

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE COMPONENTES DE UM SISTEMA DE ACOPLAMENTO  
MECÂNICO DE EMBARCAÇÕES DE NAVEGAÇÃO INTERIOR NA OPERAÇÃO DE  
APROXIMAÇÃO

por

Alessandro Gallina

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2015

VERIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE COMPONENTES DE UM SISTEMA DE ACOPLAMENTO  
MECÂNICO DE EMBARCAÇÕES DE NAVEGAÇÃO INTERIOR NA OPERAÇÃO DE  
APROXIMAÇÃO

por

Alessandro Gallina

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignácio Iturrioz

Co-orientador: Msc. André Schaan Casagrande

Comissão de Avaliação:

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Jun S. O. Fonseca

Prof.<sup>a</sup> Leticia F. F. Miguel

Porto Alegre, 08 de Junho de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Meus principais agradecimentos deste trabalho vão para os atuais e ex membros e colaboradores do Núcleo Orientado a Tecnologias Aquaviárias (Notaq) da UFRGS. De modo especial agradeço ao professor Dr. Ignacio Iturrioz e ao engenheiro Msc. André Schaan Casagrande que coordenam e incentivam a criação de massa crítica e desenvolvimento de conhecimentos dentro deste grupo de pesquisa do qual fiz parte como bolsista e revisitei para a realizar este estudo.

Agradeço também aos meus pais, que sempre incentivaram e possibilitaram o meu desenvolvimento nos anos em que fui aluno de graduação que culminaram na elaboração deste trabalho.

GALLINA, A, **Verificação estrutural de componentes de um sistema de acoplamento mecânico de embarcações de navegação interior na operação de aproximação**, 2015. 18f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **RESUMO**

O Projeto ACOPLA (FINEP 01.110053-00), desenvolve, dentro do Gmap/Notaq, um sistema de acoplamento mecânico entre embarcações de navegação interior. A demanda por tal sistema foi verificada pelas empresas de navegação da região metropolitana de Porto Alegre, para ser utilizado na Bacia do Sudeste. No âmbito deste projeto o presente trabalho de conclusão de curso pretende realizar a verificação estrutural de componentes do sistema de acoplamento desenvolvido, na operação de aproximação. Este estudo é complementar aos já realizados no dimensionamento das partes. O problema em questão envolve o contato dos pinos localizados na proa do empurrador com a guia localizada na popa da barça. Através de conceitos básicos de estabilidade naval foram determinados os esforços presentes no contato e estes foram utilizados para construir um modelo de elementos finitos no programa LS-DYNA. A análise empregada é de natureza dinâmica e utiliza o método de elementos finitos com um esquema explícito de integração temporal. Os resultados encontrados mostraram tensões altas no contato entre as partes que resultaram em deformações plásticas locais. Concluiu-se que o modelo utilizado gera resultados confiáveis de forma qualitativa devido às várias considerações tomadas na sua construção.

**PALAVRAS-CHAVE:** acoplamento, contato, integração temporal explícita.

GALLINA, A **Structural verification of components of a mechanical coupling system between inland vessels during the coupling operation**, 2015. 18f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

#### **ABSTRACT**

The ACOPLA Project (FINEP 01.110053-00) develops, at Gmap/Notaq, a mechanical coupling system between inland vessels. The demand for such a system was verified by the navigation companies of Porto Alegre, to be used at the Brazilian South-eastern Drainage Basin. In the context of this project the present paper intend to verify the structural integrity of components of the developed coupling system during the coupling operation. This study is complementary to others already made to the dimensioning of the parts. The operation studied involves the contact between the pins located at the bow of the pusher and the guides located at the stern of the barge. Making use of basic ship stability notions the forces involved in the contact of the parts were calculated and used to build a finite elements model in the software LS-Dyna. The analysis is dynamic and makes use of the finite elements method with an explicit temporal integration scheme. The data produced showed high stress levels in the contact region between the parts that will result in local plastic strain. It was concluded the the model built can only calculate reliable results when considered in qualitative manners due to the many considerations taken upon its development.

**KEYWORDS:** coupling, contact, explicit time integration.

## INDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
3.1 Princípios de Estabilidade Naval .....	2
3.2 Integração Numérica no Tempo .....	3
4. METODOLOGIA .....	4
5. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	5
6. DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS .....	7
7. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS .....	8
7.1 Corpos Modelados .....	8
7.2 Condições de contorno .....	9
7.3 Propriedades dos materiais .....	10
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	11
8.1 Força para movimentar a proa .....	11
8.2 Tensões geradas no contato .....	11
9. CONCLUSÕES .....	14
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
ANEXO A .....	16
ANEXO B .....	16
ANEXO C .....	18
ANEXO D .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

A navegação interior é um modal de transporte já consolidado em diversas bacias hidrográficas do mundo. Sua relevância vem do potencial econômico e logístico que possui. Em muitas aplicações oferece uma solução mais vantajosa quando comparada à transportes terrestres. Dentro deste modal de transporte se destacam os sistemas combinados de embarcações, onde uma unidade propulsora (empurrador) pode acoplar-se e desacoplar-se de uma unidade de carga (barcaça) não propulsada. Os chamados comboios oferecem ainda mais vantagens econômicas e logísticas frente a embarcações autopropulsadas. A possibilidade de operar mais de uma unidade de carga através de apenas uma unidade propulsora é um fato que se torna muito vantajoso em situações onde o tempo de carga e descarga da embarcação é consideravelmente grande relativo ao tempo de viagem. A utilização de comboios faz com que se reduza o tempo de parada do empurrador enquanto a barcaça carrega ou descarrega.

A operação de comboios está presente na Bacia do Sudeste (Rio Grande do Sul) onde é feito o transporte de cargas sólidas como: serragem, carvão, areia e grãos e líquidas como produtos petroquímicos. A porção navegável da Bacia do Sudeste liga cidades do interior com a região metropolitana de Porto Alegre e também as cidades de Pelotas e Rio Grande, que possuem a maior movimentação de carga por meios navais, tendo a Lagoa dos Patos como principal zona de aproveitamento. Os comboios operam em moldes convencionais consolidados em outras regiões como no Rio Mississipi (Estados Unidos) e na Bacia do Tietê-Paraná, onde o acoplamento é feito através de amarras. Este modal já se mostrou insatisfatório na região sul do Brasil devido às diferentes condições de navegação encontradas aqui. As amarras não oferecem suficiente segurança para a navegação interior no Rio Grande do Sul, já foram verificados diversos acidentes onde os cabos e cordoalhas utilizados não suportaram as forças que tentam separar o comboio resultando no desacoplamento das embarcações. Devido a este fato as empresas de navegação atuantes na região já possuem em operação comboios com acoplamento mecânico, que oferecem mais segurança e controle para as embarcações. Porém, a tecnologia utilizada foi importada e não se adequa totalmente às condições de navegação da região. O sistema de acoplamento mecânico atualmente utilizado foi desenvolvido para suportar condições de navegação de mar aberto o que resulta em uma estrutura e componentes superdimensionados para operar na Bacia do Sudeste aumentando muito o custo das embarcações. Neste âmbito foi desenvolvido o Projeto ACOPLA (FINEP 01.110053-00), que objetiva desenvolver um sistema de acoplamento mecânico voltado para as condições de navegação da Bacia do Sudeste. O projeto é desenvolvido dentro do Notaq/Gmap e desde o seu início em 2010 já abrigou diversos trabalhos acadêmicos como: dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de curso e artigos científicos.

O desenvolvimento do sistema já se encontra avançado, tendo já sido consolidado o projeto conceitual, o dimensionamento da maior parte dos componentes e a construção de protótipos em escala real, para serem submetidos a testes. A determinação dos esforços utilizada para o dimensionamento das partes foi feita considerando as piores condições de navegação registradas na região quando as embarcações se encontram acopladas. Ainda há a necessidade de avaliar como o sistema se comporta durante a operação de aproximação e acoplamento, pois os esforços encontrados nesta operação são muito distintos dos encontrados durante a navegação. A realização deste trabalho de conclusão de curso se justifica na necessidade de realizar a verificação estrutural dos componentes frente às condições de carregamento encontradas na operação de aproximação e acoplamento do comboio.

Termos técnicos comumente utilizados na engenharia naval são utilizados neste trabalho. Um glossário que pode ser consultado, caso necessário, apresentando estes termos pode ser encontrado em: <http://www.sobena.org.br/gloss.asp>.

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo realizar a verificação estrutural de dois componentes de um sistema de acoplamento de embarcações de navegação interior. O sistema de acoplamento, que é o objeto de estudo deste trabalho, é o sistema desenvolvido no âmbito do projeto ACOPLA (FINEP 01.110053-00) e os componentes de interesse são: a guia, presente na embarcação não propulsada e o pino, presente na embarcação propulsada. Para verificar a integridade estrutural do sistema pretende-se:

- Determinar os esforços atuantes no contato entre as partes;
- Construir um modelo de elementos finitos representativo do sistema;
- Avaliar o nível de tensões na região de contato entre as partes.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentro do âmbito do Projeto ACOPLA foram desenvolvidos desde 2010 trabalhos acadêmicos que envolvem a análise de comboios e embarcações auto-propulsadas utilizadas na Baía do Sudeste e que serviram de base e motivação para o presente trabalho.

BORGES, (2010) apresentou uma metodologia de análise de embarcações acopladas, avaliando diversas formas de acoplamento. Foram utilizadas para o modelamento duas embarcações que operam na Baía do sudeste. Foi concluído que um sistema de acoplamento articulado reduz consideravelmente o nível de tensões nos componentes do sistema quando comparado a sistemas rígidos.

O trabalho, desenvolvido por VIEIRA, (2012) propôs uma metodologia para a determinação dos esforços em um acoplamento entre empurrador e barcaça. No trabalho foram avaliadas diversas forças causadas por: ventos, correntes, ondas e manobras. Que são aplicadas ao sistema de acoplamento em condições de navegação. A metodologia apresentada foi utilizada para avaliar os esforços máximos encontrados no acoplamento entre as embarcações Hélio Safir e Eco Energia I da Navegação Guarita. Estas mesmas embarcações são utilizadas no presente trabalho.

Outro trabalho, desenvolvido por NUNES, (2012), verificou o comportamento estrutural de reforços na estrutura de empurradores e barcaças que navegam acoplados. O estudo foi feito levando em consideração os esforços gerados entre as embarcações em uma situação de navegação. Foram realizadas simulações em elementos finitos para avaliar o nível de tensões nas estruturas das embarcações.

Além de análises estruturais e de esforços outros trabalhos foram elaborados dentro do Projeto ACOPLA. BASSO, (2012) analisou o potencial econômico da padronização de uma barcaça para navegação interior. Onde foi apresentada uma metodologia para identificar candidatos à padronização em uma embarcação. BAUMGAERTNER, (2010) apresentou a determinação de carregamentos permitidos de embarcações de navegação interior transportadoras de cargas sólidas através de um programa desenvolvido em LabVIEW.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Princípios de Estabilidade Naval

O estudo da estabilidade naval tem como objetivo garantir a flutuabilidade de forma estável de embarcações. De um modo geral uma embarcação é considerada como um corpo de geometria complexa parcialmente submerso e sua condição de equilíbrio é dada pelos somatórios de forças e momentos externos aplicados, apresentado por PINTO, (1999).

Segundo BIRAN, (2003) o Princípio de Arquimedes enuncia uma formulação particular da lei de equilíbrio de forças para corpos flutuantes e é a principal lei física que controla o seu comportamento estático. O Princípio de Arquimedes pode ser enunciado como: "A resultante da pressão hidrostática atuando sobre as paredes de um corpo submerso é uma força vertical

ascendente, e tem módulo igual ao do peso do volume de líquido deslocado”. A força resultante enunciada no Princípio de Arquimedes é o empuxo, matematicamente descrito na Equação 2.1

$$E = \nabla * \gamma, \quad (2.1)$$

onde E é o empuxo,  $\nabla$  é o volume de líquido deslocado, em termos navais chamado de deslocamento e  $\gamma$  é o peso específico do líquido deslocado. O empuxo é aplicado ao centro de carena ou centro geométrico do volume submerso e tem sua linha de ação vertical perpendicular á linha d’água. A segunda força que controla o comportamento estático de uma embarcação é o seu peso (P), aplicado em seu centro de gravidade. Em uma condição de equilíbrio onde não existem outras forças externas aplicadas o peso de uma embarcação deve ser igual ao empuxo (E) gerado. As duas forças tem uma mesma linha de ação e sentidos opostos verificando o equilíbrio.

Quando uma terceira força (C) na direção vertical é aplicada, a condição de equilíbrio da embarcação é modificada. Para atingir um novo equilíbrio a embarcação sofrerá uma inclinação (ângulo de trim), fazendo com que uma porção diferente do casco fique submerso modificando a magnitude do vetor empuxo bem como sua linha de ação. O vetor peso continua com mesma magnitude e sentido, sendo aplicado no centro de gravidade da embarcação. Desta forma uma nova condição de equilíbrio é encontrada, na qual, peso e empuxo tem magnitudes diferentes e não são aplicados na mesma linha de ação. As duas condições de equilíbrio, sem e com a ação de uma terceira força externa são representadas na Figura 2.1

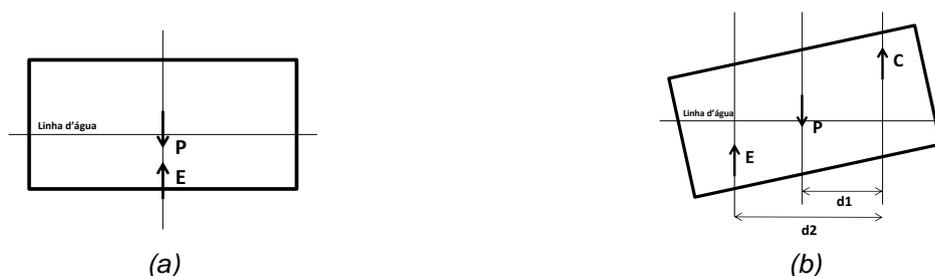


Figura 2.1 - Duas condições de equilíbrio de um sólido submerso.

As Equações 2.2 e 2.3 representam o equilíbrio estático de uma embarcação como mostrado na Figura 2.1(b). Esta condição será objeto de estudo deste trabalho. A Equação 2.2 mostra o somatório de forças na vertical e a Equação 2.3 mostra o somatório de momentos entorno do ponto de aplicação da força C.

$$\sum F \text{ vertical} = E + C - P = 0 \quad (2.2)$$

$$\sum M = P * d1 - E * d2 = 0 \quad (2.3)$$

### 3.2 Integração Numérica no Tempo

Neste trabalho de conclusão se fez uso do programa LS-DYNA. Como descrito por HALLQUIST, (1998), este programa emprega o método de elementos finitos para realizar a discretização espacial resultando numa equação de movimento e um esquema explícito de integração no tempo para resolver esta última. Informações complementares sobre o programa são encontradas em: <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>.

Existem dois tipos básicos de procedimentos de integração no domínio do tempo: implícito e explícito. No método explícito após a escolha de um intervalo de tempo  $\Delta t$  o estado do sistema no instante  $(t + \Delta t)$  pode ser expresso em termos do estado nos instantes  $t$ ,  $(t - \Delta t)$ ,  $(t - 2 \Delta t)$ , etc, em forma explícita (sem a necessidade de resolver nenhum sistema de equações). Para se determinar os diferentes estados em um sistema dinâmico é utilizado o método das diferenças finitas, que possibilita resolver as equações diferenciais baseado na

aproximação de derivadas por diferenças, conforme pode ser encontrado na literatura, publicada por BATHE, (1978).

Considerando um deslocamento arbitrário  $q(t)$ , que é uma função contínua e diferenciável no tempo, é possível escrever  $q(t)$  como função dos estados em determinados valores de tempo, ou seja:

$$q(t) = f[ q(t + \Delta t), \dots, q(t - n\Delta t)], \quad (2.4)$$

em particular no entorno do instante  $t$  a função  $q(t)$  é aproximada por uma parábola de segunda ordem.

$$q(\Delta t) \cong q(t) + aq(\Delta t) + b(q(\Delta t))^2, \quad (2.5)$$

utilizando os valores das derivadas de  $q$  a respeito do tempo nos instantes  $(t + \Delta t)$  e  $(t - \Delta t)$  pode-se determinar os coeficientes  $a$  e  $b$  da Equação 2.5. Estes coeficientes constituem expressões em diferenças finitas centrais de primeira ordem para a primeira e segunda derivadas de  $q(t)$  no instante  $t$ , como mostrado nas Equações 2.6 e 2.7.

$$a = \dot{q}(t) = \frac{q(t + \Delta t) - q(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (2.6)$$

$$2b = \ddot{q}(t) = \frac{q(t + \Delta t) - 2q(t) + q(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (2.7)$$

As Equações 2.6 e 2.7 podem ser utilizadas de forma análoga para calcular as derivadas de vetores e matrizes, utilizados na formulação dos modelos de elementos finitos.

## 4. METODOLOGIA

O problema central de estudo deste trabalho de conclusão foi abordado em duas partes. A primeira é a determinação dos esforços presentes nos componentes estudados e a segunda é a construção de um modelo de elementos finitos que avalia o comportamento dos componentes.

Na determinação de esforços foram utilizados os conceitos de estabilidade naval apresentados na seção 2.1. Um modelo representativo da geometria do casco do empurrador foi gerado no programa de CAD *Solidworks 2010*. Este modelo foi construído a partir do plano de linhas da embarcação e serviu de base para o levantamento do empuxo gerado pela embarcação em determinadas condições de equilíbrio, como será detalhado no Capítulo 5. Realizando cortes em planos paralelos ao plano contendo a linha d'água foi possível determinar o volume submerso da embarcação bem como o seu centro de carena. Este volume é o deslocamento apresentado na Equação 2.1 e foi utilizado para avaliar o empuxo gerado.

O modelo de elementos finitos foi construído no programa LS-DYNA, a partir de um modelo de CAD gerado no *Solidworks*. O modelamento é abordado em detalhe no Capítulo 6. A análise empregada é de natureza dinâmica e utiliza o método de elementos finitos com um esquema explícito de integração temporal, descrito na seção 2.2. A malha utilizada foi construída com elementos tetraédricos sólidos de 4 nós com 3 graus de liberdade em cada nó. A formulação do elemento sólido utilizada é a de um elemento com valor constante de tensão. Também foram utilizados elementos de viga de 3 nós, sendo um terceiro o nó de referência. Foi utilizada a formulação de Belytschko para os elementos de viga. Mais detalhes sobre a formulação dos elementos utilizados podem ser encontrados na literatura publicada por HALLQUIST, (1998).

## 5. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As embarcações analisadas neste trabalho são uma barcaça destinada ao transporte de derivados de petróleo e um empurrador utilizado como unidade propulsora do comboio. As características gerais das embarcações são apresentadas no Anexo A. No Anexo B são apresentadas fotos das embarcações.

O sistema de acoplamento consolidado no Projeto ACOPLA é do tipo ATB. Este tipo de acoplamento é articulado e permite um grau de liberdade de rotação (*pitch*) entre empurrador e barcaça. A transmissão de esforços entre as embarcações é feita através de dois pinos localizados em ambos os bordos do empurrador. A barcaça tem em sua popa um recesso construído propositalmente para receber a proa do empurrador e permitir a transmissão de esforços. A Figura 4.1 mostra uma vista superior esquemática das embarcações acopladas. O grau de liberdade permitido pelo sistema é a rotação entorno do eixo dos pinos, representado pelo eixo A-A.

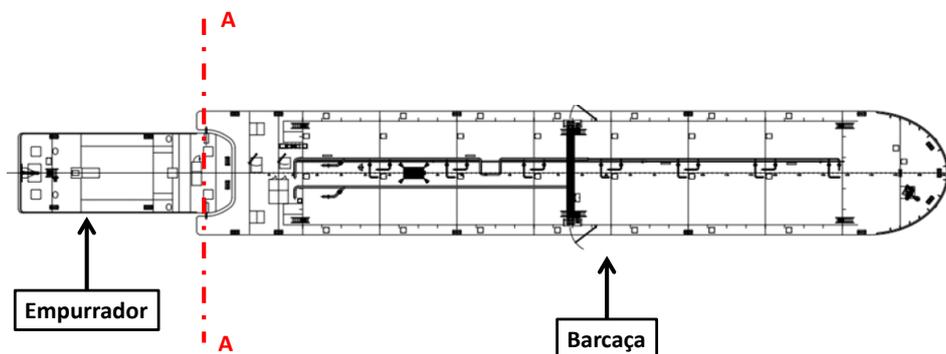


Figura 4.1 – Embarcações acopladas

No recesso da popa da barcaça é fixada à sua estrutura as guias, que atuam como alojamentos dos pinos. Os pinos são mantidos dentro do casco do empurrador e são extraídos, pela ação de atuadores hidráulicos comandados do passadiço. Como apresentado na Tabela do Anexo A, **Error! Reference source not found.** a barcaça pode apresentar uma variação de calado, ou seja, de altura relativa à linha d'água de 3,55m dependendo da sua condição de carga. Devido a este fato a guia deve possuir mais de um alojamento para o pino, distribuídos verticalmente para garantir que o acoplamento possa ser realizado em qualquer calado relativo entre empurrador e barcaça. A Figura 4.2 mostra uma guia completa e sua distribuição vertical de alojamentos para o pino. Pode-se verificar que os alojamentos ou furos são interseccionados e que nas intersecções estão presentes rampas.

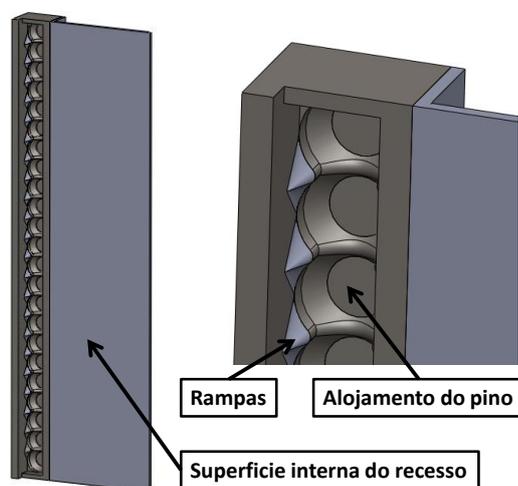


Figura 4.2 – Guia completa

A operação de aproximação e acoplamento das embarcações, que é o objeto de estudo deste trabalho é feita em 3 etapas. Antecedendo a primeira etapa as embarcações se encontram desacopladas, os pinos estão totalmente retraídos (internos ao casco do empurrador) e o empurrador inicia a aproximação. Quando a proa do empurrador já se encontra parcialmente dentro do recesso da popa da barça o empurrador cessa sua movimentação e os pinos são parcialmente extraídos até que encontrem o costado interno do recesso da barça, alinhando as embarcações e finalizando a primeira etapa. A segunda operação consiste no avanço do empurrador, com os pinos parcialmente extraídos deslizando pelo costado do recesso, até chegar na posição de avanço final em contato com a parede da guia. A terceira e última operação consiste em extrair os pinos totalmente até que estes encontrem sua posição final dentro de um dos furos da guia, consolidando o acoplamento. A Figura 4.3 ilustra a sequência de operações sendo as etapas 1, 2 e 3 representadas respectivamente em (a), (b) e (c). As setas indicam a direção do movimento do pino em cada uma das etapas.

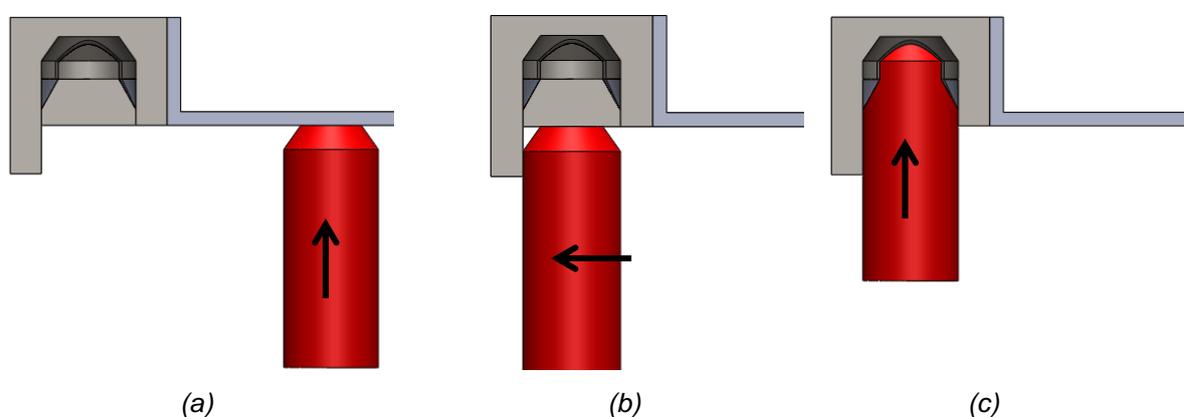


Figura 4.3 – Sequência de acoplamento

Nas etapas 1 e 2 apenas há a movimentação horizontal do empurrador, realizada através da sua propulsão, fazendo com que se aproxime da barça, nestas duas operações os esforços aplicados nos pinos são muito baixos e por isso não serão analisados. Na etapa 3 pode ser necessária a movimentação vertical da proa do empurrador caso o pino não se encontre concêntrico com um dos furos. Esta situação é mostrada na Figura 4.4.

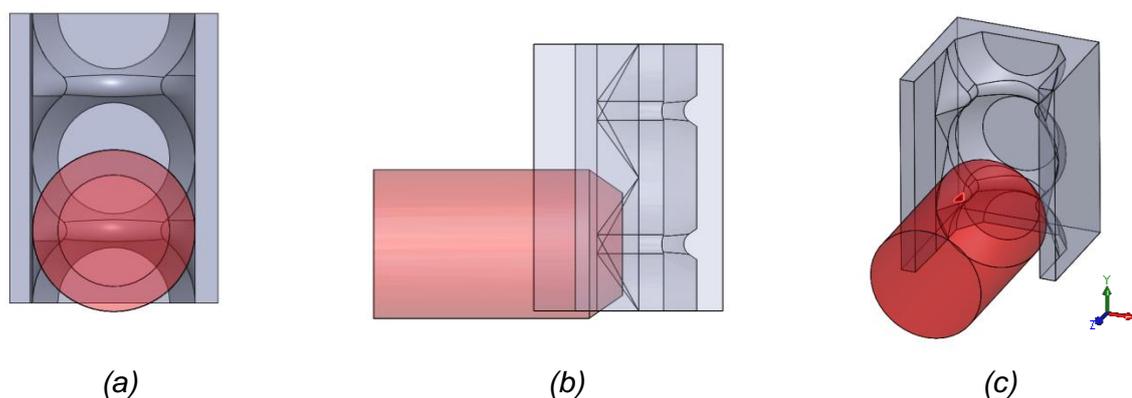


Figura 4.4 - Posição de Desalinhamento

Em uma situação de desalinhamento o pino continua sendo extraído. Porém, ele entra em contato com a guia prematuramente e desliza em rampas que o direcionam para sua posição final. Na figura 4.4(c) é ressaltado a região de contato inicial entre o pino e a guia. Para que este direcionamento seja alcançado, a proa do empurrador deve mover-se verticalmente –

sendo puxada para cima ou empurrada para baixo dependendo da posição relativa entre o pino e as rampas – pela ação do contato entre a superfície do pino e as rampas da guia. Quando o pino é extraído e entra em contato com as rampas, diferentemente do esperado nas etapas 1 e 2, podem ser verificados esforços elevados proveniente do contato entre as partes. Assim a etapa 3 da operação de aproximação e acoplamento das embarcações é considerada o problema central a ser estudado. A Figura 4.5 mostra a posição final do pino, após deslizar pelas rampas deslocando a proa do empurrador.

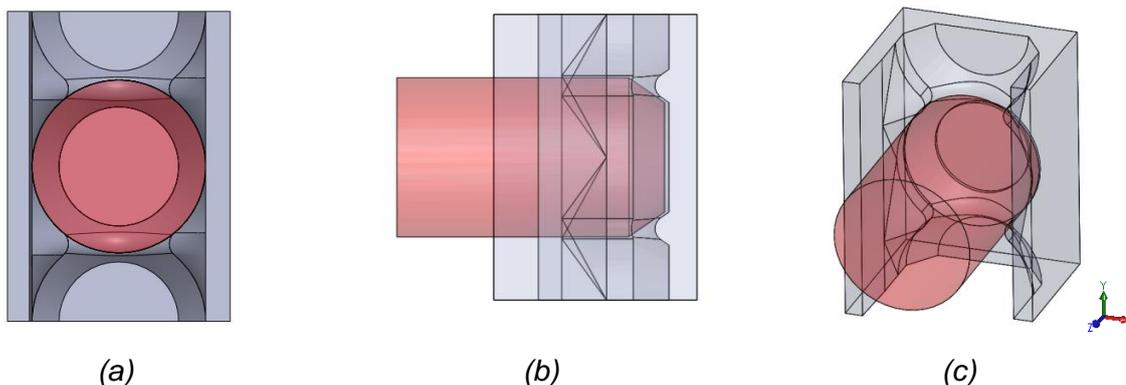


Figura 4.5- Posição Final

## 6. DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS

Tomando o pino como objeto de estudo na situação problema descrita no Capítulo 4 são notados dois esforços atuantes no mesmo.

Primeiramente é verificada a ação do atuador hidráulico, na forma de uma força que provoca o movimento de extração do pino. No Anexo C é apresentado o desenho técnico que mostra a construção de um dos conjuntos hidráulicos que compõe o sistema de pinos. A força máxima aplicada em cada um dos pinos é de 464,15KN e a velocidade de extração é de 21mm/s dado que a pressão máxima de trabalho da bomba do conjunto hidráulico é de 21MPa com vazão de 28L/min e a área do êmbolo é de 22102,75mm<sup>2</sup>.

O segundo esforço notado é proveniente do contato entre o pino e as rampas da guia. Tomando-se a condição mais crítica onde o desalinhamento máximo entre pino e furo é de 80mm, há a necessidade de avaliar qual a força necessária para deslocar a proa do empurrador, já que esta força estará atuante no contato entre as partes estudadas.

Para determinar a força necessária para deslocar a proa do empurrador foi feito o uso de princípios básicos de estabilidade naval. Como apresentado no Capítulo 2, existem duas forças atuantes em uma embarcação flutuante em uma situação de repouso: o peso da embarcação e o empuxo proveniente do volume de fluido deslocado. Na situação estudada existe também uma terceira força que é a reação proveniente do contato entre o pino e a guia. Considera-se que a estabilidade da barcaça não é alterada durante o acoplamento pois sua massa é muito superior a do empurrador, assim todo o deslocamento necessário para levar os pinos até seus alojamentos deve ser realizado pela proa do empurrador.

Fazendo uso de um modelo tridimensional representativo da geometria do casco do empurrador, no software *Solidworks 2010*, foi possível determinar a magnitude do empuxo gerado pelo fluido em diferentes posições da linha d'água calculando o volume da porção submersa do casco. Estas diferentes posições da linha d'água são possíveis condições de equilíbrio da embarcação e devem obedecer as equações 2.2 e 2.3. A Figura 5.1(a) mostra o modelo tridimensional utilizado. A Figura 5.1(b) mostra a linha d'água em sua posição de equilíbrio original.

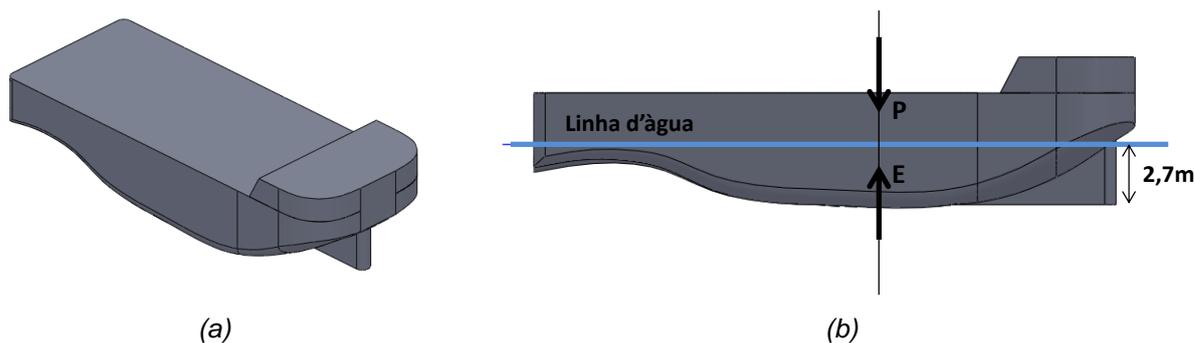


Figura 5.1 Modelo tridimensional do casco do empurrador

Primeiramente foi analisado o caso onde toda a embarcação é deslocada 80mm para cima na vertical sem inclinação. Nesta condição o valor de empuxo e braço de alavanca encontrados não verificam o somatório de momentos entorno do ponto de aplicação da força C (Equação 2.3). Prosseguiu-se avaliando novas situações variando o ângulo de inclinação da embarcação, com o intuito de encontrar o ângulo que gera um empuxo e braço de alavanca que junto com o peso verificam a Equação 2.3. A embarcação foi rotacionada entorno do eixo dos pinos, representando a situação real. A Figura 5.2(a) mostra a primeira situação avaliada e a Figura 5.2(b) mostra a situação com inclinação que resulta em equilíbrio.

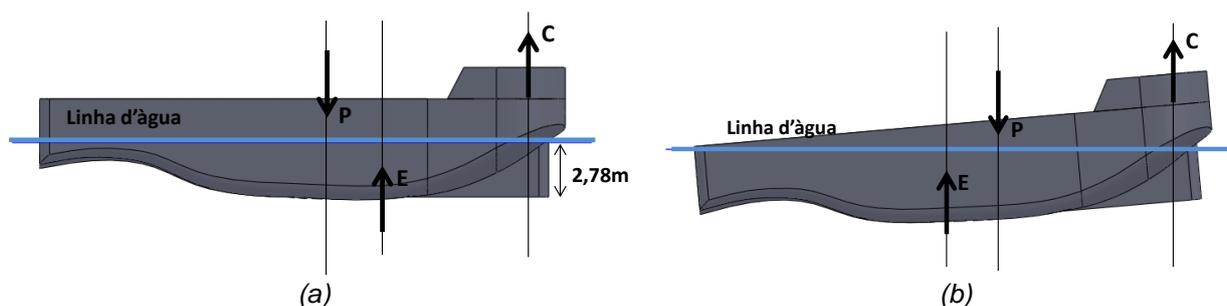


Figura 5.2 Procedimento para encontrar o ângulo de equilíbrio

Uma vez que para um dado ângulo o valor de empuxo encontrado verifica a Equação 2.3 pode-se afirmar que esta é uma configuração de equilíbrio da embarcação e a força C aplicada no pino pode ser calculada através da Equação 2.2. O procedimento descrito foi repetido, também, para avaliar a força necessária para deslocar a proa do empurrador verticalmente para baixo.

## 7. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

### 7.1 Corpos Modelados

Um dos objetivos deste trabalho é o de determinar as tensões geradas no contato entre a superfície do pino com as rampas da guia. Para facilitar a modelagem e também reduzir o tempo de cálculo optou-se por modelar com elementos sólidos apenas uma região suficientemente próxima do contato. É possível perceber uma simetria em um plano longitudinal que contempla todo o conjunto das embarcações na operação de aproximação, esta simetria é verificada tanto na geometria como nos carregamentos, então optou-se por modelar apenas um conjunto com um pino e uma guia. Na geometria do conjunto pino e guia é verificado outro plano de simetria, possibilitando assim modelar apenas metade do volume dos componentes. A Figura 6.1 mostra o plano de simetria utilizado e a porção dos volumes que foi modelada.

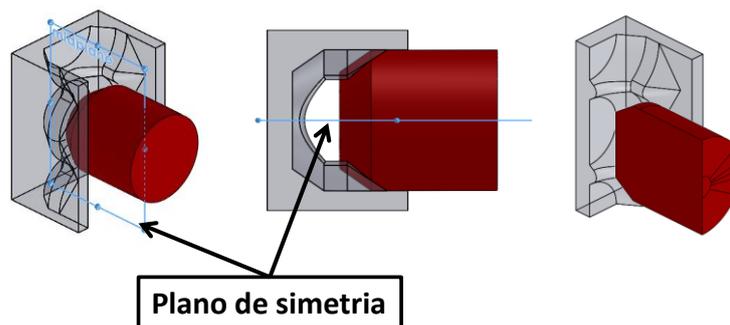


Figura 6.1 – Plano de simetria e geometria modelada

A Figura 6.2 mostra a malha tetraédrica e o refino utilizado em cada um dos componentes na região de contato.

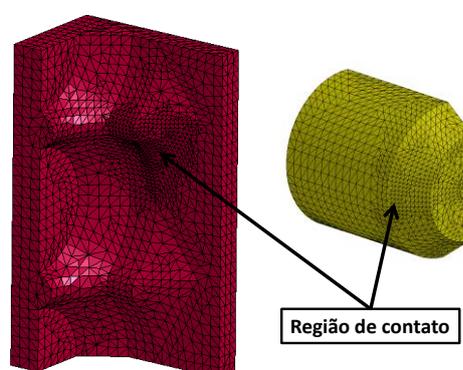


Figura 6.2 – Malha utilizada

## 7.2 Condições de contorno

Para simular a ação do atuador hidráulico extraíndo o pino e o fazendo entrar em contato com a guia foi aplicado um deslocamento prescrito aos nós da sua face posterior, oposta a face chanfrada. Este deslocamento prescrito faz com que o pino se mova com uma velocidade constante de 21mm/s. Em uma situação real o pino se movimenta na horizontal, pela ação do atuador hidráulico e na vertical quando entra em contato com as rampas da guia. Porém, para facilitar a vinculação do modelo foram restritos os deslocamentos em z e x, de acordo com o sistema de coordenadas mostrado na Figura 6.3, dos nós da face posterior do pino. Dessa forma o pino se move apenas na horizontal na direção de y negativo. A guia teve os deslocamentos dos nós de sua face posterior e lateral restringidos nas direções x e y. Isso faz com que possa se movimentar apenas na direção z. A todos os nós do modelo pertencentes ao plano de simetria foram adicionadas restrições aos deslocamentos em x.

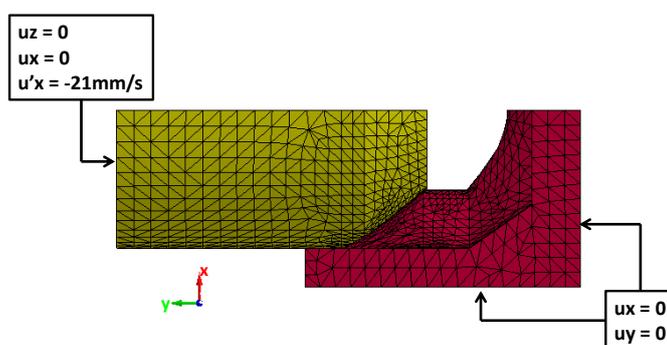


Figura 6.3 – Condições de contorno

A força  $C$ , calculada no Capítulo 5, que é a força necessária para deslocar a proa do empurrador verticalmente foi introduzida ao modelo através de 3 elementos de viga funcionando como molas ligados a 3 nós da guia. Estes elementos de viga têm os deslocamentos de seus nós mais distantes da guia restritos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Conforme a guia se move verticalmente (direção  $z$ ) as vigas são deformadas axialmente fazendo com que apareça uma força interna transmitida pelo nó de ligação dos elementos de viga com os elementos sólidos da guia. A rigidez das vigas foi ajustada para que com um deslocamento de 80mm (máximo deslocamento vertical da proa do empurrador) seja transmitida uma força resultante (somatório das forças dos 3 elementos de viga) com magnitude igual a  $C/4$ . Sendo  $C$  a força calculada no Capítulo 5, o fator 4 é coerente com a utilização dos dois planos de simetria citados na seção 6.1.

Para a construção do modelo de elementos finitos foi considerada uma situação de desalinhamento do pino de 40mm.

A Figura 6.4 mostra o modelo completo para o caso 2. Os números 1,2 e 3 indicam os elementos de viga. O modelo utilizado no caso 1 tem construção semelhante, diferindo apenas na posição do pino relativo à guia.

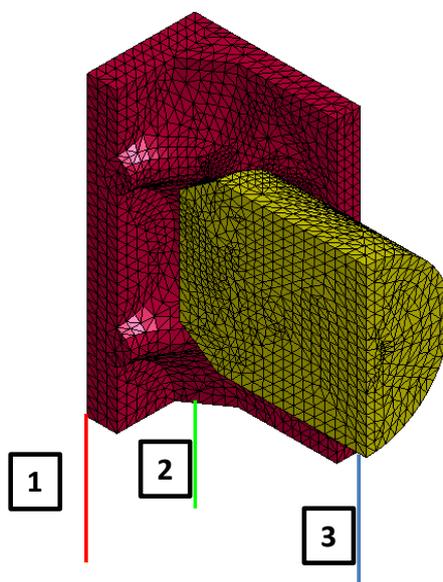


Figura 6.4 – Modelo completo com os elementos de viga

### 7.3 Propriedades dos materiais

Tanto para o pino quanto para a guia foram utilizados modelos de materiais lineares elásticos. As propriedades consideradas foram a de um aço padrão de construção mecânica. O módulo de elasticidade utilizado foi de 210GPa e o coeficiente de Poisson 0,3. O material do pino tem densidade de 7850kg/m<sup>3</sup>.

A densidade da guia foi ajustada para que o volume modelado represente o peso de um quarto do empurrador. Como a guia é o corpo modelado que se desloca na vertical a sua densidade ajustada faz com que o modelo represente a real inércia do empurrador sendo movimentado.

Ao material das vigas foi adicionado um coeficiente de amortecimento interno. Este coeficiente foi ajustado para garantir que o sistema seja subamortecido. O real amortecimento do sistema não pode ser determinado por ser esta tarefa de grande complexidade. O amortecimento real depende tanto da estrutura das embarcações como da interação com o fluido no qual estas flutuam. Através de testes o coeficiente utilizado foi ajustado até que o sistema não apresentasse vibrações pronunciadas no momento em que se inicia o contato.

Não foi considerado o atrito entre as partes modeladas.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 8.1 Força para movimentar a proa

O método apresentado no Capítulo 5 resultou em dois valores de força para deslocar a proa do empurrador 80mm na vertical, apresentados na Tabela 7.1

Tabela 7.1

Direção do deslocamento	Magnitude da Força
Para cima	51,70 kN
Para baixo	52,98 kN

A força para empurrar a proa para baixo tem maior magnitude e por isso foi utilizada para determinar as propriedades das molas representadas por vigas do modelo de elementos finitos.

### 8.2 Tensões geradas no contato

A Figura 7.1 mostra o campo de tensões de Von Mises encontrado na guia nos instantes de tempo iniciais do contato com o pino.

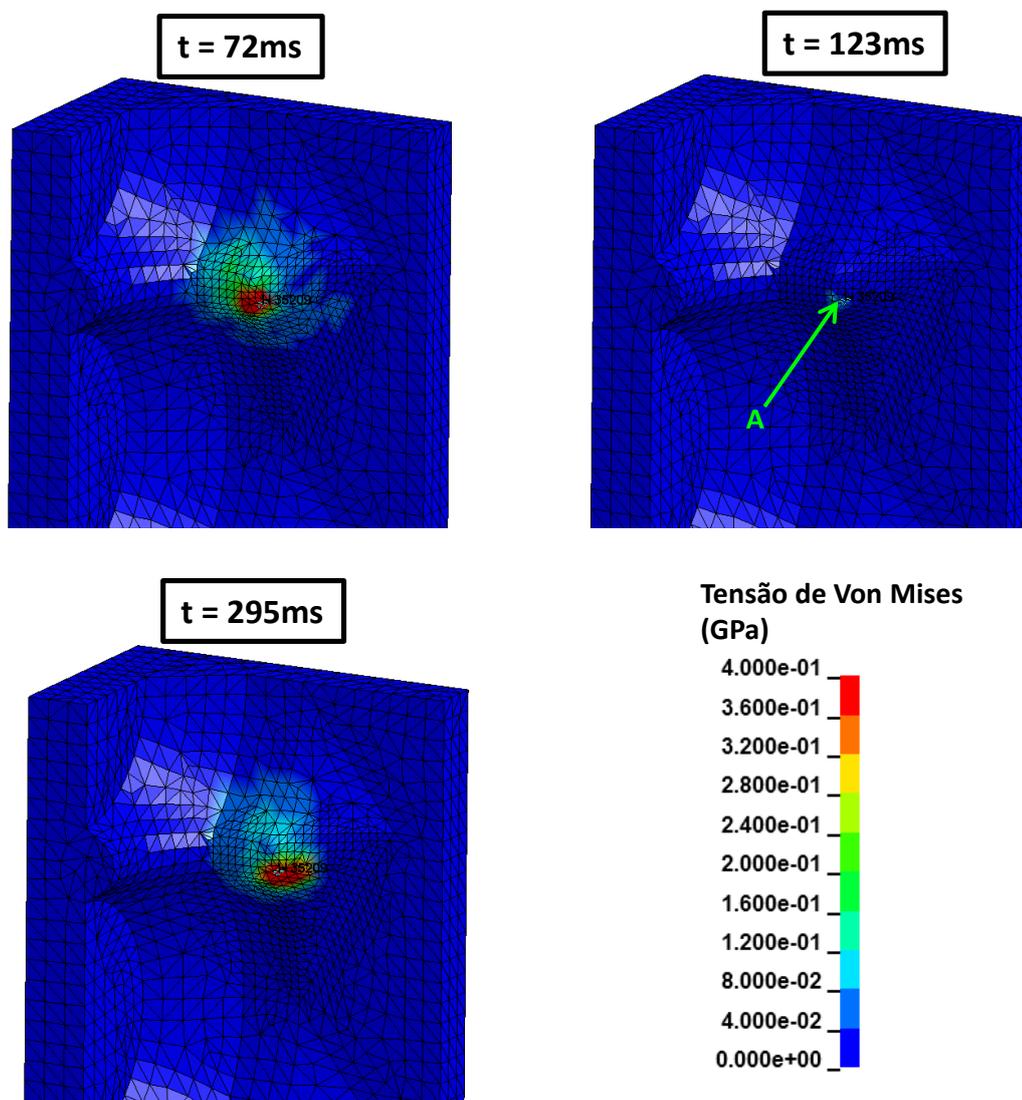


Figura 7.1 – Tensões na guia

A legenda da Figura 7.1 está em GPa. Pode-se verificar nos instantes de tempo 72ms e 295ms valores de tensão superiores a 400Mpa em diversos elementos. Porém, em um instante de tempo intermediário essas tensões não são verificadas.

A Figura 7.2 mostra os valores de tensão de Von Mises encontrados em um dos elementos próximos à região de contato inicial, indicado na Figura 7.1 pela seta e letra “A”. Os pontos assinalados correspondem aos instantes de tempo mostrados na Figura 7.1. O eixo das ordenadas mostra as tensões de Von Mises em GPa e o eixo das abscissas mostra o tempo em ms (milissegundo).

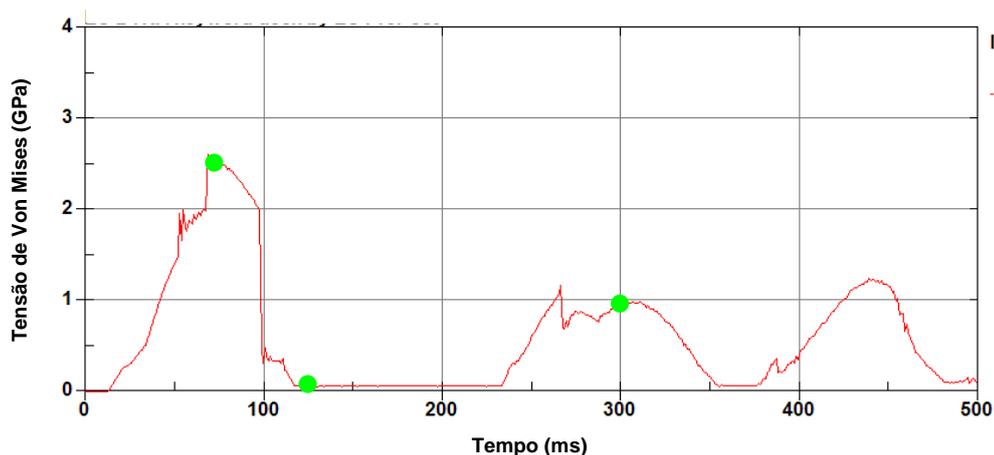


Figura 7.2 – Tensões na guia x tempo –elemento indicado por “A”

Pode-se perceber que as tensões flutuam nos momentos iniciais. Os valores máximos encontrados são de ordem de grandeza superior os valores admissíveis para escoamento de materiais de construção mecânica convencional. Pode-se interpretar que estes picos de tensão são verificados quando há impacto entre o pino e a guia. O valor alto das tensões pode ser atribuído a pequena área de contato entre as partes. Além disso, os vales encontrados na Figura 7.2, com valores de tensão próximos à zero, representam instantes de tempo onde não há contato entre as partes.

Como esperado um comportamento semelhante é encontrado no pino. A Figura 7.3 mostra as tensões encontradas no pino na região de contato instante de tempo  $t=450\text{ms}$ . A Figura 7.4 mostra o histórico de tensões no elemento indicado pela seta e letra “B” na Figura 7.3 sendo indicado em verde o instante  $t=450\text{ms}$ .

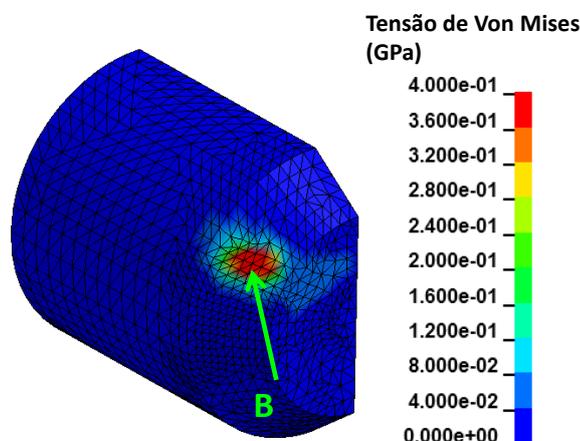


Figura 7.3 – Tensões no pino no instante  $t=450\text{ms}$ ”

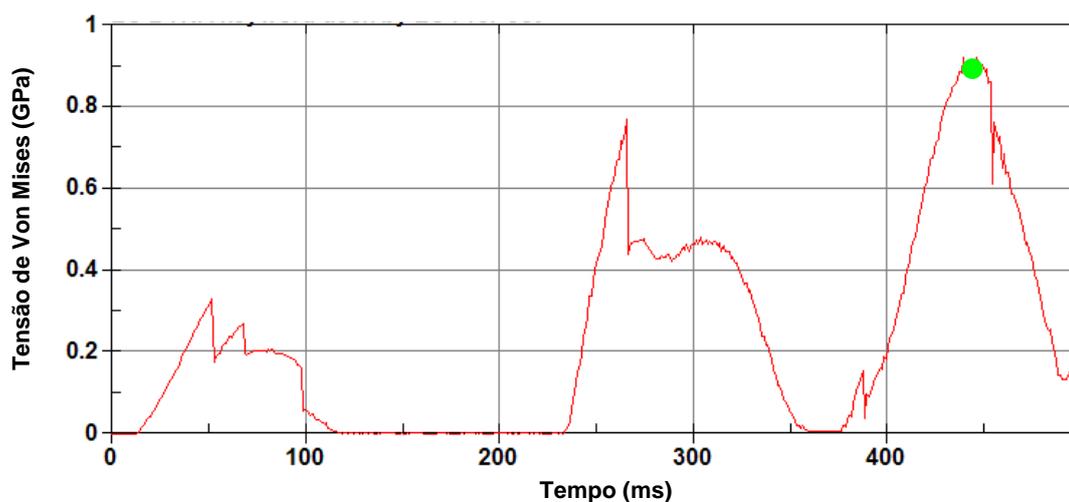


Figura 7.4 – Tensões no pino – elemento indicado por “B”

Estes impactos são verificados durante todo o espaço de tempo em que o modelo foi calculado. A Figura 7.5 mostra as tensões de Von Mises encontradas na guia e no pino instante de tempo  $t=1880\text{ms}$ .

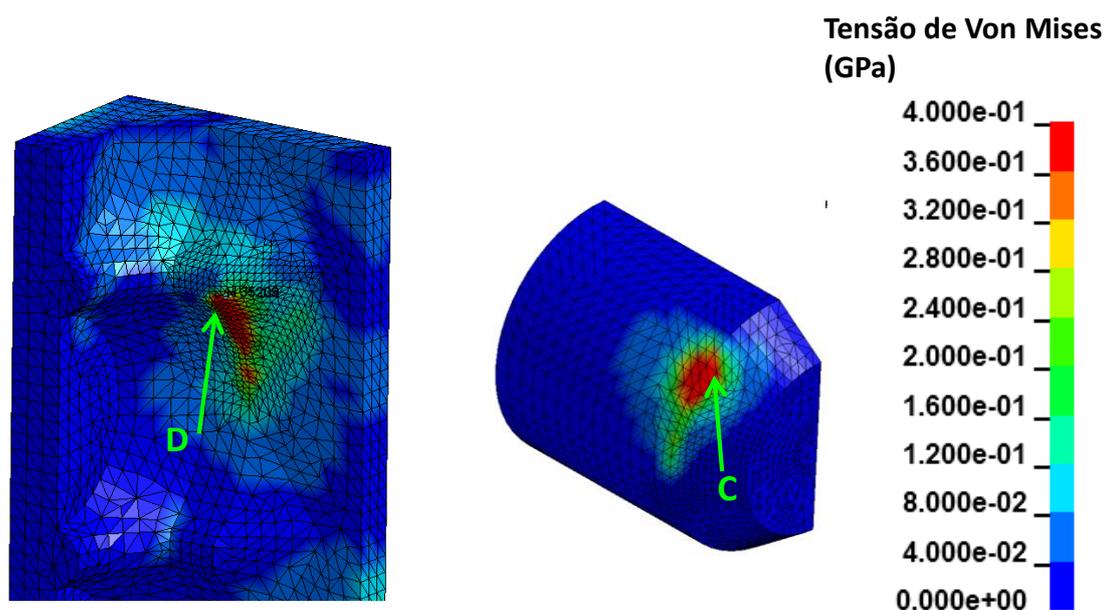


Figura 7.5 – Tensões de Von Mises no instante  $t=1880\text{ms}$

Neste instante de tempo são encontradas as mais altas tensões de Von Mises. A área de contato entre o pino e a guia já é maior, porém ainda se verificam tensões altas em grandes regiões dos dois componentes. Este aumento no nível de tensões pode ser causado por dois acontecimentos. O primeiro é o aumento esperado na força transmitida pelos elementos de viga para a guia aumentando a pressão de contato. O segundo é o encontro de duas arestas dos componentes. A aresta que determina o fim do chanfro do pino encontra a aresta que marca a transição da rampa para o alojamento final do furo.

As Figuras 7.6 e 7.7 mostram respectivamente o histórico de tensões dos elementos indicados por “C” e “D” na Figura 7.5, sendo indicados em verde os instantes  $t=1880\text{ms}$ .

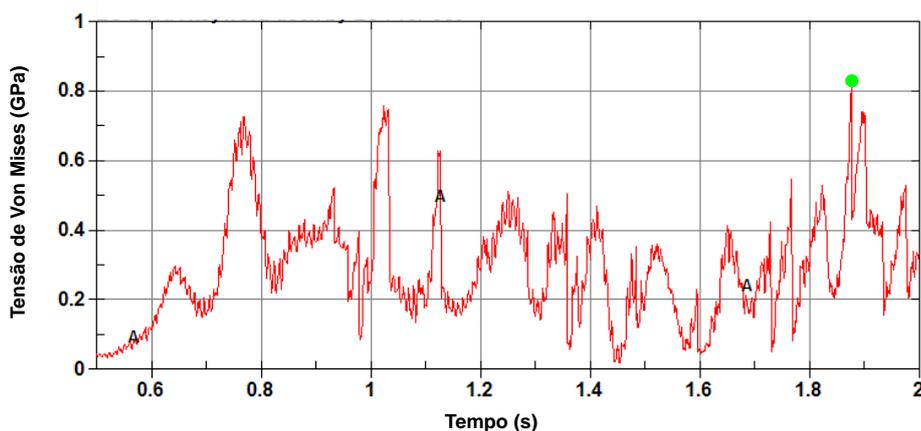


Figura 7.6 – Tensões no pino - elemento indicado por “C”

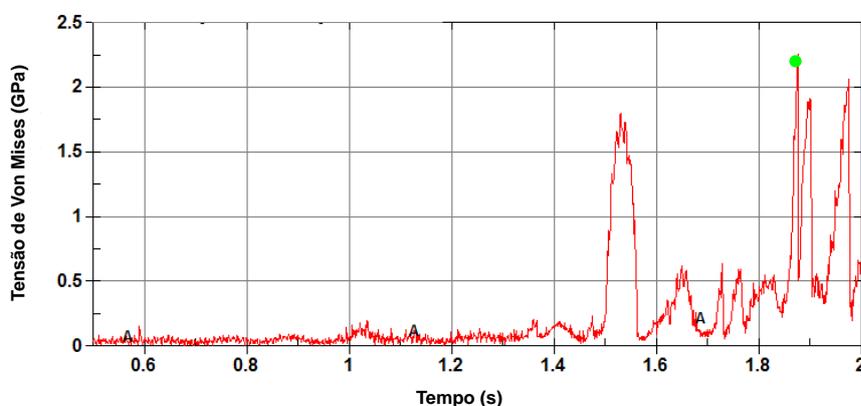


Figura 7.7– Tensões na guia - elemento indicado por “D”

Através da análise dos resultados obtidos podem ser feitas algumas observações sobre o comportamento do modelo. O nível de tensões encontrado no contato entre os componentes foi mais alto do que o esperado. Estas tensões se verificadas no componente real resultariam em plastificações locais. O modelo utilizado não contempla este tipo de comportamento então evitou-se discutir em termos quantitativos as tensões obtidas. Por outro lado os resultados mostram de forma qualitativa as regiões e instantes de tempo em que a operação de aproximação e acoplamento é mais crítica.

Podem ser feitas algumas considerações adicionais sobre o modelo. A forma com que as partes foram vinculadas simulam uma situação mais severa de contato entre as mesmas. Em uma situação real o pino pode não se mover perfeitamente em uma direção perpendicular à guia tornando o contato menos severo. Além disso, não foi considerado no modelo a rigidez da estrutura da popa da barça e proa do empurrador, as vinculações utilizadas simulam estruturas com rigidez infinita o que não é verificado na realidade. Por último, deve-se salientar que as arestas vivas representadas pela malha do modelo tentam reproduzir a geometria real (que possui raios de concordância) dentro dos limites do tamanho de elemento utilizado. A utilização de raios de concordância diminuiria a magnitude das tensões encontradas e traria resultados quantitativos mais confiáveis.

## 9. CONCLUSÕES

Neste trabalho de conclusão foi apresentada a metodologia utilizada para realizar a verificação estrutural de dois componentes, o pino e a guia, de um acoplamento entre embarcações de navegação interior. Foi analisada a operação de aproximação e acoplamento das embarcações. Assim, delimitado um problema central a ser estudado.

O problema descrito foi a terceira etapa da operação de aproximação e acoplamento das embarcações, onde o pino não está concêntrico a um dos alojamentos localizados na guia. Nesta etapa o pino continua sendo extraído até entrar em contato com as rampas da guia e deslizar até sua posição final. Foram determinados os esforços presentes nesta operação fazendo o uso de conceitos básicos de estabilidade naval, onde foi concluído que era necessário realizar um maior esforço para fazer o pino descer até sua posição final, fazendo com que toda a proa do empurrador seja deslocada verticalmente para baixo.

Através destas definições foi construído um modelo de elementos finitos a ser simulado. A análise empregada foi de natureza dinâmica que utiliza um esquema explícito de integração temporal. Através do modelo foi analisada uma condição de acoplamento onde o pino se encontra com um desalinhamento de 40mm com seu alojamento. Os resultados da simulação se mostraram relevantes para uma análise qualitativa do comportamento do sistema. Foram encontradas tensões mais altas do esperado na região do contato entre as partes e devido a isso foram levantadas hipóteses de quais as considerações empregadas na construção do modelo que levaram a estes resultados.

Assim dois dos objetivos específicos do trabalho, a determinação dos esforços e a construção de um modelo de elementos finitos, foram totalmente alcançados. O terceiro objetivo específico: avaliar o nível de tensões na região de contato entre as partes, foi parcialmente alcançado já que os resultados encontrados foram considerados confiáveis apenas de forma qualitativa. Estes resultados poderão servir de base caso novos estudos sejam realizados dentro do âmbito do Projeto ACOPLA.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Basso, E.D.; **“Análise do potencial econômico da padronização de uma barçaça para navegação interior”**, 2012

Bathe, K J. and Wilson, E.L. **“Numerical Methods in Finite Element Analysis”**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1976.

Baumgaertner, A.J.: **“Determinação de carregamentos permitidos de embarcação de navegação interior transportadoras de carga sólida através de programa desenvolvido em LabVIEW”**, 2010

Biran, A.B. **“Ship Hydrostatics and Stability”**, Elsevier Ltd, 2003

Hallquist, J. O.; **“LS-DYNA Theoretical Manual”**, Livermore Software Technology Corporation, 1998

Nunes, F.F.; **“Análise da estrutura de reforço em barçaças e empurradores a fim de implementar um acoplamento entre os mesmos”**, 2012

Pinto, M.O. **“Hidrostática e Estabilidade do Navio e de Sistemas Oceânicos” Volume 1**, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, 1999

Vieira, E.B.F.; **“Metodologia para determinação de esforços em um acoplamento entre empurrador e barçaça”**, 2012

<http://www.sobena.org.br/gloss.asp>

## ANEXO A

Características gerais das embarcações analisadas

	Barça	Empurrador
Comprimento total	94,1m	26,6m
Comprimento entre perpendiculares	93,9m	23,3m
Boca moldada	15,5m	10,0m
Pontal moldado	6,7m	5,0m
Calado de projeto	4,5m	2,7m
Calado leve	0,95m	-
Volume total dos tanques de carga	5160 m <sup>3</sup>	-
Deslocamento leve	1071t	-
Deslocamento carregado	5400t	-
Deslocamento total	-	430t
Tração estática	-	20t
Velocidade de operação	8 nós	8 nós

## ANEXO B

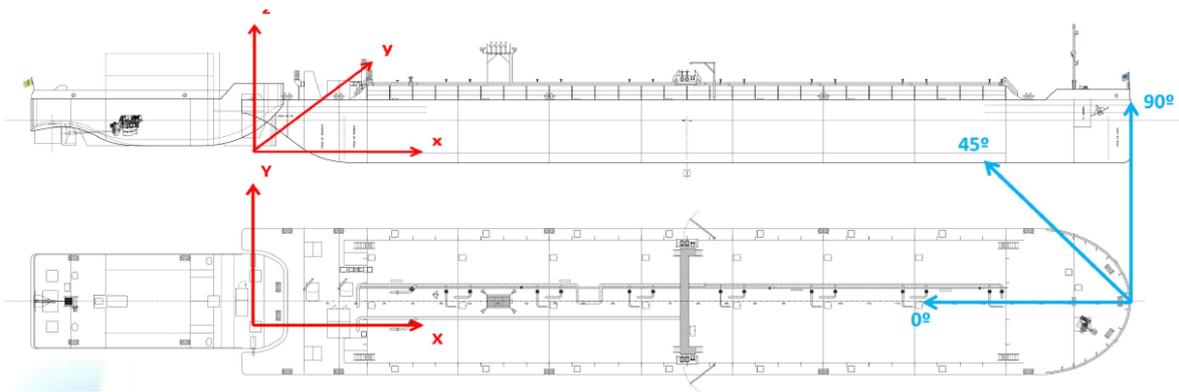
Figuras adicionais ilustrando as embarcações estudadas que utilizam um sistema de acoplamento ATB



*Empurrador Helio Safir – Navegação Guarita S.A.*

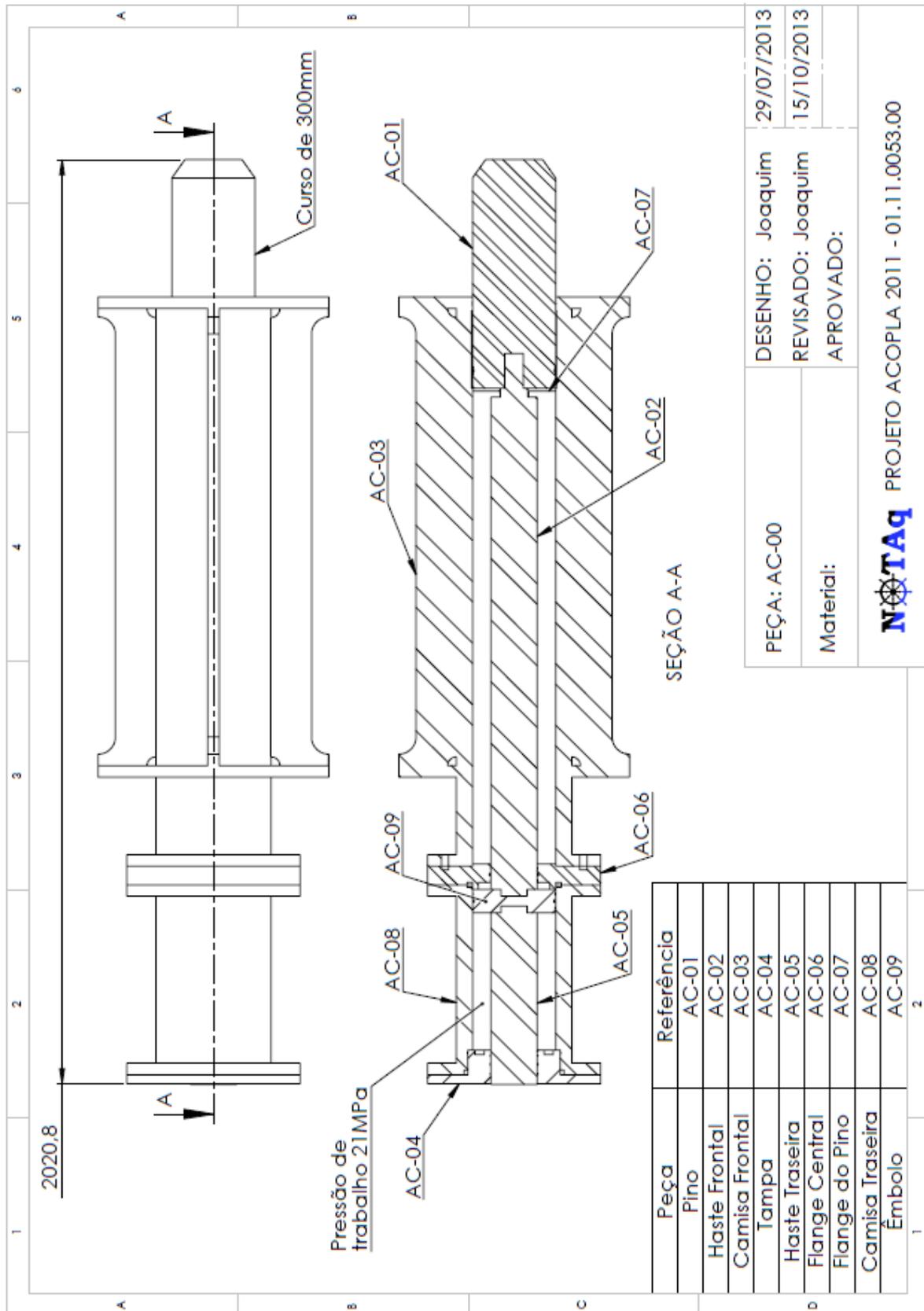


*Barça Eco Energia I – Navegação Guarita S.A.*



# ANEXO C

Desenho de conjunto do sistema hidráulico de extração do pino.



## ANEXO D

Fotos do teste do sistema hidráulico desenvolvido no Projeto ACOPLA.

