



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA - AM.  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR



**BASÍLIO FERREIRA DE CARVALHO NETO**

**CORROSÃO INTERGRANULAR NO HÉLICE DE EMBARCAÇÃO**

**MANAUS – AM**

**2021**

**BASÍLIO FERREIRA DE CARVALHO NETO**

**CORROSÃO INTERGRANULAR NO HÉLICE DE EMBARCAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro.

**MANAUS – AM**

**2021**

---

**Biblioteca do IFAM- Campus Manaus Centro**

---

C331c Carvalho Neto, Basílio Ferreira de.  
Corrosão intergranular no hélice de embarcação / Basílio Ferreira de  
Carvalho Neto. – Manaus, 2022.  
34 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus  
Centro, 2022.

Orientador: Prof. Me. Alberto de Castro Monteiro.

1. Engenharia mecânica. 2. Corrosão. 3. Vibração. 4. Balanceamento.  
I. Monteiro, Alberto de Castro. (Orient.) II. Reis, Ailton Gonçalves.  
III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas IV.  
Título.

CDD 621

BASÍLIO FERREIRA DE CARVALHO NETO

**CORROSÃO INTERGRANULAR NO HÉLICE DE EMBARCAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Campus Manaus Centro como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro.

Aprovado em 22 / 08 / 2021

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. MSc. Alberto de Castro Monteiro.  
Instituto Federal do Amazonas - IFAM  
Presidente Banca Examinadora

Prof. DSc. José Josimar Soares  
Instituto Federal do Amazonas - IFAM  
Membro Examinador

Prof. MSc. Mitsuo Lopes Takeno  
Instituto Federal do Amazonas – IFAM  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pois sem Ele nada seria possível, toda honra, toda glória para Ele.

Ao professor Alberto de Castro Monteiro pela orientação neste trabalho.

Aos meus pais por todos os ensinamentos de vida, pelo o amor, carinho e os esforços feitos para dar-me uma educação digna.

À minha esposa Mayara e as minhas duas filhas Jemima e Luíza por estarem sempre presentes nessa etapa da minha graduação, dando o incentivo e força nessa longa caminhada, por isso elas são meus grandes amores, razão do meu viver.

Aos professores do IFAM que contribuíram na minha formação e no meu aprendizado.

A todos estes citados acima o meu muito obrigado!

## RESUMO

Visando investigar o sinistro no hélice do navio gaseiro, EPIC BALUAN, ocorrido no dia 10 de outubro de 2020. Identificamos a falha na pá de ângulo de ataque 60°, tendo em vista que o hélice é elemento de propulsão do navio e sem ele trabalhando em conjunto com o motor o navio não vai pra lugar algum e com o passar do tempo desde a sua invenção que ocorreu no ano de 1827. Ele vem cada vez mais sendo modernizado no seu processo de fabricação e modelo, sendo fabricado com materiais mais adequados e resistentes, pois nos dias de hoje temos navios maiores e com motores mais potentes e com isso o hélice precisa acompanhar essa evolução. Pesquisa-se sobre corrosão intergranular, a fim de que se estude mais sobre a propagação das trincas que ocorre ao longo dos contornos dos grãos. Para tanto, é necessário saber o que ocasionou grandes vibrações no eixo principal e casco do navio, e discorrer uma análise, uma inspeção e relatar a falha e causa da fratura do material. Realiza-se, então, uma pesquisa descritiva. Diante disso, verifica-se que devido a danificação do hélice em decorrência do impacto com um suposto tronco de árvore durante a navegação pelo rio Amazonas então a recuperação de desempenho gerou uma tensão na área afetada, devido a esse desempenho do hélice gerou na área afetada uma trinca que foi realizada uma solda para reparar a mesma e por fim resultou que o certo a se fazer foi ter que reduzir as quatro pás de maneira uniforme para assim manter o balanceamento do hélice e acabar com a vibração excessiva no navio, o que impõe a constatação de que o que levou a fratura do hélice na área reparada foi uma corrosão intergranular. A corrosão granular que é, a propagação de trincas que ocorre ao longo dos contornos dos grãos, é a possível causa da ruptura na pá do hélice.

Palavras-chave: Corrosão. Intergranular. Balanceamento. Vibração.

## **ABSTRACT**

Considering that the propeller is the ship's propulsion element and without it working together with the engine, the ship is going nowhere and with the passage of time since its invention in 1827. It comes more and more being modernized in its manufacturing process and model, being manufactured with more suitable and resistant materials, because nowadays we have larger ships and more powerful engines and therefore the propeller needs to keep up with this evolution. In order to study more about the propagation of cracks that occur along the contours of the grains. Therefore, it is necessary to know what caused great vibrations in the main axis and hull of the ship, and to discuss an analysis, an inspection and report the failure and cause of fracture of the material. Descriptive research is then carried out. Therefore, it appears that due to damage to the propeller as a result of the impact with a supposed tree trunk during navigation on the Amazon River, then the performance recovery generated a tension in the affected area, due to this propeller performance generated in the affected area a crack that was welded to repair it and finally it resulted that the right thing to do was to have to reduce the four blades evenly to maintain the balance of the propeller and end the excessive vibration in the ship, which imposes the finding that what led to the fracture of the helix in the repaired area was an intergranular corrosion. The granular corrosion that is, the propagation of cracks that occurs along the grain boundaries, is the rupture in the propeller blade.

Key words: Corrosion. Intergranular. Balancing. Vibration.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 O REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.2 O HÉLICE	12
2.3 O HÉLICE E SEUS TIPOS	13
2.4 INVESTIGAÇÃO DO HÉLICE E FALHA POR FADIGA	13
2.5 AS POSSÍVEIS CAUSAS DA FRATURA.	188
2.6 CORROSÃO INTERGRANULAR	19
2.7 CÁLCULOS DE FORÇAS ATUANTES NUM HÉLICE	22
3. METODOLOGIA	27
3.1 TESTE NÃO DESTRUTIVO COM LÍQUIDO PENETRANTE.	28
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS DURANTE A AVALIAÇÃO:	28
3.3 PROCEDIMENTOS DE TESTE DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO.	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	33

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ilustração das características de um hélice (PNA,1988) .....	12
Figura 2 Hélice de passo fixo, Fonte:nauticexpo.com .....	13
Figura 3 Hélice de passo variável, Fonte:Wikipédia.com .....	13
Figura 4 Hélice com duto, Fonte:Oszay.com .....	14
Figura 5 Propulsor tandem, Fonte:polinautica.com .....	14
Figura 6 Propulsor azimutal, Fonte:nauticexpo.com .....	15
Figura 7 Propulsor cicloidal, Fonte:nauticexpo.com .....	15
Figura 8 Propulsor lateral, Fonte:nauticursos.com.br .....	16
Figura 9 Corrosão intergranular, Fonte:slideplayer.com.br .....	16
Figura 10 Sensitização dos aços inox austeníticos por precipitação de carboneto em contornos de grão com empobrecimento em cromo de regiões intergranulares Fonte:MATEC .....	16
Figura 11 Fotomicrografia de um corte através de uma borda do painel 8090-T851 imerso em água do mar durante quatro meses; (a) em 64× e (b) em 320× para ilustrar a natureza intergranular do ataque de corrosão. Fonte: Robege (2008) .....	21
Figura 12 Poços cavernosos de aço inoxidável formados em aço inoxidável S30400 após um ataque de corrosão intergranular. (Cortesia de Russ Green, TMI) .....	21
Figura 13 a) Teoria do Elemento de Pá; b) Teoria do Disco Atuador. ....	22
Figura 14 Forças atuantes em um elemento de pá. Fonte: adaptado de Wall (2012) .....	23
Figura 15 Pá do hélice em LP .....	29
Figura 16 Pá do hélice soldado .....	30
Figura 17 Pá do hélice fraturado .....	31

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

RPM - Rotação por minuto.

END – Ensaio não destrutivo

CTF - Corrosão sob tensão fraturante

LP - Líquido penetrante

MO- Microscopia Ótica

MEV- Microscópio eletrônico de varredura

GLP- Gás liquefeito de petróleo

## 1 INTRODUÇÃO

Pela cidade de Manaus passa o Rio Solimões desaguando no Rio Amazonas, na altura do encontro das águas com o Rio Negro, essa geologia favorecem as características e condições excelentes de navegação. Realidade essa, nos favorece e nos proporciona a retiradas e entradas de mercadorias através de embarcações de: Pequenos, Médios e Grande porte. Todavia, na Amazônia brasileira, os rios carregam uma grande quantidade de plantas, troncos e galhos arrancados pelas chuvas tropicais, o que se faz necessário redobrar a atenção durante a navegação diurna e noturna por essas águas.

Porém, mesmo de porte de toda a tecnologia disponível embarcada as grandes embarcações tais como: Radar, Sonar e Fishfinder<sup>1</sup> que servem para saber a profundidade e o relevo do fundo de onde se navega, mesmo assim, o uso de vigia visual é indispensável porque esses equipamentos não mostram se há algo emergindo na frente da embarcação.

Nesse sentido, a navegação tem que ser feita com o máximo de atenção com o intuito de evitar colisões com materiais que ficam à deriva nos rios, como por exemplo: troncos ou galhos de árvores, os quais podem danificar o casco da embarcação ou até mesmo o hélice que isso é bem comum de acontecer com embarcações que navegam pelo rio Amazonas. E quando acontece de um tronco de árvore atingir um hélice da embarcação aí se torna um problema, pois vai ocorrer a deformação ou até mesmo a ruptura do material e, com isso, podem aparecer grandes vibrações pelo eixo principal e casco da embarcação, daí seu reparo se torna fundamental e para tal se exige grande conhecimento técnico na área de mecânica e materiais. Desse modo, diversos estudiosos empreenderam esforços para estudar sobre Falha, pois nesse estudo irá se compreender a mecânica dos vários tipos de falha, isto é, mecânica da fratura, fadiga e fluência.

Nesse contexto, quais as consequências acarretam nos hélices das embarcações, devido a colisões com materiais sólidos, como por exemplo: Tronco de uma árvore. Durante a navegação pelos rios e mares?

Para esse questionamento, levanta se a hipótese de que se um hélice sofrer uma deformação na sua estrutura ou até mesmo perder material em decorrência de uma fratura, isso vai fazer com que o hélice sofra um desbalanceamento, fazendo com que aumente as vibrações no eixo principal e no casco da embarcação, em consequência danificar o engaxetamento do eixo propulsor.

---

<sup>1</sup> Tradução livre: Procurador de peixe

Portanto, a realização desse Trabalho se torna relevante porque vai contribuir para uma manutenção eficaz com eficácia, diminuindo o tempo de indisponibilidade da embarcação, uma vez que a embarcação parada é prejuízo.

Dessa forma, analisar as consequências das colisões dos hélices de embarcações, com tronco de árvores ou outro material sólido encontrado nos rios que venham a causar danos ao hélice.

Assim, este trabalho tem como objetivo geral analisar o que levou a fratura do sistema propulsivo da embarcação (hélice). Desse objetivo, decorrem quatro objetivos específicos, quais sejam: a) estudar todas as características e especificidades do hélice; b) Observar as falhas causadas por colisões; c) Avaliar as consequências, pois se o hélice se perder o equilíbrio estático, desbalancear por qualquer que seja o motivo, fará com que as vibrações aumentem, podendo causar fratura em partes da embarcação que estejam expostas a estas vibrações e d) por fim, mostrar os resultados da avaliação.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 O REFERENCIAL TEÓRICO**

Os teóricos utilizados na construção desse Trabalho seguem as ideias dos autores que tratam da temática de corrosão intergranular, como por exemplo: Callister (2013), GENTIL (2011), ROBERGE, (2008).

A metodologia respeita as características estudo de caso, descritiva e explicativa.

Os resultados mostraram que as colisões no hélice resultam no desbalanceamento e elevação de vibrações no eixo principal e casco da embarcação.

Esperando-se que esse trabalho possa contribuir para uma navegação mais segura a fim de se evitar transtornos causados por colisões desse tipo e também para uma manutenção apropriada em casos semelhantes a este, formaliza-se esse trabalho.

Dessa forma, analisar o dano real no hélice e o que realmente o levou a ter um aumento gradativo de suas vibrações acima do normal e mostrar a causa que levou a fratura do hélice da embarcação.

Este trabalho está estruturado em três capítulos, bem como o objetivo geral e os objetivos específicos.

Capítulo I, descreve o objetivo, apresenta as hipóteses e métodos no qual este trabalho foi escrito

No Capítulo II, é discutido os tipos de falha. Neste sentido, toma-se como base o histórico sobre estudos sobre materiais, os tipos e características, bem como algumas pesquisas voltadas para o estudo sobre estes. Posteriormente, demonstram-se as características dos produtos objetos de estudo.

Por sua vez, o Capítulo III traz o método de trabalho, ou seja, como foram realizadas. Para tal fim, desenvolveu-se método de natureza estudo de caso, descritiva e explicativa do teste realizado, posteriormente, realizou-se um levantamento de dados envolvendo o resultado do END, para comprovar e ao mesmo tempo medir a eficácia do teste, descrito ao final deste capítulo.

## 2.2 O HÉLICE

É um elemento do sistema propulsivo com número de pás, que ao ser girado por um eixo propulsor, gera propulsão, convertendo energia rotacional em translacional e assim deslocando a embarcação que se encontra acoplado.

Ele deve ser corretamente projetado de maneira que forneça a força propulsiva necessária para uma embarcação chegar a uma determinada velocidade.

Figura 1

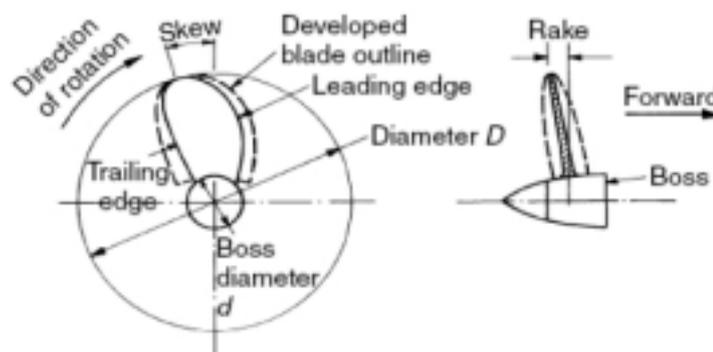


Figura 1 Ilustração das características de um hélice (PNA, 1988)

A geometria do hélice propulsor é caracterizada (Fonte: PNA, 1988), entre outras pelas seguintes dimensões, também representadas acima:

- diâmetro do hélice (*propellerdiameter*),  $D$ ;
- diâmetro do cubo(*bossdiameter*),  $d$ ;
- número de pás do hélice(*propellerbladenumber*),  $Z$ ;
- passo do hélice(*propellerpitch*),  $P$ ;

- área do disco,  $A_0 = 3,14 \cdot D^2/4$ ;
- área projetada, área da projeção das pás num plano normal ao eixo do hélice,  $A_P$ ;
- área expandida, soma das áreas das faces das pás,  $A_E$ ;
- deslocamento circunferencial ("*skew*");
- abatimento axial ("*rake*").

### 2.3 O HÉLICE E SEUS TIPOS

Conforme MEIRELLES (2015) Existem diversos tipos de Hélice, dentre eles:

Hélice de passo fixo: as pás ficam fixas no cilindro base do hélice. As fixações das pás no cubo podem ser feitas separadamente na fundição ou podem ser parte de um único bloco de fundição. (MEIRELLES,2015)



Figura 2 Hélice de passo fixo, Fonte:nauticexpo.com

Hélice de passo variável: permite a variação do passo para as diferentes condições de carregamento no hélice. Custo inicial de aquisição e de manutenção é maior em relação ao hélice de passo fixo.



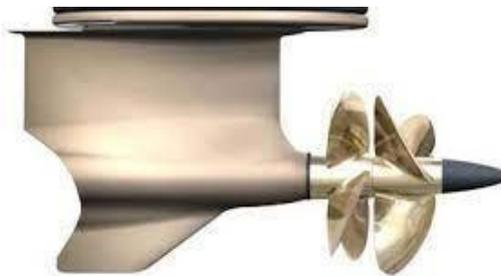
Figura 3 Hélice de passo variável, Fonte:Wikipédia.com

Hélice com duto: consiste em um hélice dentro de um duto. Ele pode ser separado em duto acelerador<sup>2</sup> e duto desacelerador<sup>3</sup>. O duto acelerador tem como objetivo principal ter uma maior eficiência em situações de forte carregamento do hélice e o duto desacelerador tem como meta a redução da cavitação;



*Figura 4 Hélice com duto, Fonte:Oszay.com*

Propulsor tandem: semelhante ao Counter-Rotating Propeller, o propulsor tandem possui dois hélices em linha. Porém, estes hélices estão conectados ao mesmo eixo, consequentemente, possuem o mesmo sentido de rotação;



*Figura 5 Propulsor tandem, Fonte:polinautica.com*

Propulsor azimuthal e azipod: é um propulsor no qual o motor que fornece potência ao hélice pode estar dentro do pod (azipod) ou fixo no casco da embarcação (azimutal). Na maioria dos propulsores do tipo azipod, o pod consegue girar 360 graus e nos dois tipos de propulsão não há a necessidade de leme.

---

<sup>2</sup> Do inglês Accelerating Duct

<sup>3</sup> Do inglês Decelerating Duct



Figura 6 Propulsor azimutal, Fonte:nauticexpo.com

Propulsor cicloidal<sup>4</sup> também conhecido como propulsor Voith Schneider, este sistema possui as pás posicionadas na vertical e não necessita de leme.



Figura 7 Propulsor cicloidal, Fonte:nauticexpo.com

Propulsor lateral (Lateral Thrust Units): este propulsor é posicionado lateralmente nos navios e no início este era disposto na proa (bow thruster). Com a necessidade de maiores manobras por parte das embarcações este propulsor é atualmente aplicado tanto na proa quanto na popa.

---

<sup>4</sup> Do inglês Cycloidal Propeller)



Figura 8 Propulsor lateral, Fonte:nauticursos.com.br

Dentro destes tipos apresentados acima, trataremos do hélice de passo fixo.

Em qualquer tipo de embarcação temos presente um propulsor cuja finalidade é a geração de uma força propulsiva. As soluções propulsivas são muito diversas, mas predominantemente os navios continuam a utilizar hélices simples como meio de propulsão.

É um elemento do sistema propulsivo que possui um número de pás, que ao ser girado por um eixo propulsor, gera propulsão, convertendo energia rotacional em translacional e deslocando a embarcação a que se encontra acoplado.

Ele deve ser corretamente projetado de maneira que forneça a força propulsiva necessária para uma embarcação chegar a uma determinada velocidade.

#### 2.4 A INVESTIGAÇÃO DO HÉLICE E FALHA POR FADIGA.

Acidentes e incidentes motivaram avanços científicos e tecnológicos na área da mecânica da fratura, os primeiros estudos na área de falhas que se tem notícia foram realizados por Leonardo da Vinci (1452-1519) na construção do hélice. (MIRANDA, 2014).

Estudos esses que se fazem muito importantes para os dias atuais, pois a partir deles é possível que o engenheiro projete um componente ou estrutura de forma a minimizar a possibilidade de uma falha. Dentro desse contexto nós temos Falha por fratura, fadiga e fluência.

A falha por fratura consiste na separação de um corpo em duas ou mais partes em resposta de uma tensão dinâmica e em temperaturas que são baixas em relação à temperatura de fusão do material. Uma fratura também pode ocorrer em razão da fadiga que é quando são por tensões cíclicas e da fluência (deformação que varia com o tempo e que ocorre em ambientes sob temperaturas elevadas). (CALLISTER,2013)

Nos metais podem haver dois modos de fratura: dúctil e frágil. O modo de fratura vai se basear na característica que o material tem em apresentar deformação plástica. Os metais dúcteis tem a capacidade de absorver uma grande quantidade de energia antes que ocorra a fratura. Já uma fratura frágil tem pouca ou nenhuma deformação plástica. (CALLISTER,2013)

Uma informação muito mais detalhada em relação ao mecanismo da fratura está disponível a partir de uma análise metalográfica, a luz da Microscopia Ótica - MO, normalmente com a utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV. Os estudos dessa natureza são denominados Fractográficos. O Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV é preferido para as análises Fractográfias, em resolução e profundidade de campo muito melhores que um microscópio óptico; essas características são necessárias para revelar as particularidades topográficas das superfícies de fratura em 3D. (CALLISTER,2013)

A fratura frágil ocorre sem nenhuma deformação apreciável e por meio da rápida propagação de uma trinca. A direção do movimento da trinca é aproximadamente, perpendicular à direção da tensão de tração aplicada, e produz uma superfície de fratura relativamente plana 2D. (CALLSITER,2013).

Sobre fratura frágil vale mencionar também sobre clivagem que é uma ruptura sucessiva e repetida de ligações atômicas ao longo de planos cristalográficos específicos. Também pode se mencionar que esse tipo de fratura é conhecido como transgranular, porque as trincas da fratura passam através dos grãos. E em algumas metais e ligas metálicos, a propagação das trincas ocorrem ao longo dos contornos dos grãos, a esse tipo de fratura menciona se que é denominado intergranular, objeto do estudo nesse trabalho. Mediante pesquisa fotomicrográficas, verifica-se que normalmente esse tipo de fratura resulta após processos que reduzem a resistência ou fragilizam as regiões dos contornos dos grãos. (CALLISTER,2013)

Imprescindível dentro dessa pesquisa salientar que os materiais tem formas e características particulares e assim reações e comportamentos diferentes a determinados tipos de ação que sofrerem. O tipo de material e o tipo da Tensão sofrida vai determinar qual tipo de fratura que sofreu o material de construção do hélice.

Após breve exposição dos tipos de fratura e suas características, aborda-se posteriormente causas da fratura.

Avaliando se os dados pesquisados, em que o sistema de propulsão do navio é um causador de vibração, mas dentro do ponto de vista estático e hidrostático de parâmetros normais, logo é possível admitir que o que realmente aumentou o nível de vibração no eixo

principal e do casco da embarcação em questão foi realmente o fato de o hélice ter sido deformado após a colisão com o tronco de árvore durante a navegação.

Depois dessa colisão que veio a deformar o hélice da embarcação, não só aumentou o nível de vibração da embarcação, mas resultou na perda de potência e comprometendo toda a estrutura da embarcação devido a elevação de vibrações.

## 2.5 AS POSSÍVEIS CAUSAS DA FRATURA.

O hélice do estudo é fabricado por fundição em uma liga de bronze, níquel e alumínio, este elemento orgânico de propulsão é acoplado ao motor da embarcação e empurra a água convertendo energia rotacional em translacional e desloca a água e faz com que a embarcação se movimente.

Como o hélice é um elemento de propulsão da embarcação e conseqüentemente trabalha imerso na água ele está sujeito a contato com corpos estranhos existentes nos rios e mares, tais como: troncos de árvores, bancos de areias, recifes e pedras entre outros, já mencionado anteriormente. O contato do hélice em rotação, durante navegação de cruzeiro, como qualquer corpo sólido, acrescentando a acidez da água dos rios, Rio Negros, Rio Solimões e Rio Amazonas o contato com hélice poderá levá-lo a deformação, conseqüente a perda de material e esse infortúnio acarreta em desbalanceamento do hélice e eixo principal causando vibração por todo o casco da embarcação.

Acrescenta-se que três variáveis devem ser consideradas em relação à possibilidade de fratura de um dado componente estrutural, quais sejam: a tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) ou a tenacidade à fratura em deformação plana ( $K_{Ic}$ ), a tensão imposta ( $\sigma$ ) e o tamanho do defeito ( $a$ ), considerando obviamente que o valor de  $Y$  tenha sido determinado. (CALLISTER, 2013).

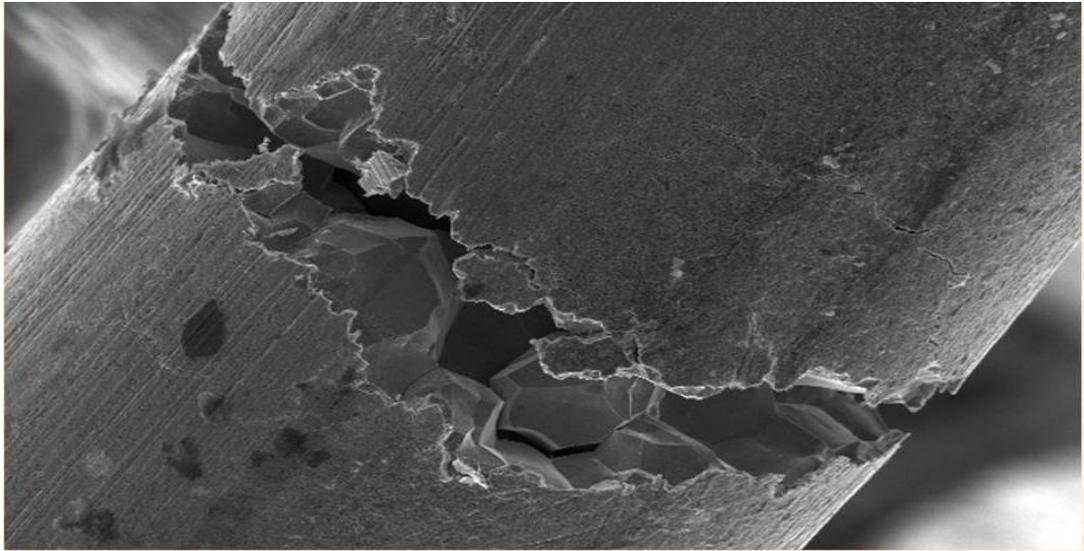
No que se refere às possibilidades da causa da fratura pode-se destacar que uma hipótese seja o fato de que o hélice colidiu com um tronco de árvore quando navegava pelo rio Amazonas.

Outra hipótese vetorizada de que seja a falha no processo de fabricação, durante a manufatura por fundição os grãos não tenham se arranjado de forma adequada e formando-se poros na pá do hélice. E com infiltração de líquido de alta fluidez, como água doce e salgada, durante o passar do tempo, em decorrência do tratamento de envelhecimento natural da liga metálica. Corrosão essa causada por microestrutura heterogênea resultante da fundição. De modo que surgem a corrosão entre os grãos e depois de horas de trabalho sofrendo esforço essa corrosão comina. E como resultado do efeito da mutação intergranular à fratura a se

propagar no contorno de grão, o efeito da mutação microestrutural se tornou evidente e se manifesta na fragilidade do material ocorrida pela porosidade do material. (CALLISTER,2013)

## 2.6 CORROSÃO INTERGRANULAR

A corrosão intergranular é uma forma de corrosão localizada que ocorre preferencialmente ao longo das bordas do grão de um metal. Apesar de seu mecanismo variar para cada sistema metálico, em geral, sua aparência física em nível microscópico é a mesma. Esse tipo de corrosão pode ser extremamente prejudicial para o equipamento (ROBERGE,2008).



*Figura 09 Corrosão Intergranular, Fonte: slideplayer.com.br.*

Ela ocorre quando os contornos de grão estão muito reativos diferenciando-os do interior do grão. Isso pode acontecer devido a situações como a presença de impurezas nos contornos dos grãos, o aumento ou a redução da concentração dos elementos de liga na região dos contornos dos grãos (FERREIRA et al.,2002).

É comum em torno de cordões de solda, normalmente, em aços inoxidáveis não estabilizados ou com mais de 0,03% de carbono (FERREIRA et al., 2002) Isso ocorre, pois, esses aços recebem um tratamento térmico em sua fabricação e, se submetidos posteriormente a um procedimento de solda, sofrem sensitização com a precipitação de carboneto de cromo ou de cromo-molibdênio nos contornos de grão da estrutura cristalina do aço inoxidável e ligas metálicas. Com isso, os contornos de grão tornam-se mais reativos do que o interior do grão e o metal e ligas metálicas tornam-se suscetíveis à fraturas intergranulares (TALBOT, 1998).



*Figura 10 Sensitização dos aços inox austeníticos por precipitação de carboneto em contorno de grãos com empobrecimento em cromo de regiões intergranulares, Fonte: MATEC*

Esse processo de mutação pode promover a perda das propriedades mecânicas do material devido a corrosão submetido à tensão fraturante (CTF) e, com isso, pode consequentemente ocasionar uma fratura do elemento de máquina ou equipamento (GENTIL,2011).

A corrosão Intergranular, ou transgranular, ocorre nos grãos da rede cristalina do material metálico. Nesse tipo de corrosão também é observado a corrosão sob tensão fraturante (CTF), visto que a perda das propriedades mecânicas do material, devido a essa corrosão, pode ocasionar uma fratura (GENTIL,2011).

Essas corrosões ou uma delas pode ter fragilizado o material de construção do hélice em questão, reduzindo a resistência mecânica ao impacto ou a tenacidade.

Os pites são frequentemente associados a corrosão intergranular, por exemplo, podem progredir da cavidade principal para dentro do metal. No exemplo mostrado na Fig. 9, o pit na borda de uma folha de alumínio-lítio progrediu como corrosão intergranular na raiz dos pites. Em outros casos a corrosão intergranular é o precursor para a formação de pites cavernosos como mostrado na Fig. 11.

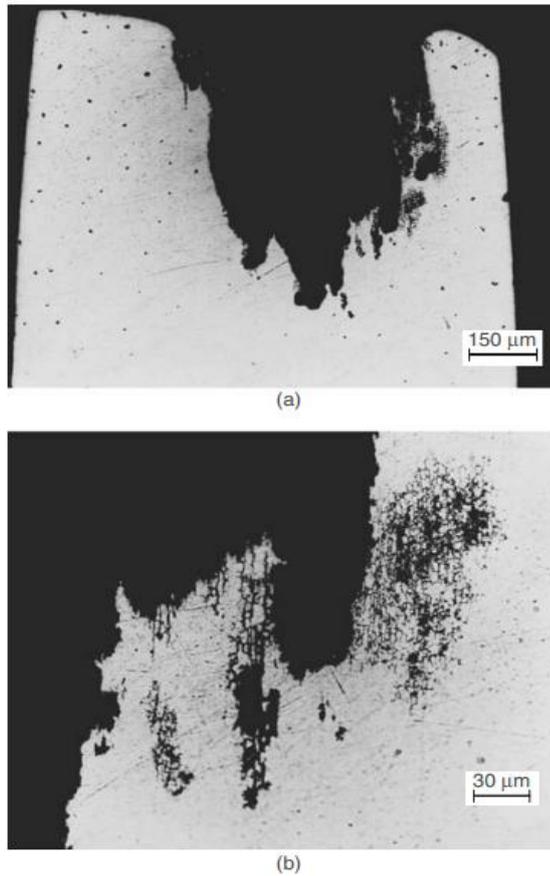


Figura 11 Fotomicrografia de um corte através de uma borda do painel 8090-T851 imerso em água do mar durante quatro meses; (a) em 64x e (b) em 320x para ilustrar a natureza intergranular do ataque de corrosão. Fonte: Robege (2008)

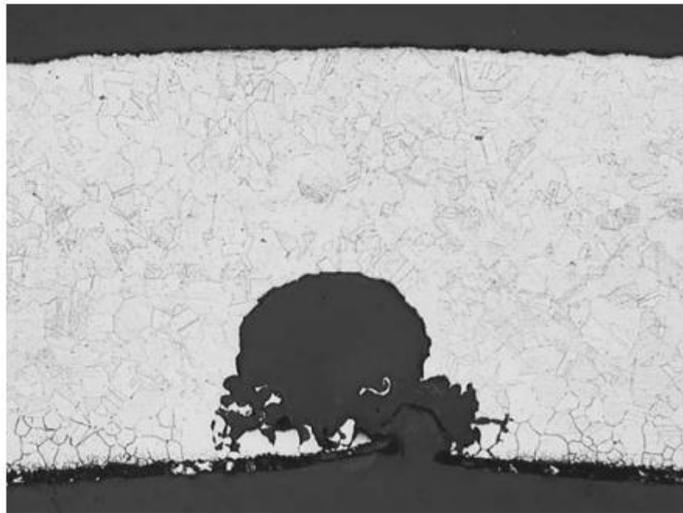


Figura 12 Poços cavernosos de aço inoxidável formados em aço inoxidável S30400 após um ataque de corrosão intergranular. (Cortesia de Russ Green, TMI)

## 2.7 CÁLCULOS DE FORÇAS ATUANTES NUM HÉLICE

As principais teorias para cálculo de forças numa hélice são a teoria do disco atuador: Cypriano (2014) diz que essa teoria assume que a hélice é um disco de espessura desprezível, capaz de criar um empuxo uniforme, através de um diferencial de pressão entre as partes posterior e anterior do hélice e a teoria do elemento de pá: segundo Rocha (2019), ela analisa as forças atuantes em faixas transversais de comprimento infinitesimal em cada pá, para então somá-las, obtendo a força total em cada pá. Ambas as teorias podem ser readaptadas para o trabalho no meio marinho em hélices de embarcação.

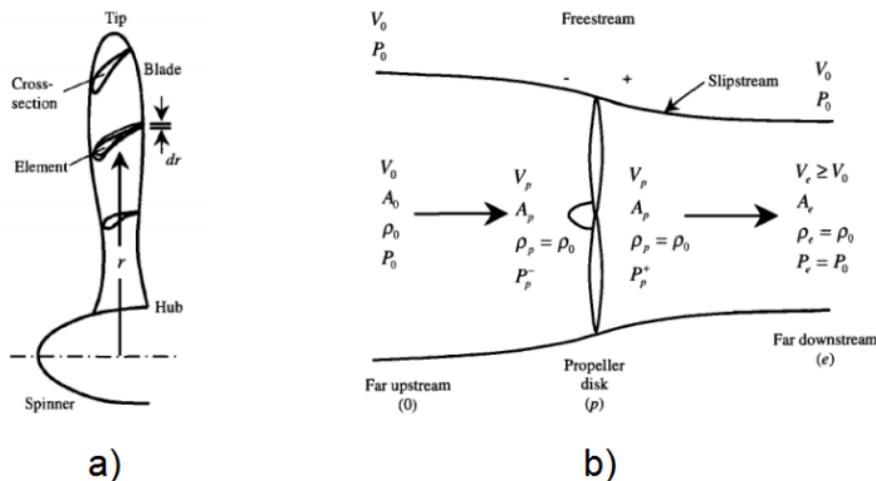


Figura 93 a) Teoria do Elemento de Pá; b) Teoria do Disco Atuador.

Vamos focar na Teoria do Elemento de Pá, pois a teoria utiliza-se dos pontos não abordados pela teoria do disco atuador, principalmente no que diz respeito ao dimensionamento das hélices, Drzewiecki (1920) foi o pioneiro no desenvolvimento da Teoria do elemento de pá (em inglês, Blade Element Theory – BET), em 1892. Esta é a teoria responsável por comparar a hélice a uma asa rotativa, apropriando-se dos estudos em aerofólios do início do século.

Posteriormente, Weick (1930), em 1930, aprimorou a teoria de Drzewiecki (1920) para considerar a interferência entre as pás da hélice, além de assumir os fatores de perda das pontas das hélices de Prandtl e Betz (1919).

A teoria do elemento de pá baseia-se na divisão da hélice no sentido de seu comprimento radial, em elementos bidimensionais e infinitesimais, que atuarão como aerofólios no movimento helicoidal descrito pela hélice (SOUZA, 2017).

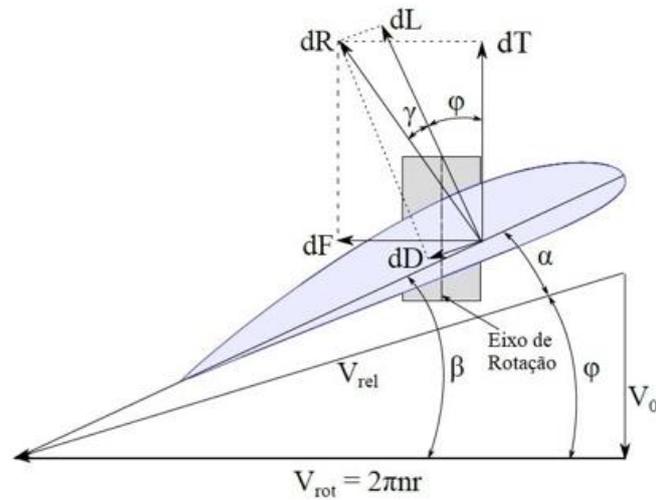


Figura 14 Forças atuantes em um elemento de pá. Fonte: adaptado de Wall (2012)

Para o cálculo da tração infinitesimal fornecida pela seção do aerofólio, os vetores de forças  $dL$  e  $dD$  são reescritos em termos de  $dT$  e  $dF$ , de tal forma que o vetor  $dT$  seja perpendicular ao eixo de rotação do hélice e conseqüentemente paralelo ao eixo de deslocamento. Já o vetor  $dF$ , contido no plano de rotação, é utilizado para calcular o torque atuante no hélice.

Dentre as forças que atuam sobre um hélice naval, podemos explicitar a equação, com a força atuante numa lâmina de aerofólio:

$$\frac{F}{\rho AV^2} = f(R_n, \alpha) \quad (2.1)$$

A força ( $F$ ) experimentada por uma lâmina de aerofólio é determinada pela sua Área ( $A$ ), de acorde ( $\rho$ ), a velocidade ( $V$ ) e o Ângulo do aerofólio para o fluxo, ou chamado Ângulo de incidência ou Ângulo de ataque ( $\alpha$ ).

A fora tem duas partes – em que a normal é direção de fluxo de elevação ( $L$ ) e em que a direção de fluxo é de arrasto ( $D$ ). Ambos são expressos de forma não-dimensional:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (2.2)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (2.3)$$

Cada coeficiente é uma função do ângulo de ataque e Número de Reynolds. Como o ângulo de ataque aumenta rapidamente ao levantar a partir do ângulo sem elevador antes de abrandar o seu aumento e, em seguida, diminuindo, com uma queda acentuada então o ângulo de bloqueio é alcançado e o fluxo é interrompido. O arraste sobe lentamente no início e como a taxa de aumento no elevador cai e o ângulo de ataque aumenta a resistência aumenta de forma mais acentuada.

Para uma dada força de circulação ( $\tau$ ),  $Elevação = L = \rho V \tau$ . O efeito do caudal sobre a circulação e em torno do velame é reduzir a velocidade ao longo do rosto e aumentá-la sobre a parte de trás da lâmina. Se a redução da pressão é muito em relação a pressão ambiente do fluido, a cavitação ocorre, as bolhas se formam na Área de baixa pressão e são movidos no sentido de bordo de fuga da lâmina onde elas entram em colapso e a pressão aumenta, o que reduz a eficiência do hélice e aumenta os ruídos das forças geradas pelo colapso da bolha, podendo causar dano permanente nas superfícies da lâmina.

Tomando uma seção radial arbitrária (Figura 11) de uma lâmina em R, se as revoluções são N, a velocidade de rotação será  $2\pi Nr$ . Se a lâmina for um parafuso completo e essa avançar através de um sólido, a taxa de NP, em que P é o passo da pá. Na Água a velocidade de avanço será bastante inferior,  $V_a$ , a diferença, ou a razão de deslizamento, será:

$$deslize = \frac{(NP - V_a)}{ND} = 1 - \frac{J}{p} \quad (2.4)$$

em que J é o coeficiente de avanço ( $V_a/ND$ ) e p é a relação de passo (P/D).

As forças de sustentação e arrasto na lâmina, dA, onde a força normal a superfície é dL:

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_L dA = \frac{1}{2} \rho C_L [V_a^2 (1 + a)^2 + 4\pi^2 r^2 (1 - a')^2] b dr \quad (2.5)$$

Onde:

$$V_{rel}^2 = V_a^2 (1 + a)^2 + 4\pi^2 r^2 (1 - a')^2 \quad (2.6)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_D dA = \frac{1}{2} \rho C_D [V_a^2 (1 + a)^2 + 4\pi^2 r^2 (1 - a')^2] b dr \quad (2.7)$$

sendo:  $V_{rel}$  = velocidade relativa de escoamento, resultante da soma vetorial entre a velocidade tangencial de rotação da hélice ( $V_{rot}$ ) e a velocidade de escoamento do ar ( $V_0$ );

Observando a Figura 13, pode-se definir a composição vetorial da tração diferencial em termos do ângulo  $f$ , representativo do ângulo de incidência da velocidade relativa do escoamento. então, o termo  $dT$  será:

$$dT = dL \cos(\varphi) - dD \sin(\varphi) \quad (2.8)$$

Substituindo as Equações, o termo diferencial  $dT$  passa a ser representado sem qualquer outro termo diferencial, tendo-se a seguinte equação:

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 b dr (C_L \cos(\varphi) - C_D \sin(\varphi)) \quad (2.9)$$

Ainda pela Figura 14, nota-se que o ângulo de decomposição vetorial de  $dR$  é representado pelo ângulo  $\gamma$ . É feita então uma consideração trigonométrica entre as componentes  $dL$  e  $dD$ , descrita pela Equação dada a seguir:

$$\tan(\gamma) = \frac{dD}{dL} = \frac{C_D}{C_L} \quad (2.10)$$

Por fim, a velocidade relativa é reescrita em termos da velocidade de escoamento do ar e o ângulo de decomposição  $\varphi$  entre estes. Tem-se:

$$V_{rel} = \frac{V_0}{\sin(\varphi)} = \frac{V_a(1+a)}{\sin(\varphi)} \quad (2.11)$$

Então:

$$dT = \frac{1}{2} \rho C_L \left( \frac{V_a^2 (1+a)^2 \cos(\gamma + \varphi)}{\sin^2(\varphi) \cos(\gamma)} \right) b dr \quad (2.12)$$

Um desenvolvimento semelhante pode ser usado para calcular o torque atuante na hélice:

$$dQ = r dF = \frac{1}{2} \rho C_L \left( \frac{V_a^2 (1+a)^2 \sin(\gamma + \varphi)}{\sin^2(\varphi) \cos(\gamma)} \right) b r dr \quad (2.13)$$

Conhecendo os valores infinitesimais  $dT$  e  $dQ$ , para encontrar a resultante de tração  $T$  e torque  $Q$  atuantes na hélice basta integrar as equações ao longo do raio  $R$ , passando a ter:

$$T = \frac{1}{2} \rho V_a^2 (1 + a)^2 \int_0^R C_L \left( \frac{\cos(\gamma + \varphi)}{\text{sen}^2(\varphi) \cos(\gamma)} \right) b dr \quad (2.14)$$

$$Q = \frac{1}{2} \rho V_a^2 (1 + a)^2 C_L \left( \frac{\text{sen}(\gamma + \varphi)}{\text{sen}^2(\varphi) \cos(\gamma)} \right) b r dr \quad (2.15)$$

A potência de impulso total da hélice é proporcional a  $TV_a$ . Assim, a eficiência será  $TV_a/2\pi NQ$ . A eficiência da lâmina é na proporção entre o impulso e o torque:

$$\text{Eficiência do Elemento Lâmina} = \frac{V_a}{2\pi N r} \times \frac{1}{\tan(\gamma + \alpha)} \quad (2.16)$$

O impulso  $T$ , e o torque  $Q$ , depende do diâmetro da hélice  $D$ , revoluções  $N$  e taxa de avanço  $V_a$ , em conjunto com o caráter do fluido. Estes fatores criam a seguinte relação não-dimensional:

$$T = \rho V_a^2 D^2 \left[ f_1 \left( \frac{ND}{V_a} \right), f_2 \left( \frac{v}{V_a D} \right), f_3 \left( \frac{gD}{V_a^2} \right) \right] \quad (2.17)$$

onde  $f_1$  é uma função do coeficiente de avanço,  $f_2$  é uma função do número de Reynolds e  $f_3$  é uma função do Número de Froude. Tanto  $f_2$  quanto  $f_3$  são susceptíveis de serem pequenas em comparação com  $f_1$  sob condições normais de funcionamento, de modo que a expressão pode ser reduzida para:

$$T = \rho V_a^2 D^2 \times f_r \left( \frac{ND}{V_a} \right) \quad (2.18)$$

E o impulso ficaria:

$$Q = \rho V_a^2 D^3 \times f_q \left( \frac{ND}{V_a} \right) \quad (2.19)$$

Quando um hélice é adicionado a um navio seu desempenho é alterado; há perdas mecânicas na transmissão de energia; um aumento geral na resistência total; e também impede

o casco e torna o fluxo através da hélice não uniforme. A razão entre a eficiência de um hélice ligado a um navio ( $P_D$ ) e em Águas abertas ( $P'_D$ ) é denominada eficiência rotativo relativo.

O rendimento da propulsão global (uma extensão da potência eficaz ( $P_E$ )) é desenvolvido a partir do coeficiente de propulsão (PC), o qual é derivado a partir da potência do eixo instalado ( $P_S$ ) modificado pela potência efetiva para o casco com anexos ( $P'_E$ ), a potência de impulso do hélice ( $P_T$ ), e a eficiência em relação rotativa.

$$P'_E/P_T = \text{Eficiência do casco } \eta_H$$

$$P_T/P'_D = \text{Eficiência do hélice } = \eta_O$$

$$P'_D/P_D = \text{Eficiência rotativo relativo } = \eta_R$$

$$P_D/P_S = \text{Eixo de eficiência de transmissão}$$

Produzindo o seguinte:

$$PC = \left( \frac{\eta_H \times \eta_O \times \eta_R}{\text{coeficiente de apêndice}} \right) \times \text{eficiência de transmissão} \quad (2.20)$$

Os termos contidos nos suportes são comumente agrupados como o coeficiente de Quasi-Propulsão ( $QPC, \eta_D$ ). O  $QPC$  é produzido a partir de experimentos em pequena escala e é modificado com um fator de carga para navios de tamanho completo.

### 3. METODOLOGIA

Sem dúvidas, uma pesquisa científica deve-se pautar numa ordem sistemática de planejamento, de modo a permitir o uso de métodos capazes de dar respostas ao problema de pesquisa posto sob estudo, além de outras indagações subjacentes. Nesta proposta de pesquisa a ideia é analisar os tipos de falha que se aproxima para obter se a solução do que levou a fratura do hélice da embarcação.

Para esse fim, utilizou-se um método de natureza descritiva, entendendo essa natureza como: A pesquisa descritiva exige do investigador uma série de informações sobre o que deseja pesquisar. Esse tipo de estudo pretende descrever os fatos e fenômenos de determinada realidade (TRIVIÑOS,1987), pois está sendo exposto uma série de informações sobre o

assunto pautado e explicativa: Este tipo de pesquisa preocupa-se em identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos (GIL,2007), ou seja, este tipo de pesquisa explica o porquê das coisas através dos resultados oferecidos. Segundo GIL (2007, p.43), uma pesquisa explicativa pode ser a continuação de outra descritiva, posto que a identificação de fatores que determinam um fenômeno exige que este esteja suficientemente descrito e detalhado. Pois procura-se identificar os fatores que levaram a fratura do hélice e alguns exemplos que tivemos na história da mecânica no decorrer da história dos estudos de falha. Posteriormente, realizou-se um levantamento de dados envolvendo o ocorrido que levou o navio a perder uma parte do material do elemento hélice.

Primeiramente, os testes e análises foram estruturados com o intuito de evidenciar possíveis falhas relacionadas à solda feita para reparo da pá danificada. Reduzindo a resistência mecânica ao impacto ou a tenacidade – motivo soldagem. Tais falhas são oriundas da colisão do hélice com tronco de árvore. Ao mesmo tempo, foi realizada a identificação de falhas potenciais provenientes de corrosão intergranular. Para tal, realizou-se uma sistematização para descrever e explicar o teste por líquido penetrante realizado na pá deformada.

### 3.1 TESTE NÃO DESTRUTIVO COM LÍQUIDO PENETRANTE.

Na investigação por END (ensaio não destrutivo) O teste executado foi por líquido penetrante (LP). A fim de inspecionar e identificar possíveis discontinuidades como trincas, porosidades, falta de fusão, falta de deposição, falta de penetração, entre outras discontinuidades que comprometessem o desbalanceamento do elemento hélice. Obteve-se o seguinte resultado: Foi detectado trincas na área da pá danificada, o que agravou numa adoção de solda oxiacetilênica.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS DURANTE A AVALIAÇÃO:

1. Escova de aço;
2. Desengraxante;
3. líquido penetrante Vp-30 Hi-Metal-chek-Aerosol;
4. Revelador D70;

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE TESTE DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO.

Foi realizada limpeza da superfície da pá do hélice que recebeu a solda.

Em seguida foi aplicado o líquido penetrante e aguardado alguns minutos, depois foi lavado com água para remoção do líquido penetrante e então foi aplicado o líquido revelador. E foi detectado trincas.



*Figura 15 Pá do hélice em LP*

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na avaliação da inspeção da solda, porque foi observada a presença de trincas no cordão da solda realizado na pá do hélice, esse problema se deu ao fato de se tratar do hélice ser fabricado por uma liga de matérias como bronze, níquel e alumínio. Reduzindo a resistência mecânica ao impacto ou a tenacidade. Isso dificulta a realização de uma solda perfeita. Como demonstrado da figura 15.

CALLISTER (2013), analisou os tipos de fratura e descreveu que consiste na separação de um corpo em duas ou mais partes em resposta à imposição de uma tensão estática (isto é, uma tensão constante ou que varia lentamente ao longo do tempo) e em temperaturas que são baixas à temperatura de fusão do material. Uma fratura também pode

ocorrer em razão da fadiga (quando são impostas tensões cíclicas) e da fluência (deformação que varia com o tempo e que ocorre normalmente sob temperaturas elevadas).

No que se refere a situação da hélice esse permaneceu assim e como poucos dias menor que 90 dias de navegação a pá do hélice veio a fraturar e perdendo a ponta na qual havia sido soldada (Figura 16) e detectado trinca no teste de líquido penetrante. Não foi o certo a se fazer, mas foi a medida paliativa que foi tomada afim de reparar o problema até que fosse possível o navio ir para um estaleiro apropriado para o seu porte e realizar o serviço adequado que nesse caso seria a troca do elemento hélice por completo.

CALLISTER (2013), por exemplo, disse que a falha de materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejável, pois incluem vidas humanas que são colocadas em risco, perdas econômicas, e indisponibilidade de produtos e serviços.

Neste sentido, concordando com Callister (2013), o incidente como este, causou prejuízo para o armador, pois o navio ficou parado para realização do serviço. E com isso a indisponibilidade da embarcação, fazendo com que atrasasse o abastecimento de gás liquefeito de petróleo GLP em Belém do Pará.



*Figura 106 Pá do hélice soldado*



*Figura 17 Pá do hélice fraturado.*

## 5. CONCLUSÃO

Conclui-se que a corrosão intergranular decorreu por fatores de falha na estrutura do material, seja porosidade ou trinca ocasionada por impacto recebido pelo material por alguma força externa, haja vista que o hélice é fabricado por material de liga metálica que se classifica como dúctil.

Isto posto, a pesquisa demonstrou que o que levou a fratura do hélice foi o reparo realizado por solda e que a mesma, após realizado teste ensaio por líquido penetrante apresentou propagação de trincas no cordão de solda e mesmo assim foi posto em atividade, por não se ter opção, devido Manaus não dispor de estaleiro para navio de grande porte. O que levou posteriormente a fratura por corrosão intergranular e a medida tomada foi reduzir as outras pás de igual modo a fim de estabelecer o balanceamento correto da hélice e eixo principal, evitando-se assim um dano maior na estrutura do eixo e casco da embarcação.

Esta pesquisa vem contribuir com o conjunto de estudos realizados referentes a corrosão intergranular.

Por fim, pode-se sugerir para próximos estudos acadêmicos, no que se refere acerca dessa temática: analisar as falhas de materiais, bem como corrosão intergranular, nos materiais de metais.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT. NBR ISO/IEC 17025. *Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração*. São Paulo: ABNT, 2005.

BETZ, A. *Schraubenpropeller mit geringstem energieverlust*. In: GOTTINGER NACHRICHTEN. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Berlin, 1919. p. 193–217.

CALLISTER Jr., W.D, *Ciência e Engenharia dos materiais, uma introdução*, - 8. Ed – Guanabara,2013.

CYPRIANO, M. A. *Estudo das forças geradas por um hélice*. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2014.

DRZEWIECKI, S. *Théorie générale de l'hélice: hélices aériennes et hélices marines*. Paris: Gauthier-Villars, 1920. 183 p.

FERREIRA, L. A. COSTACURTA, R.F, ALBERTI, A.M., ZDEBSKY, S.R, *Curso de Formação de Operadores de Refinaria, Química Aplicada-corrosão*. Curitiba: Equipe Petrobras, 2002.

GENTIL, Vicente; *Corrosão*. - 6 ed - Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MEIRELLES, Alexander; *Vibração excessiva e falha de elementos estruturais em navio*, Rio de Janeiro,2015

MIRANDA, C. A. J.; *Mecânica da Fratura na Indústria Nuclear*. Rio de Janeiro: Eletrobras-Eletronuclear, 2014.

ROBERGE,Pierre R; *Corrosion Engineering Principles and Practice*. 1 ed. Estados Unidos; The McGraw-Hill Companies Inc, 2008. 754p.

ROCHA, L.M. *Estudo e dimensionamento de hélices para propulsão aeronáutica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.

SOUZA, J. R. d. *Análise de Desempenho de Hélices para Aplicação em Aero- naves não Tripuladas*. 159 p. Dissertação (Mestrado em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica, Mecânica) — Instituto Tecnológico da Aero- náutica, São José dos Campos, 2017.

TALBOLT,David; TALBOLT,James; *Corrosion Science and technology*. 2 ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 1998. 552p.

WALL, D. L. *Optimum Propeller Design for Electric UAVs*. 130 p. Dissertação (Degree of Master of Science) — Graduate Faculty of Auburn University, Auburn, 2012.

WEICK, F. E. *Aircraft Propeller Design*. 1a. ed. New York - London: McGraw Hill Book Company, 1930.