



**II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**II NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
12 a 16 de Agosto de 2002 - João Pessoa – PB

**ANÁLISE MACROESTRUTURAL E MICROESTRUTURAL DE  
PROPULSORES NAVAIS TIPO HÉLICE PRODUZIDOS NO ESTADO DO  
PARÁ**

**Antonio Luciano Seabra Moreira**

Universidade Federal do Pará, UFPA, Centro Tecnológico, Deptº de Engenharia Mecânica, CEP. 66075-900, Belém - Pará - Brasil, e-mail: lmoreira@amazon.com.br.

**João Lobo Peralta**

Centro Federal de Educação do Pará, CEFET/PA, e-mail: jlperalta@fem.unicamp.br.

**Otávio Fernandes Lima da Rocha**

Centro Federal de Educação do Pará, CEFET/PA, e-mail: orocha@amazon.com.br.

**Marcos Fabricio Sena de Oliveira**

Universidade Federal do Pará, UFPA, Centro Tecnológico, Deptº de Engenharia Mecânica, CEP. 66075-900, Belém - Pará - Brasil, e-mail: fabriciosenna@bol.com.br.

**Fabio Augusto Canté Lopes**

Universidade Federal do Pará, UFPA, Centro Tecnológico, Deptº de Engenharia Mecânica, CEP. 66075-900, Belém - Pará - Brasil, e-mail: fabiolop@ufpa.br.

***Resumo.** É evidente a importância que o transporte fluvial apresenta como agente de integração sócio-econômica para região amazônica pois na maioria das vezes somente embarcações são capazes de aproximar populações existentes em municípios, vilas e lugarejos de centros considerados mais desenvolvidos, para onde as mesmas convergem com o objetivo de serem atendidas em suas mais diversas necessidades. Apesar disso, a maioria dessas embarcações são projetadas e construídas a partir de procedimentos empíricos. Assim, alguns componentes utilizados pelas mesmas não apresentam um rendimento satisfatório acarretando sérios prejuízos tanto para os proprietários como para os usuários. Entre os componentes mecânicos que geralmente interferem diretamente no rendimento das referidas embarcações estão os hélices os quais normalmente possuem propriedades mecânicas bem inferiores àquelas exigidas na prática, o que compromete significativamente o desempenho dos mesmos. Considerando a importância do assunto, este trabalho apresenta um estudo sobre a formação da macroestrutura e microestrutura durante o processo de solidificação desses propulsores navais, produzidos em diferentes municípios do estado do Pará, a fim de contribuir no entendimento do baixo desempenho apresentado por esses componentes através de suas propriedades mecânicas inferiores.*

***Palavras-chave:** embarcação, hélice, fundição, macroestrutura, microestrutura.*

## 1. INTRODUÇÃO

Com uma área de aproximadamente 5,1 milhões de km<sup>2</sup> a Amazônia representa atualmente um dos centros de atenções do mundo em função de suas riquezas minerais, biodiversidade, ecoturismo, aspectos antropológicos, etc. No entanto, nesta gigantesca região existe uma realidade caracterizada pela presença de inúmeros municípios, povoados 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. É através da embarcação que o caboclo satisfaz suas necessidades básicas quanto ao atendimento de serviços essenciais à sua sobrevivência como saúde, alimentação, transporte, vestuário, lazer, etc bem como a maioria das atividades econômicas, que envolvem basicamente transporte de produtos regionais e passageiros, são viabilizadas. Logo, o transporte hidroviário apresenta uma elevada importância para a região devido a extensão de rios navegáveis e a ausência de transportes alternativos além do fato do mesmo constituir-se em um meio bastante econômico de integração. Os estudos que consideram o projeto e a produção de embarcações e seus componentes são bastante complexos devido a diversidade de informações que necessitam ser processadas por várias áreas da engenharia mecânica tais como mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, produção, materiais e processos de fabricação. A variedade de componentes como eixos, propulsores, motores, redutores e a própria estrutura da embarcação, produzem uma imensa variedade de dados a serem analisados (Coelho et al., 1999). Atualmente, grande parte dos propulsores navais tipo hélice utilizados por embarcações nas condições regionais são fabricados em pequenas oficinas de fundição localizadas na região as quais utilizam procedimentos empíricos sem qualquer controle portanto da matéria-prima, variáveis envolvidas no processo de fundição e custos o que proporciona um baixo desempenho desses propulsores representado por suas propriedades mecânicas inferiores. Desta maneira, são frequentes o empenamento e/ou quebra do hélice quando submetido a choques com troncos e galhos de árvores, bancos de areia, pedras e outros elementos sólidos bastante comuns no leito dos rios amazônicos. Tais fatores, além de afetarem diretamente o sistema de propulsão da embarcação (desgaste precoce de peças móveis, empenamento ou quebra do eixo de transmissão, queda do rendimento de propulsão, etc), causam também enormes prejuízos de natureza sócio-econômica, muitos irreversíveis, tais como o retardamento ou interrupção de viagens, aumento nos custos de operação e manutenção, limitação das possibilidades de navegação, etc (Loureiro et al., 2000). Assim, é importante o desenvolvimento de estudos que contribuam para a redução do empirismo que caracteriza o processo de fundição desses propulsores navais na Amazônia, através da interferência da pesquisa sistemática, tendo em vista um maior rendimento do processo e a melhoria da qualidade do produto obtido. Considerando a importância do assunto, o principal objetivo deste trabalho é analisar a influência da macroestrutura e da microestrutura de solidificação dos propulsores navais em questão no comportamento mecânico dos mesmos identificando eventuais fatores de natureza operacional, durante o processo de fabricação, que estejam contribuindo para o seu baixo desempenho.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento de informações necessárias à realização deste trabalho baseou-se, principalmente, na observação direta do processo de fabricação dos propulsores estudados e na aplicação de questionários técnicos específicos junto a pequenos produtores de hélices e proprietários de embarcações localizados na área metropolitana de Belém e em dez municípios do Estado do Pará situados nas regiões do Baixo Amazonas, Marajó, Tocantins, Salgado e Bragançinha cujas posições são consideradas estratégicas no que se refere a vias de navegação. É importante salientar, que durante o levantamento dessas informações, houve a preocupação em respeitar o conhecimento, a experiência e a linguagem dos entrevistados. Foram também coletadas diversas amostras de hélices produzidos por fabricantes locais visando as análises química, macroestrutural e microestrutural dos mesmos. Os estudos referentes à composição química foram realizados

através do método de difratometria baseado no processo de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os ensaios metalográficos utilizaram como reagente químico uma solução constituída por 50% de ácido clorídrico e água destilada onde as superfícies das seções transversais e longitudinais das pás e cubos dos propulsores, após devidamente preparadas, foram completamente imersas durante um tempo que variou entre cinco e dez minutos, dependendo da dimensão da peça, obtendo-se então as macroestruturas e microestruturas desejadas.

### **3. RESULTADOS OBTIDOS**

#### **3.1. Processo de Fundição**

Como as etapas operacionais envolvidas no processo de fundição dos referidos propulsores são realizadas através de procedimentos empíricos, o produto fundido não apresenta as propriedades mecânicas exigidas para um bom desempenho. O fato dessas operações serem desenvolvidas artesanalmente, ou seja, realizadas com base somente na experiência, observação direta e intuição do caboclo regional contribui para que o comportamento mecânico e a vida útil do propulsor se tornem bastante prejudicados. O processo de fabricação não apresenta qualquer controle no que se refere à seleção e controle da matéria prima utilizada, composição química, temperatura de vazamento, presença de convecção no líquido, coeficiente de extração de calor nas interfaces metal/molde e molde/ambiente, dimensão, geometria e material do molde, presença de soluto, tipo de areia utilizado no processo de moldagem, etc fatores operacionais considerados importantes na obtenção do produto final (Miyata, 1997; Quaresma et al., 1997; Wang e Beckermann, 1996; Dupouy et al., 1989; Moujekwu et al., 1995) assim como não leva em conta, segundo critérios técnicos normalmente adotados, as operações de acabamento e balanceamento estático e/ou dinâmico as quais são capazes de contribuir para a melhoria do desempenho do hélice. Assim, uma considerável quantidade de defeitos tais como porosidade, vazios, trincas, rechupes, etc é introduzida de forma sistemática ao longo do processo produtivo o que compromete bastante as propriedades mecânicas desses propulsores. A elevação da qualidade desses propulsores navais será obtida através da implementação de melhorias no projeto, processo de fabricação e utilização dos mesmos. Assim, a busca de soluções em nível de processo produtivo visando a melhoria do desempenho dos propulsores em questão pode requerer materiais e processos de fundição alternativos para a fabricação dos mesmos. Tal estudo exigiria, certamente, uma avaliação da fabricabilidade, propriedades mecânicas, custos envolvidos e desempenho das propostas alternativas. Finalmente, com base nos resultados obtidos seria apresentada a melhor solução para o problema estudado.

#### **3.2. Composição Química**

A Tabela (1) apresenta as composições químicas correspondentes a diversas amostras de hélices coletadas junto a pequenos produtores da região durante a realização dos trabalhos de campo. Os resultados acima demonstram que não existe qualquer procedimento normalizado ou critério técnico para a escolha e seleção da matéria prima utilizada na fabricação dos propulsores fato que, certamente, contribui significativamente para o baixo desempenho dos mesmos conforme constatado no levantamento de dados de campo realizado junto aos usuários. Verifica-se que os propulsores em questão são produzidos principalmente a partir de quantidades bastante variáveis de sucatas de cobre e zinco. São observadas, também, as presenças de diversos outros elementos em teores igualmente bastante variáveis. A Tabela (2) apresenta composições químicas indicadas para o processo de fabricação de hélices navais (Metals Handbook, 1961).

Tabela 1. 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	-	19,60	-	-	-	-
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	-	-	-	-	-	-

Tabela 2. Composições químicas geralmente utilizadas na fabricação de hélices navais.

Liga	Cu	Zn	Sn	Al	Fe	Pb	Ni	Mn
Bronze Mn 1	52 a 62	35 a 40	1,5 máx	0,5 a 3	0,5 a 2,5	0,5 máx	1 máx	0,5 a 4
Bronze Mn 2	50 a 57	33 a 38	1,5 máx	0,7 a 2	0,5 a 2,5	0,5 máx	2,5 a 8	1 a 4
Bronze Al 3	77 a 82	1 máx	0,1 máx	7 a 11	2 a 6	0,03 máx	3 a 6	0,5 a 4
Bronze Al 4	70 a 80	6 máx	1 máx	6,5 a 9	2 a 5	0,05 máx	1,5 a 3	8 a 20
Latão Amarelo	55 a 60	restante	1,5 máx	0,7 a 1	0,9 a 2	0,4 máx	- x -	0,3 a 0,9
Bronze de Propulsor	78 a 81	- x -	- x -	9 a 10,3	3,5 a 5,5	0,01 máx	4,5 a 5,5	0,5 a 1

### 3.3. Macroestruturas

As Figuras mostradas a seguir evidenciam o elevado grau de anisotropia que caracteriza as macroestruturas formadas no produto fundido o qual contribui fortemente para o baixo desempenho das propriedades mecânicas dos propulsores estudados. Assim, a Figura (1) apresenta a seção longitudinal de um hélice onde é evidenciada a formação de grãos equiaxiais de dimensões bastante reduzidas localizados a partir da região central da pá em direção à extremidade da mesma, grãos equiaxiais grosseiros combinados com grãos colunares distribuídos na pá próximo à região do cubo e, finalmente, grãos colunares de dimensões bem maiores com forte orientação preferencial situados no cubo. A Figura (2) mostra a seção longitudinal de alguns cubos de diferentes propulsores estudados os quais apresentam, predominantemente, estruturas colunares bastante grosseiras com orientação preferencial correspondente àquela da extração de calor pelo molde. Pode ainda ser igualmente observada nos mesmos a intensa formação de grãos equiaxiais de grandes dimensões em meio às estruturas colunares. Por outro lado, a imagem do cubo localizado à direita e abaixo na Figura em questão revela apenas a presença de cristais equiaxiais de dimensões bem inferiores quando comparadas às anteriores assim como a formação de defeitos provenientes do processo de fundição do tipo porosidade, trincas de contração e vazios de grandes dimensões. A Figura (3) apresenta a seção longitudinal de uma das pás de um hélice analisado na qual podemos observar uma acentuada

heterogeneidade estrutural, ou seja, a presença de grãos equiaxiais finos em sua região central bem como a formação de grãos colunares e equiaxiais de dimensões bem maiores localizados nas extremidades da mesma. Finalmente, na Figura (4) são mostradas as seções transversais de diferentes pás de propulsores estudados onde pode-se observar a formação predominante de estruturas compostas por grãos equiaxiais cujas dimensões são bastante variáveis.

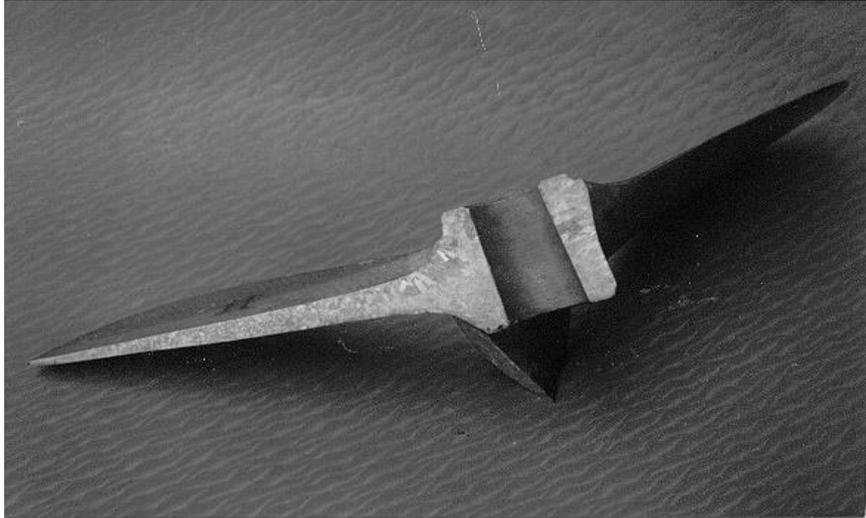


Figura 1. Macroestrutura da seção longitudinal de um hélice estudado.



Figura 2. Seções longitudinais de diferentes cubos de propulsores analisados com predominância de estruturas colunares e equiaxiais grosseiras.

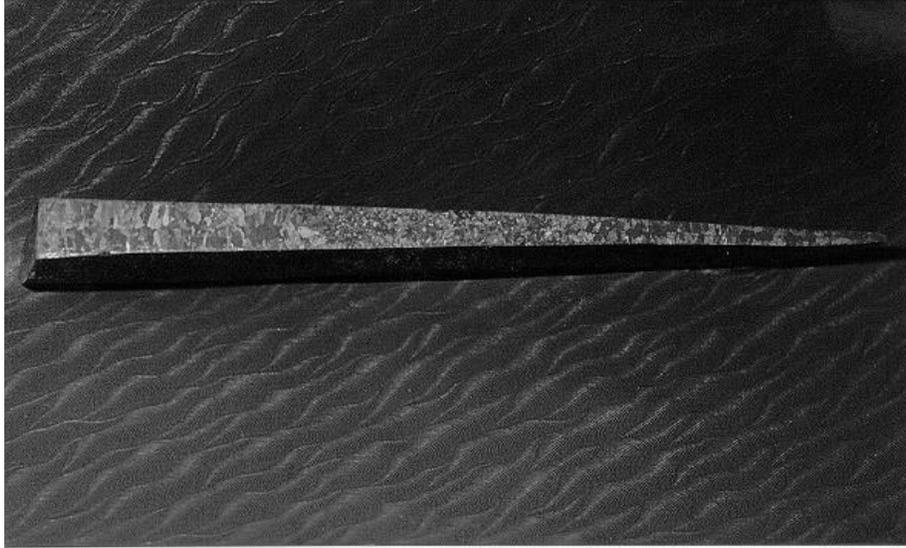


Figura 3. Seção longitudinal de uma pá de hélice com acentuada heterogeneidade estrutural.

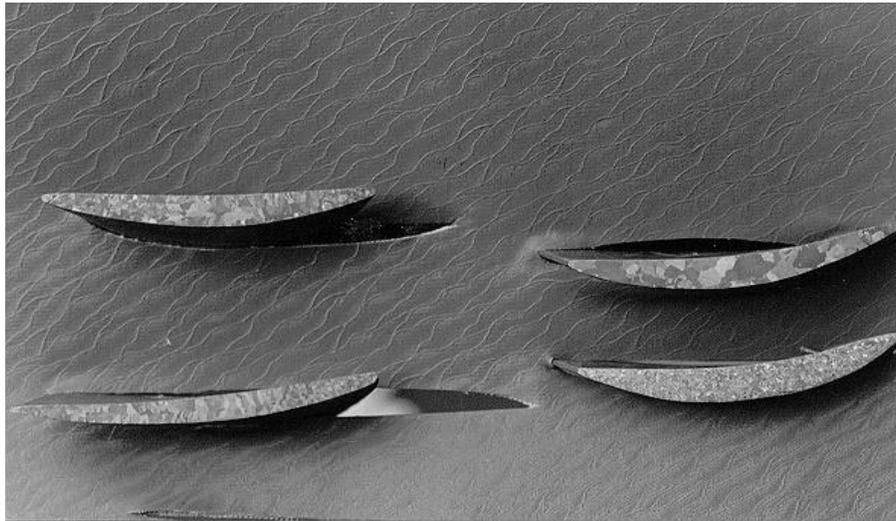


Figura 4. Seções transversais de diferentes pás de hélices com a presença de grãos equiaxiais de dimensões variáveis.

### 3.4. Microestruturas

As Figuras (5) e (6) apresentam as microestruturas brutas de fusão referentes às amostras Belém 2 e Belém 3 da seção transversal das pás de hélices, com aumento de 50 vezes, cujas composições químicas são mostradas na Tabela 1. A Figura (5) indica a presença intensa de microporosidade proveniente da evolução dos gases originados durante o processo de solidificação da peça. Por outro lado, a Figura (6)

apresenta uma microestrutura fina, não homogênea, com formação de solução sólida de fase alfa (áreas claras), com intensa segregação interdendrítica rica em zinco (áreas escuras). As Figuras (7) e (8) apresentam as microestruturas referentes às amostras Belém 4 e Bragança da seção longitudinal dos cubos de hélices, com aumento de 50 vezes, cujas composições químicas são mostradas na Tabela 1. Pode-se notar, igualmente, a presença de uma estrutura dendrítica constituída de fase alfa, rica em cobre, na qual podem ser facilmente observados os ramos dendríticos primários, secundários e terciários bem como as regiões ricas em zinco correspondentes à segregação interdendrítica. É importante salientar, que a microestrutura referente à amostra denominada Bragança apresenta-se bem mais fina que àquela da amostra Belém 4.

De acordo com os resultados obtidos, podemos afirmar, que o não controle das condições de solidificação impostas ao sistema metal/molde produz características não desejáveis à estrutura bruta de fusão dos hélices estudados, ou seja, macroestruturas anisotrópicas, vazios, trincas de contração, porosidade, produtos segregados, espaçamentos interdendríticos aleatórios, presença de outras fases, etc que proporcionam as propriedades mecânicas inferiores dos mesmos (Quaresma, 1999; Bouchard e Kirkaldy, 1997; Han e Trivedi, 1994; Caldwell et al., 1977).

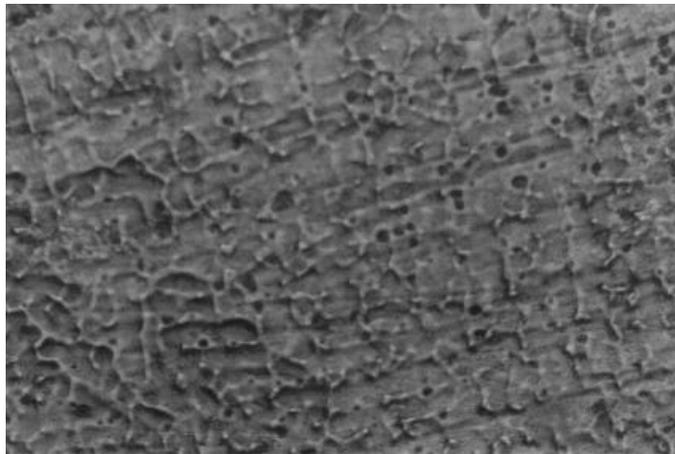


Figura 5. Microestrutura da amostra Belém 2 da seção transversal da pá de um hélice com microporosidade (aumento de 50x).

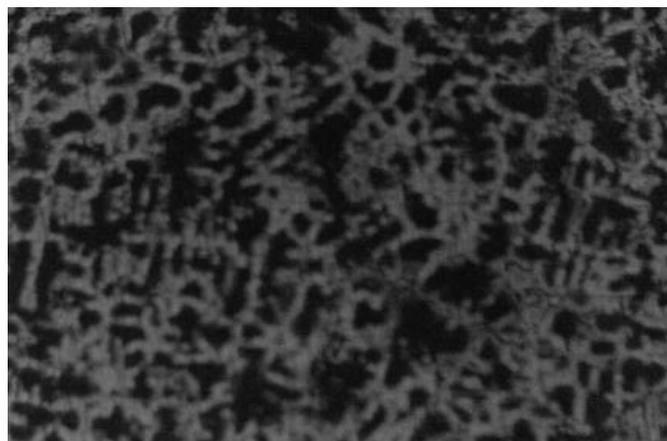


Figura 6. Microestrutura da amostra Belém 3 da seção transversal da pá de um hélice com formação de fase alfa e segregação interdendrítica rica em zinco (aumento de 50x).

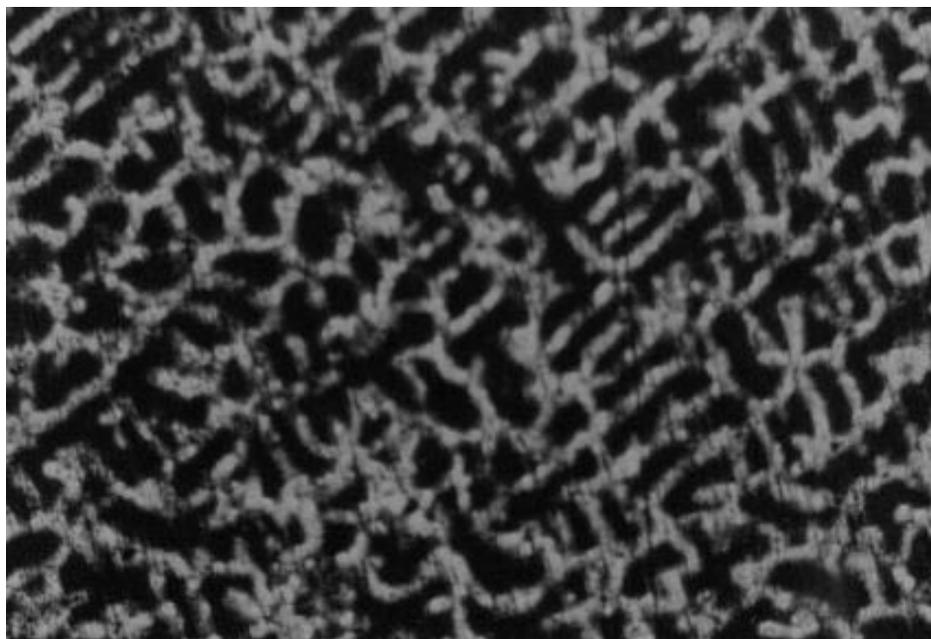


Figura 7. Microestrutura da amostra Belém 4 da seção transversal do cubo de um hélice com formação de fase alfa e segregação interdendrítica rica em zinco (aumento de 50x).

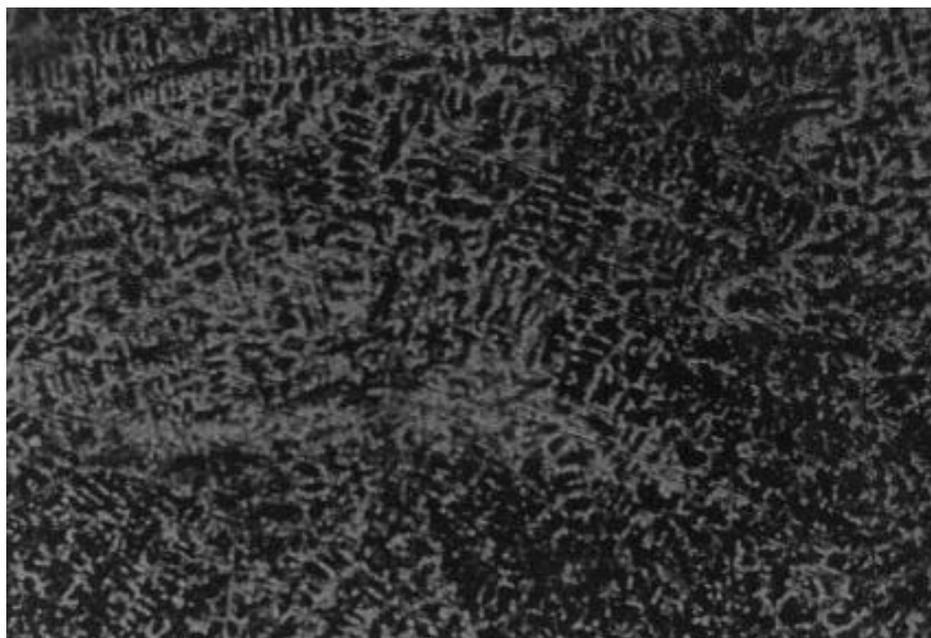


Figura 8. Microestrutura da amostra Bragança da seção transversal do cubo de um hélice com a formação de fase e segregação anteriores porém com estrutura mais refinada (aumento de 50x).

## 4. CONCLUSÃO

O processo de fabricação dos propulsores navais tipo hélice no Estado do Pará se baseia em procedimentos empíricos, portanto, sem qualquer controle de importantes parâmetros operacionais envolvidos no mesmo. As peças obtidas podem apresentar qualquer tipo de macroestrutura, ou seja, grãos coquilhados, colunares e/ou equiaxiais de várias dimensões, geometrias e localizados tanto no centro da peça como próximo à interface metal/molde. O elevado grau de anisotropia macroestrutural observado contribui para o baixo desempenho dos mesmos uma vez que, teoricamente, estruturas homogêneas é que são responsáveis por propriedades mecânicas superiores. É bastante comum a ocorrência de defeitos de fabricação como vazios, trincas de contração e porosidade. Em nível microestrutural a presença de porosidade, produtos segregados, espaçamentos interdendríticos aleatórios, presença de outras fases, etc também contribuem bastante para o comprometimento das propriedades mecânicas exigidas. Assim, é muito importante o desenvolvimento de estudos que permitam a obtenção da macroestrutura e/ou microestrutura desejada, através da fixação prévia da composição química adequada e das condições de solidificação impostas, capazes de proporcionar as propriedades mecânicas desejadas.

## 5.REFERÊNCIAS

- Bouchard, D. and Kirkaldy, J.S., 1997, "Prediction of Dendrite Arm Spacings in Unsteady and Steady-State Heat Flow of Unidirectionally Solidified Binary Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 28 B, pp. 651-663.
- Caldwell, T.W. et al., 1977, "Refinement of Dendrite Arm Spacings in Aluminum Ingots Through Heat Flow Control", *Metallurgical Transactions B*, Vol. 8 B, pp. 261-270.
- 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.
- Dupouy, M.D., Camel, D. and Favier, J.J., 1989, "Natural Convection in Directional Dendritic Solidification of Metallic Alloys – I: Macroscopic Effects", *Acta Metallurgica*, Vol. 37, pp. 1143-1157.
- Han, S.H. and Trivedi, R., 1994, "Primary Spacing Selection in Directionally Solidified Alloys", *Acta Metallurgica and Materialia*, Vol. 42, pp. 25-41.
- Loureiro, J.C.S. et al., 2000, "Influência do Processo de Fabricação no Desempenho de Propulsores Navais Tipo Hélice Utilizados por Embarcações nas Condições Amazônicas", Anais em CD-ROM do 14º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, São Pedro, Brasil.
- Metals Handbook, 1961, "Properties and Selection of Metals – Copper and Copper Alloys", American Society for Metals-ASM, Vol. 1, Ohio, USA, pp. 959-1052.
- Miyata, Y., 1997, "Dendritic Growth in Undercooled Melt with Forced Convection", *Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing*, Sheffield, UK, pp. 409-412.
- Moujekwu, C.A., Samarasekera, I.V. and Brimacombe, J.K., 1995, "Heat Transfer and Microstructure during the Early Stages of Metal Solidification", *Metallurgical and Materials Transaction B*, Vol. 26 B, pp. 361-382.

Quaresma, J.M.V. et al., 1997, “Influência do Material e da Espessura da Parede do Molde nos Coeficientes de Transferência de Calor nas Interfaces Metal/Molde e Molde/Ambiente”, Anais em CD-ROM do II Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais – ABM, São Paulo, Brasil.

Quaresma, J.M.V., 1999, “Correlação entre Condições de Solidificação, Microestrutura e Resistência Mecânica”, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, Brasil, 274 p.

Wang, C.Y. and Beckermann, C., 1996, “Equiaxed Dendritic Solidification with Convection: Part I, II and III”, Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 27 A, pp. 2754-2795.

## **ANALYSIS OF MACROSTRUCTURE AND MICROSTRUCTURE OF SCREW PROPELLERS MANUFACTURED IN THE PARÁ STATE**

**Abstract.** *In the amazon region shipping is of great importance given the extension of navigable rivers, the absence of alternative meshes in the area and because it constitutes a cheaper mean of transportation of passengers and regional products. In spite of that most of the ships and some of its mechanical components are projected in a handmade way which is based upon the empirical knowledge. Thus some of these components used by them do not have the quality required in the practice. Among these components are the screw propellers which present generally a low performance as a function of its inferior mechanical properties. Considering the social and technological importance of this subject for the region this work presents a study about the formation of macrostructure and microstructure during the foundry process of these propellers when manufactured in some cities of Pará state in order to contribute in understanding of its low mechanical properties.*

**Key words:** *ship, screw propeller, foundry, macrostructure, microstructure.*