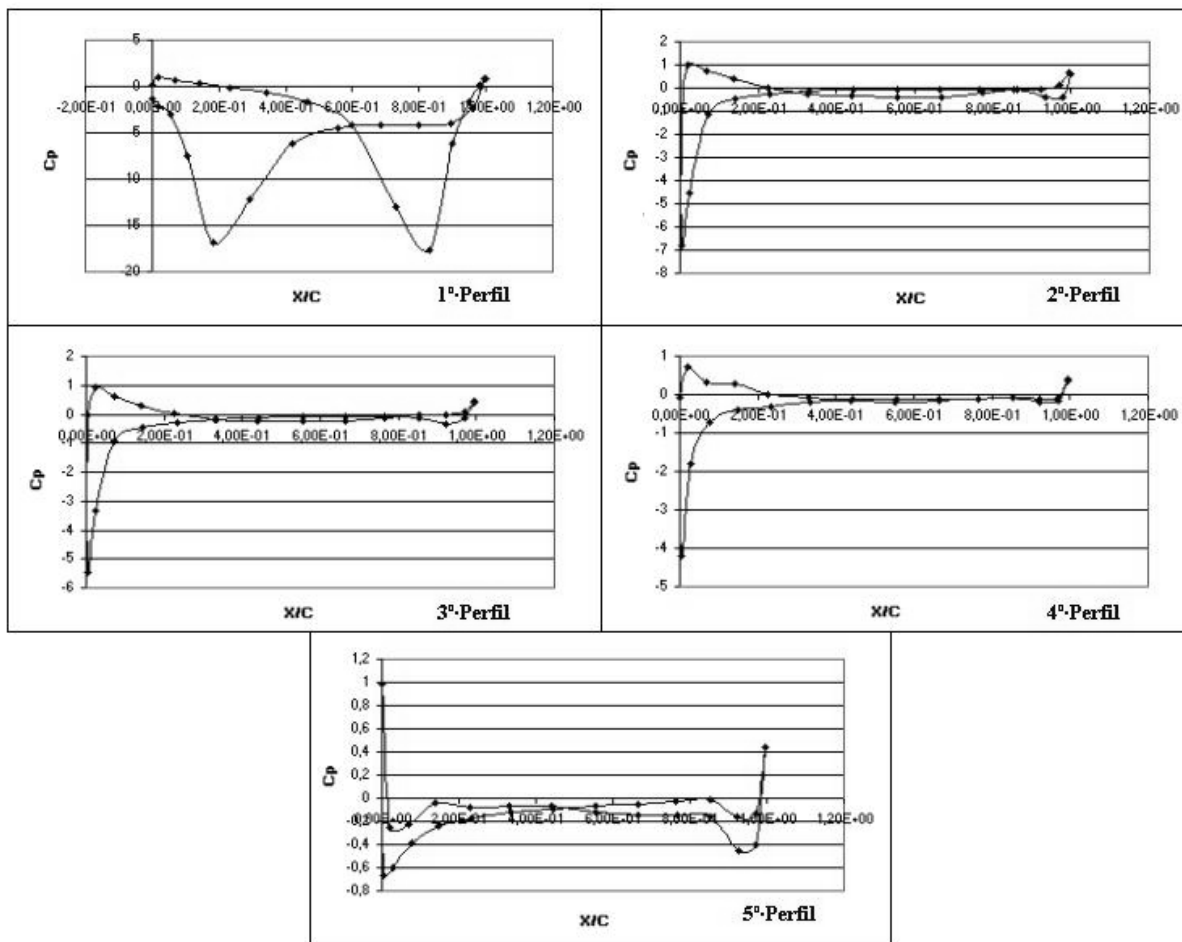


Figura 4. Distribuição do coeficiente de pressão nos cinco perfis

## 2.5. Análise Através do Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico para resolver problemas de mecânica do contínuo com precisão aceitável para engenheiros. É seguramente o processo que mais tem sido usado para a discretização de meios contínuos. Além disso, pode-se afirmar também que o MEF é muito utilizado face à analogia física direta que se estabelece, com o seu emprego, entre o sistema físico real e o modelo simulado computacionalmente.

### 2.5.1 Criação do Modelo Físico

A modelagem física do hélice seguiu a seqüência de construção de sólidos do software ANSYS (inserção dos keypoints e construção de splines, áreas e volumes). Esta seqüência de elementos geométricos, aplicados ao propulsor em estudo, feita na etapa de pré-processamento, levou à obtenção do volume apresentado na Fig. (5).

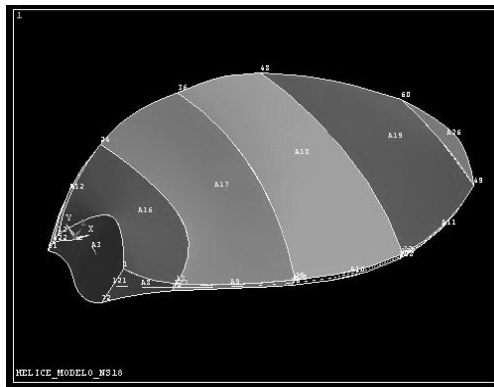


Figura 5. Volume representativo da pá do hélice.

### 2.5.2 Processo de Criação de Malhas ao Modelo

A adaptação da malha ao modelo deve ser tal que não o deforme após sua utilização. O hélice no qual a malha fora aplicada para análise via método dos elementos finitos, é mostrado na Fig. (6), onde o elemento estrutural SOLID 95 (composto de 20 nós por elemento) foi aplicada da primeira a quinta estação da pá e SOLID 92 (10 nós por elemento) para gerar o contorno arredondado do final da geometria.

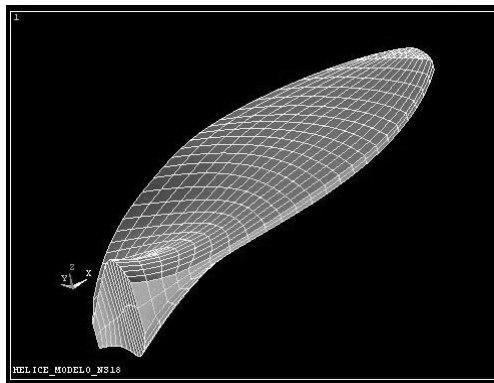


Figura 6. Malhagem do modelo (Total de 753 elementos e 3946 nós)

### 2.5.3 Solução do Problema

A partir da aplicação do escoamento, no FORTRAN, calculou-se a pressão dinâmica, devido ao escoamento do fluido nas pás do propulsor. O valor da pressão de corrente livre do escoamento foi desconsiderada, visto que não se dispôs de métodos para sua medição no local de funcionamento do hélice com a devida precisão. A pressão dinâmica aplicada é dada pela Eq. (2) é mostrada a seguir:

$$P_{\text{dinâmica}} = 0,5 * C_p * \rho * V^2 \quad (2)$$

O coeficiente de pressão ( $C_p$ ), é dado de saída do programa GOSTFIN;  $\rho$  é a massa específica do fluido (água) que escoo nas pás do hélice, em  $\text{Kg/m}^3$  e  $V$ , a velocidade de escoamento livre do fluido que foi aproximada à velocidade de cruzeiro da embarcação, em m/s. Como o propulsor escolhido é utilizado em conjunto com um motor de mesma especificação, verificou-se a velocidade das embarcações que possuem este conjunto e encontrou-se o valor em 9 m/s em média.

Considerou-se a solitação fluídica na pá do propulsor como quasestática. Esta simplificação permite que o setor da pá que esteja em interseção com o eixo do propulsor possa ser considerado

como engastado e o restante da pá, como uma viga submetida aos esforços em funcionamento do hélice.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

Após a utilização do método dos elementos finitos, obteve-se distribuição de tensões na pá do hélice e sua forma deformada, as quais são apresentadas nas Fig. (7) e (8).

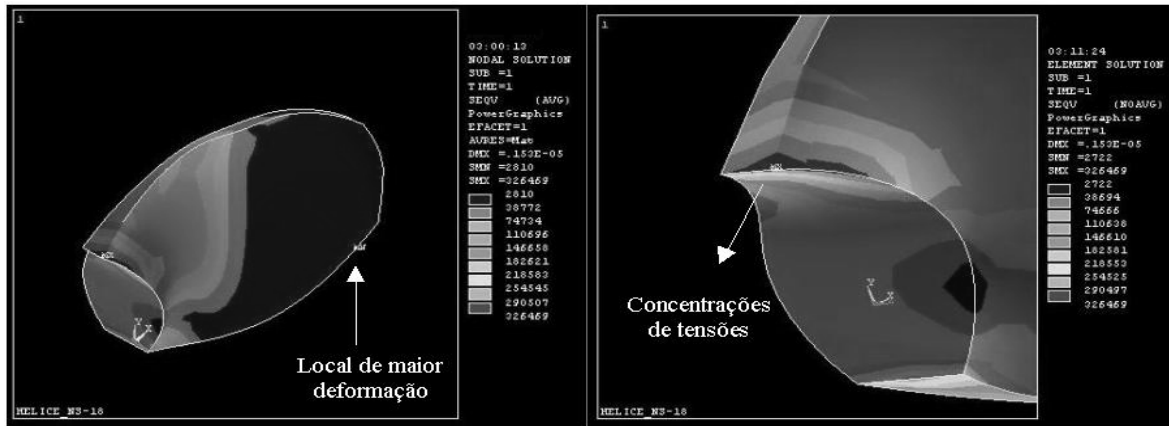


Figura 7. Resultados obtidos através da solicitação fluidica

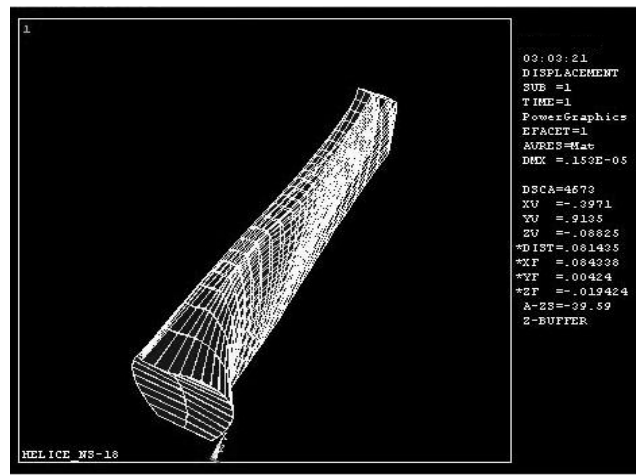


Figura 8. Forma deformada (em azul) versus não-deformada (em branco)

De acordo com a Fig. (7), pode-se observar que a maior solicitação de esforços na pá foi de 326,469 KPa (um pouco acima de 3 atm). O deslocamento máximo ficou na ordem de  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m, ou seja 1,5  $\mu$ m. Desprezando se as pressões estáticas que existem no modelo.

### 4. CONCLUSÃO

Os valores colhidos das pressões dinâmicas foram comparados aos da tensão de escoamento do material do propulsor (186 MPa). Os resultados encontrados não submetem a pá do hélice a tensões consideráveis nem no setor que fica próximo ao eixo, onde ocorrem concentrações de tensões, o que leva a conclusão que o escoamento no entorno do propulsor naval não é um fator determinante nas freqüentes fraturas que vê ocorrendo nos rotores produzidos na região. É importante ressaltar que esta análise é feita considerando-se que o hélice é feito de um material sem inclusões, porosidades e outras falhas inerentes ao seu processo produtivo.

Outro fator importante é que os hélices estão, de acordo com análise feita, superdimensionados para a solicitação fluídica, porém a porcentagem destes fraturados com pouco tempo de uso na região é considerável, levando-se a crer que os esforços produzidos pelas frequências naturais de vibração e/ou impactos contra detritos que existem nos rios, como troncos de árvores e outros é o fator mais agressivo à integridade mecânica do rotor naval analisado.

Não se encontraram, portanto, motivos para sugerir modificações no hélice quanto a esta análise. Porém foi confirmada a tendência dos propulsores navais regionais a terem concentrações de tensões próximas ao eixo, o que pode, com solicitações mecânicas de maiores intensidades ocasionar uma possível fratura neste local.

O aperfeiçoamento da análise fluídica, com a utilização de softwares e computadores mais modernos, assim como considerações físicas mais aguçadas (análise experimental), podem levar o cálculo a resultados mais precisos, sendo este assunto que pertence a uma área na qual as evoluções dos resultados ocorrem freqüentemente.

## **5. AGRADECIMENTOS**

A equipe deste trabalho agradece primeiramente a Deus, não esquecendo de citar o apoio do Laboratório de Vibrações e Acústica, bem como o Grupo de Turbomáquinas Hidráulicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.

## **6. REFERÊNCIAS**

Bran, R. & Souza, Z., 1967, “Máquinas de fluxo (turbinas, bombas e ventiladores)”, Editora Ao livro técnico S.A., pp 184-198 e pp 249-255, Rio de Janeiro, Brasil.

Breslin, P., 1994 “Hydrodynamics of Ship Propellers”, Cambridge University Press.

Coelho, C.A., Ferreira, E.L.S. e Lima, L.M.B., 1999, “Uma Alternativa para a Produção de Propulsores Navais Tipo Hélice na Amazônia”, Anais em CD-ROM do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, Brasil.

Comstock, J. P., 1967, “Principles of Naval Architecture”, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp 373-462, New York USA.

Ferreira, E. L. S. e Lima, L. M. B., 1999, “Projeto e Produção de Propulsores Navais nas Microempresas de Fundação do Município de Belém”, (TCC), Pará, Brasil, pp 1-33.

Fox, R.W. e McDonald, A. T., “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil.

Geer, D., 1989, “Propeller Handbook”, New York: McGraw-Hill Company.

Macintyre, A. J., 1983, “Máquinas Motrizes Hidráulicas”, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, pp 223-246.

Moreira, A. L. S., 2000, “Otimização do Projeto de Propulsores Navais do Tipo Hélices Utilizados por Embarcações nas Condições Amazônicas”, Relatório parcial de atividades do projeto, Pará, Brasil.

Sena, M. J. S., Reynaud, G. & Kueny, J. L., 1999, “Calcul de deformations - contraintes de roues de machines avec le code ANSYS”, Relatório Interno: Intitut National Polytechnique de Grenoble, França.

Water Power & Dam Construction, 1999 “Numerical flow simulations in francis turbines”.



# ANALYSIS OF THE RESISTANCE OF NAVAL PROPELLERS OF THE TYPE HELIX MANUFACTURED IN AMAZÔNIA THROUGH THE METHOD OF THE FINITE ELEMENTS

Newton Sure Soeiro\* – e-mail: [nsoeiro@ufpa.br](mailto:nsoeiro@ufpa.br)

Fábio Augusto Canté Lopes\* – e-mail: [fabiolop@ufpa.br](mailto:fabiolop@ufpa.br)

Alan Rafael Menezes do Vale\* – e-mail: [alanvale@bol.com.br](mailto:alanvale@bol.com.br)

Antônio Guilherme Barbosa da Cruz\* – e-mail: [agbc@ufpa.br](mailto:agbc@ufpa.br)

Thiago Antônio Reis Pinto\* - e-mail: [tarp@bol.com.br](mailto:tarp@bol.com.br)

(\* Federal University of Para – UFPA – Mechanical Engineering Department – CEP: 66075-900 – Belem – Para – Brazil

***Abstract:** Amazon region possesses the largest hydrographic basin of the world, and countless navigable rivers, depending social and economically of the vessels impelled by the propellers of the type helix produced in this place. However, the local production of the helixes is made with empirics methods, resulting in undevelopeds profiles for the efforts in operation of the helix, this carts countless fractures in the propellers, generating damages in function of the replacement of the propellers and of the stopped time that the ships wait for the change. Objectifying to analyze it, can develop, in what it says respect to the mechanical resistance, two programs were used: GOSTFIN.FOR, written in language FORTRAN, for the calculation of pressure coefficients in the profiles of the shovel of the rotors and ANSYS, that it builds the geometry of the shovel of the helix, and through the method of the finite elements, it uses the fields of pressures obtained in the program GOSTFIN.FOR for the analysis of the tensions in the whole shovel of the propeller. Through the obtained results, the solicitations are verified and in case these are above the acceptable, modifications are suggested to the propeller in order to eliminate big values of tensions. The profiles optimized can be applied in the production of new helixes in Amazonia, doing with that this product acquires a satisfactory quality.*

***Keywords:** Profiles, resistance, analysis of tensions, finite elements.*