



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**JESSICA BEZERRA GUIMARÃES**

**ESTUDO DA VIRADA DO CASCO DE UM REBOCADOR DE 60  
TONELADAS DE BOLLARD PULL E SIMULAÇÃO COM  
PROTÓTIPO**

**FORTALEZA**

**Julho de 2016**

**JESSICA BEZERRA GUIMARÃES**

**ESTUDO DA VIRADA DO CASCO DE UM REBOCADOR DE 60  
TONELADAS DE BOLLARD PULL E SIMULAÇÃO COM  
PROTÓTIPO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Roberto de Araújo  
Bezerra

**FORTALEZA**

**Julho de 2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G978e Guimarães, Jessica Bezerra.

Estudo da virada do casco de um rebocador de 60 toneladas de Bollard Pull e simulação com protótipo / Jessica Bezerra Guimarães. – 2016.

57 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra.

1. Construção naval. 2. Arquitetura naval. 3. Ciência naval. 4. Engenharia naval. I. Título.

CDD 620.1

---

**JESSICA BEZERRA GUIMARÃES**

**ESTUDO DA VIRADA DO CASCO DE UM REBOCADOR DE 60  
TONELADAS DE BOLLARD PULL E SIMULAÇÃO COM  
PROTÓTIPO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Roberto de Araújo Bezerra

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Rocha  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Pierre Maurice Christophe Lamary  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão deste trabalho se tornasse possível:

Ao meu professor orientador Roberto de Araújo Bezerra, pelo auxílio e orientação providos.

Aos meus pais, Nilo e Célia, e minha irmã que com muito apoio, não mediram esforços para que eu pudesse chegar a esta etapa de minha vida.

Às minhas amigas que me acompanharam por quase toda a vida e com quem compartilho esse momento especial, Isabel, Alana, Melina, Natália e Karen.

Aos amigos que conquistei ao longo dessa jornada pela Engenharia, Daniel, Guma, Luis, Welbson, Larissa e Davi.

À Indústria Naval do Ceará por me prover a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos teóricos obtidos ao longo da faculdade.

A Deus, por acreditar que nossa existência pressupõe outra infinitamente superior.

## RESUMO

A construção naval apresenta inúmeras dificuldades no quesito inovação de métodos construtivos, fazendo-se necessário um estudo aprofundado de novos métodos para a aceleração do processo. Por tratar-se de uma construção de grande escala, qualquer erro pode causar consequências severas para o projetista, construtor, comprador e pôr em risco a segurança dos funcionários. O método de construção de casco emborcado necessita de um estudo de viabilidade de sua virada na água. As melhores condições para a ocorrência da virada foram analisadas com o auxílio de software de estudo hidrodinâmico de embarcações e assim, condições como o ponto de aplicação da força dos guindastes, a força necessária para a virada e quando a embarcação pode virar foram descobertas. No estudo em questão, foi construído um protótipo do casco de uma embarcação a ser virada na Indústria Naval do Ceará com a realização de vários testes de virada de casco, nas diferentes condições de análise no software. Chegou-se à conclusão de que a virada de casco necessita do auxílio de dois guindastes, com aplicação de força de 19 toneladas-força para cada um, aplicadas no ponto que tem as coordenadas da boca máxima e longitudinalmente nas cavernas 5 e 28.

Palavras-chave: Virada de Casco; Coordenadas; Boca Moldada; Força aplicada; Centro de Gravidade.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Construção do casco embarcado.....	11
Figura 2 - Virada do casco na água.....	11
Figura 3 - Rebocador Portuário.....	13
Figura 4 - Operação de Reboque.....	14
Figura 5 - Quilha e Cavernas de uma embarcação.....	15
Figura 6 - Principais partes da embarcação e bordos.....	15
Figura 7 - Planos Ortogonais.....	16
Figura 8 - Centro de carena e força empuxo.....	17
Figura 9 - Condição de equilíbrio longitudinal.....	18
Figura 10 - Condições de equilíbrio.....	18
Figura 11 - Condição de equilíbrio para corpos flutuantes.....	19
Figura 12 - Alteração da geometria submersa, em equilíbrio estável.....	20
Figura 13 - Curva Cruzada de Estabilidade de uma embarcação.....	21
Figura 14 - Curva de Estabilidade Estática (CEE) para ambos os bordos da embarcação.....	22
Figura 15 - Posições de Equilíbrio.....	23
Figura 16 - Montagem típica do Anel de Virada.....	25
Figura 17 - Sequência da virada do casco, mostrando a interação entre as forças atuantes no casco.....	25
Figura 18 - Sincronia entre os comportamentos de $GZ_t$ , $GZ$ e $F$ .....	27
Figura 19 - Aplicando $F$ no ponto $T'$ no lugar de $T$ apenas levanta o casco.....	28
Figura 20 - Modelo do Casco no Rhinoceros 4.0.....	34
Figura 21 - Interface do Software Maxsurf para definição das Perpendiculares de Vante (FP) e Ré (AP).....	35
Figura 22 - Interface inicial do Software Hydromax, com o modelo embarcado.....	36
Figura 23 - Parâmetros para o Caso 1, casco embarcado flutuando na água sem forças externas atuantes.....	37
Figura 24 - Simulação do casco embarcado flutuando na água – Vista frontal.....	37
Figura 25 - Simulação do casco embarcado flutuando na água - Vista lateral.....	38
Figura 26 - Loadcase base para o Caso 2, casco embarcado flutuando na água com ação de força externa.....	39
Figura 27 - Gráfico Força x Grau de Inclinação do casco.....	40
Figura 28 - Simulação com força aplicada de 36,4 t – Vista Frontal.....	40
Figura 29 - Simulação com força aplicada de 36,4 t – Vista Lateral.....	41
Figura 30 - Simulação com força aplicada de 36,5 t, ocorreu a virada – Vista Frontal.....	41
Figura 31 - Simulação com força aplicada de 36,5 t, ocorreu a virada – Vista Lateral.....	41
Figura 32 - Loadcase para uma força atuante de 36,4 toneladas.....	42
Figura 33 - Gráfico Braço de Momento restaurador ( $GZ$ ) x Ângulo de Inclinação.....	43
Figura 34 - Loadcase base para Caso 3 com duas forças atuantes nas Cavernas 5 e 28 respectivamente.....	44
Figura 35 - Gráfico Braço de Momento restaurador ( $GZ$ ) x Ângulo de Inclinação.....	46
Figura 36 - Peças a serem cortadas - cavernas e quilha.....	47

Figura 37 - Peças a serem cortadas - chapeamento do casco e convés principal. ....	47
Figura 38 - Foto do processo de corte das peças pela máquina CNC.....	48
Figura 39 - Foto das peças depois de cortadas. ....	48
Figura 40 - Foto das peças das esmerilhadas.....	49
Figura 41 - Foto do esqueleto do protótipo, com cavernas e quilha. ....	49
Figura 42 - Foto do processo de esmerilhamento do chapeamento do casco.....	50
Figura 43 - Foto do modelo esmerilhado.....	50
Figura 44 - Foto do modelo na estação de secagem, após a utilização do primer para aplicação de fibra de vidro. ....	51
Figura 45 - Foto do processo de aplicação de fibra de vidro. ....	51
Figura 46 - Foto do modelo pintado após a aplicação da fibra de vidro.....	52
Figura 47 - Foto do teste de flutuabilidade do modelo. ....	52
Figura 48 - Foto do processo de análise do CG do protótipo. ....	53
Figura 49 - Foto da pesagem do protótipo. ....	53
Figura 50 - Foto do protótipo com os dois dispositivos representativos dos guindastes. ....	54
Figura 51 - Foto do protótipo flutuando emborcado, com marcações em lugares estratégicos para leitura de calado.....	54
Figura 52 - Foto dos dispositivos de guindastes quando içando o protótipo.....	55
Figura 53 - Foto do teste de virada do protótipo. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curvas cruzadas de estabilidade de um casco qualquer. ....	30
Tabela 2 - Amostra de interpolação das curvas cruzadas para um ângulo de inclinação de 60 graus ( $y_t = 5,5$ m; $z_t = 2,2$ m). ....	31
Tabela 3 - Parâmetros de virada para diferentes ângulos de inclinação ( $y_t = 5,5$ m; $z_t = 2,2$ m). ....	32
Tabela 4 - Faixa de $\theta$ e comparação de $F_{max}$ para diferentes valores de $z_t$ .....	33
Tabela 5 - Dados de Peso e Centro de Gravidade do Casco 604. ....	35
Tabela 6 - Tabela Força aplicada e Grau de inclinação do CG correspondente encontrado.....	39
Tabela 7- Dados obtidos pela função Large Angle stability para ângulo de inclinação e braço de momento restaurador GZ. ....	42
Tabela 8 - Tabela Força aplicada e Grau de inclinação do CG correspondente encontrado.....	44
Tabela 9 - Dados obtidos pela função Large Angle stability para ângulo de inclinação e braço de momento restaurador GZ. ....	45

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVOS .....	12
2.1. Objetivo Geral .....	12
2.2. Objetivos Específicos .....	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	13
3.1 Embarcações – O Rebocador .....	13
3.2. Geometria de embarcações .....	14
3.3 Hidrostática e Estabilidade .....	16
3.3.1 Deslocamento e Centro de Carena .....	16
3.4. Momento de Restauração e Braço de Endireitamento .....	19
3.5. Curvas Cruzadas de Estabilidade .....	21
3.6 Curvas de Estabilidade Estática .....	22
4. FÍSICA DO ESTUDO DA VIRADA DE CASCO .....	24
4.1. Definições .....	24
4.1.1. Montagem do Anel de Virada .....	24
4.1.2. Forças e Parâmetros Geométricos .....	26
4.2. Considerações estáticas e dinâmicas .....	26
4.2.1. Ângulo de inclinação e alcance da virada .....	26
4.2.2. Não virada .....	28
4.3. Método numérico .....	28
4.4.1. Equações de equilíbrio .....	28
4.3.2. Utilização das curvas Cruzadas de Estabilidade .....	29
4.4.3. Análise da Força de Virada F .....	32
5. ESTUDO DE CASO .....	34
5.1 Caso 1 – Casco emborcado flutuando em equilíbrio na água .....	36
5.2 Caso 2 – Casco emborcado flutuando na água com uma força atuante .....	38
5.3 Caso 3 – Casco emborcado flutuando na água com duas forças atuantes (Cavernas 5 e 28) .....	43
6. FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO E SIMULAÇÃO DA VIRADA .....	47
7. CONCLUSÕES .....	56
8. REFERÊNCIAS .....	57

# 1. INTRODUÇÃO

A competitividade mundial da indústria naval tem levado os estaleiros a evoluir seus processos produtivos procurando reduzir custos e o tempo de construção das embarcações. Uma tarefa de considerável dificuldade, pois os pedidos são personalizados para atender às necessidades do cliente, o que exige um planejamento apurado no projeto e no processo de construção.

Suprir o mercado com novas embarcações é a missão da indústria de construção naval, desenvolvendo uma série de atividades em um ambiente econômico-industrial complexo, sofisticado e altamente competitivo, as empresas fervejam com melhorias em seus processos, com a finalidade de se destacar e conquistar mais e mais clientes.

A fabricação de uma embarcação é um projeto de engenharia complexo, que envolve inúmeras atividades multidisciplinares, desempenhadas em um longo período de tempo, que mobiliza uma quantidade massiva de recursos de diversas naturezas e é suportado por uma quantia expressiva de dinheiro. Um acompanhamento rígido em todas as fases e processos é necessário, dado que um pequeno imprevisto pode atrasar uma obra em semanas, até mesmo meses, causando prejuízos milionários para o comprador e construtor.

Por esses e outros motivos, novas formas de aceleração e aprimoramento do processo de construção são estudadas e testadas em diversos estaleiros ao redor do mundo. A Indústria Naval do Ceará – INACE S.A, que possui um estaleiro localizado na cidade de Fortaleza-Ceará, foi uma dessas empresas a aplicar uma metodologia diferente no processo de construção de embarcações.

Normalmente, as embarcações ao redor do mundo são construídas em blocos separados e, posteriormente montados e soldados juntos. Esse processo apresenta muitas desvantagens, dentre elas: um maior controle dimensional, caso contrário os blocos não se encaixam posteriormente, o que acontece com bastante frequência; há o acréscimo de custos causados pelas falhas de encaixe; e a necessidade de um apoio maior de grandes guindastes para a movimentação suspensa dos pesados blocos, o que custeia o processo com suas aquisições e manutenção.

A Indústria Naval do Ceará – INACE S.A faz utilização de um novo método para a construção de embarcações, com a finalidade de minimizar esses problemas. Esse método consiste em, primeiramente, construir e soldar todo o estrutural do casco da embarcação de cabeça para baixo, com um só plano de referência, no caso o convés principal da embarcação (Figura 1). As embarcações nesse estaleiro são construídas em cima de trilhos que passam por todos os galpões do estaleiro e desembocam na água. Após a construção

do casco fechado, ele é levado em trilhos para a água e, com o auxílio de guindastes pequenos, é então virado (Figura 2) e trazido de volta ao seu galpão para a fixação de superestruturas, tais como a casaria e o passadiço, e posteriormente os acabamentos.

**Figura 1 - Construção do casco emborcado.**



**FONTE: Indústria Naval do Ceará.**

**Figura 2 - Virada do casco na água.**



**FONTE: Indústria Naval do Ceará.**

A maior vantagem desse método é a uniformidade do casco com redução de problemas de encaixe. Uma vez que a hidrodinâmica projetada de uma embarcação é crucial para seu funcionamento, sua função depende da construção se ater ao projeto. Um estudo aprofundado de conceitos de hidrodinâmica e dos esforços necessários para a virada de cada casco específico é fundamental para o sucesso do procedimento.

Esse trabalho tem como objetivo, apresentar conceitos, metodologia e um estudo de caso, bem como a construção de um modelo para a análise da virada do casco de um rebocador em construção por esse método no estaleiro INACE e que foi até então o maior e mais pesado casco a ser virado no cais na história do estaleiro.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é fazer um estudo da viabilidade do método de virada de casco de um Rebocador de 60t de Bollard Pull em construção no estaleiro INACE.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Descobrir qual a inclinação e os esforços necessários para ocorrer a virada do casco através de análise computacional utilizando um software de análise de hidrodinâmica de embarcações.
- Estabelecer uma solução viável e econômica para a virada de casco.
- Criar um protótipo que represente fielmente o real.
- Simular a virada de casco do modelo em questão com os parâmetros estudados pelo software.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Embarcações – O Rebocador

Embarcações são construções feitas de madeira, concreto, ferro, aço ou da combinação desses e outros materiais, que flutua e é destinada a transportar pela água pessoas ou cargas (MAURÍLIO M. FONSECA, ARTE NAVAL, 2002). Elas são projetadas para cumprir os requisitos dos compradores e suas características para exercer as funções, sejam elas comerciais, de guerra ou de auxílio em operações específicas. O tipo da embarcação em questão nesse estudo é o do casco de um rebocador de 60 toneladas de Bollard Pull.

Destinado a serviços portuários, o rebocador (Figura 3) é utilizado nas operações de atracação e desatracação das embarcações que chegam ao porto. De dimensões pequenas em relação aos grandes navios que rebocam, os rebocadores precisam, acima de tudo, ser muito potentes (DEBORA P. G. DA SILVA, UFRJ- REBOCADORES PORTUÁRIOS, 2015).

**Figura 3 - Rebocador Portuário**



**FONTE: SEASPAN**

Quando um navio a ser atracado chega à entrada do porto, o rebocador segue em sua direção em sua velocidade máxima a fim de encontrá-lo e iniciar a operação de reboque. Normalmente seguem dois ou mais rebocadores, dependendo do porte do navio a ser atracado, como na Figura 4. Em seguida, são lançadas as cordas que irão tracionar o navio, uma à vante e outra à ré, se necessário. Enquanto isso, também se houver necessidade, um terceiro rebocador se aproxima do costado do navio agindo como empurrador.

Ao chegar ao porto, os rebocadores atuam praticamente parados, agindo contra o casco do navio e, lentamente o vão atracando. Terminado o serviço, retornam a seus postos aguardando novo pedido de operação (DEBORA P. G. DA SILVA, UFRJ- REBOCADORES PORTUÁRIOS).

**Figura 4 - Operação de Reboque**



**FONTE: SEASPAN**

O Bollard Pull, também denominado Toneladas de Tração Estática (TTE) é a medida em toneladas da capacidade de reboque de um rebocador, é o valor da carga de tração que deve ser imposta ao cabo de reboque. Para a medição do Bollard Pull, o rebocador é colocado à potência máxima no motor enquanto é verificada a força que ele está fazendo em um dinamômetro. A força máxima que ele consegue obter no teste representa o Bollard Pull e, assim, fica definida sua capacidade de reboque. A potência do rebocador é dimensionada de acordo com o Bollard Pull requerido (DEBORA P. G. DA SILVA, UFRJ- REBOCADORES PORTUÁRIOS).

Outra característica muito comum aos rebocadores é o casco tipo colher, para lhe dar mais manobrabilidade e espaço para os propulsores, normalmente em número de dois. Sua cabine de comando também recebe atenção especial quanto à visibilidade das manobras, de modo a permitir o comando do navio em controle a 360° de visão para as operações serem bem sucedidas.

### **3.2. Geometria de embarcações**

Uma embarcação é composta por vários componentes que têm designações próprias de engenharia naval. A Quilha de uma embarcação é a peça disposta em todo o comprimento do casco no plano diametral e na parte mais baixa do navio, constituindo a “espinha dorsal” da embarcação. As cavernas são peças curvas que se fixam na quilha em direção perpendicular a ela e que servem para dar forma ao casco e sustentar o chapeamento exterior, que por sua vez, é a casca que lacra os compartimentos definidos pelas cavernas. O casco é o corpo do navio sem superestruturas, aparelhos e acessórios, ou qualquer outro arranjo e a principal característica de sua forma é ter um plano de simetria (plano longitudinal) que se imagina passar pelo eixo da quilha.

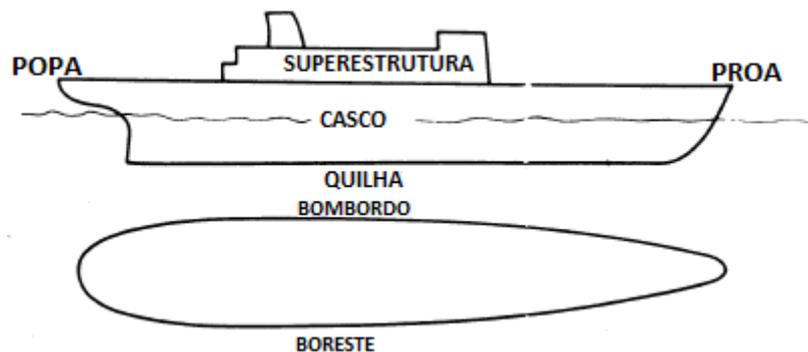
**Figura 5 - Quilha e Cavernas de uma embarcação.**



**FONTE:** <http://www.selway-fisher.com/Stripplank.htm>

As partes principais de uma embarcação típica com seus respectivos termos estão ilustradas na Figura 5. Pelo fato de que, no início, elas são de menor interesse ou influência, as superestruturas e casarias são ignoradas em análises de estabilidade e o casco da embarcação é considerado uma casca vazia curva em todas as direções, com um deck estanque selando o casco acima.

**Figura 6 - Principais partes da embarcação e bordos.**



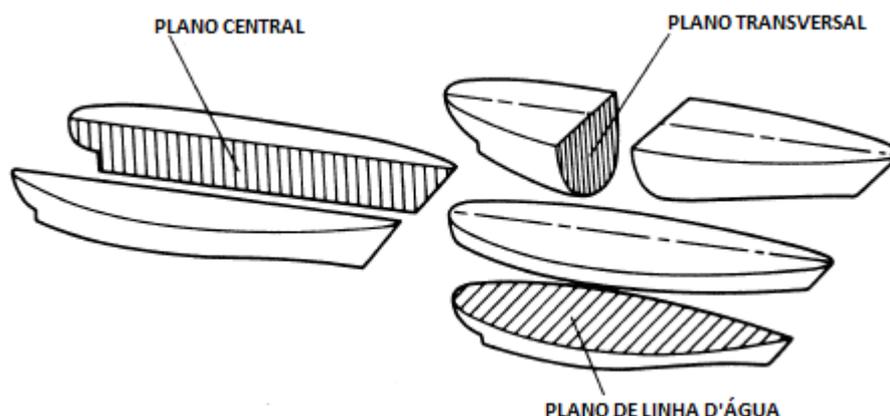
**FONTE:** RAWSON, BASIC SHIP THEORY.

A indústria naval utiliza uma nomenclatura particular para designar as direções quando em uma embarcação. A proa é a extremidade anterior do navio no sentido de sua marcha normal. Popa é a extremidade posterior do navio. Os bordos são as duas partes simétricas em que o casco é dividido pelo plano longitudinal, onde boreste (BE) é a parte à direita e bombordo (BB) é a parte à esquerda, supondo-se o observador situado no plano diametral e olhando para a proa (Figura 6).

A meia-nau (MN) é a parte do casco compreendida entre a proa e a popa, nesse estudo considera-se a meia-nau exatamente à metade do comprimento da embarcação. A vante e a ré: diz-se que qualquer coisa é de vante ou está a vante (AV), quando está na proa; e que é de ré ou está à ré (AR), quando está na popa.

Uma característica geométrica dos navios é a de haver um plano de simetria no casco; este plano chama-se plano longitudinal (ou plano central) e passa pela quilha. Quando o navio está aprumado, o plano longitudinal é perpendicular ao plano da superfície da água, que se chama plano de flutuação. Plano transversal é um plano perpendicular ao plano longitudinal e ao de flutuação. A Linha de flutuação (LF ou DWL) ou linha d'água é a interseção da superfície da água com o contorno exterior do navio (Figura 7).

**Figura 7 - Planos Ortogonais**



**FONTE: RAWSON, BASIC SHIP THEORY.**

Boca é a largura do barco na seção transversal a que se referir; a palavra boca, sem referência à seção em que foi tomada, significa a maior largura do casco. Meia boca é a metade da boca.

As perpendiculares (PP) são duas retas normais à linha-d'água projetada, contidas no plano diametral e traçadas em dois pontos especiais, na proa e na popa, no desenho de linhas do navio; são as perpendiculares à vante (PP-AV) e à ré (PP-AR). Nas Marinhas brasileira e americana, a PP-AR é a vertical tirada no ponto de interseção da linha-d'água projetada com o contorno da popa.

### **3.3 Hidrostática e Estabilidade**

#### **3.3.1 Deslocamento e Centro de Carena**

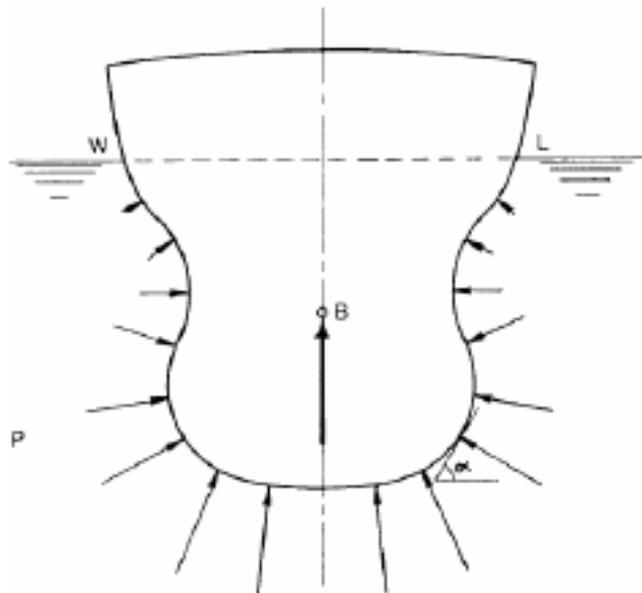
O volume de deslocamento (V) de um navio é o volume deslocado pela sua porção submersa e, portanto, está associado à condição de calado em que se encontra (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010). Conhecendo-se a densidade ( $\rho$ ) do fluido no qual o corpo está flutuando, é possível determinar o peso (W) do fluido deslocado como:

$$W = \rho \cdot g \cdot V$$

As embarcações seguem uma lei de flutuação chamada Princípio de Arquimedes – “Um corpo total ou parcialmente mergulhado num fluido é submetido à ação de uma força de intensidade igual ao peso do volume do fluido deslocado pelo corpo, de direção vertical, do sentido de baixo para cima, e aplicada no centro de empuxo” (Principles of Naval Architecture, 1988). O princípio de Arquimedes então estipula que o empuxo atuante na porção submersa do corpo será também igual a  $W$  e o peso total do corpo deverá ser também igual a  $W$  para que se possa garantir a flutuabilidade do corpo nesta situação.

O centroide da porção submersa do corpo é denominado centro de carena (B) (Figura 8). A posição do centro de carena é importante porque a força de empuxo tem sua linha de ação passando por este ponto, como na Figura 8 (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010).

**Figura 8 - Centro de carena e força empuxo.**



**FONTE: PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE, 1988.**

### **3.3.2 Condição de Equilíbrio de Corpos Flutuantes**

A condição para um corpo qualquer permanecer em equilíbrio é apresentar a somatória das forças e momentos atuantes nula, ou seja:

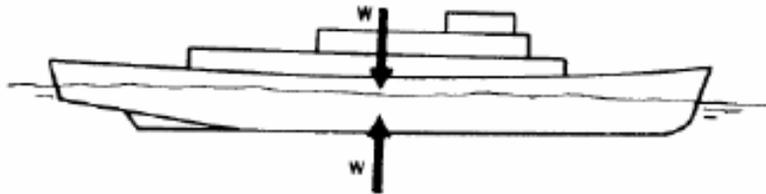
$$\Sigma F_{\text{externas}} = 0$$

$$\Sigma M_{\text{externas}} = 0$$

A primeira condição impõe que o peso deve ser igual ao empuxo para um corpo flutuante, e a segunda que as forças peso e empuxo tenham a mesma reta como linha de atuação (Figura 9). Esta segunda condição impõe

que o centro de carena e o centro de gravidade do corpo estejam na mesma vertical, como na figura abaixo (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010).

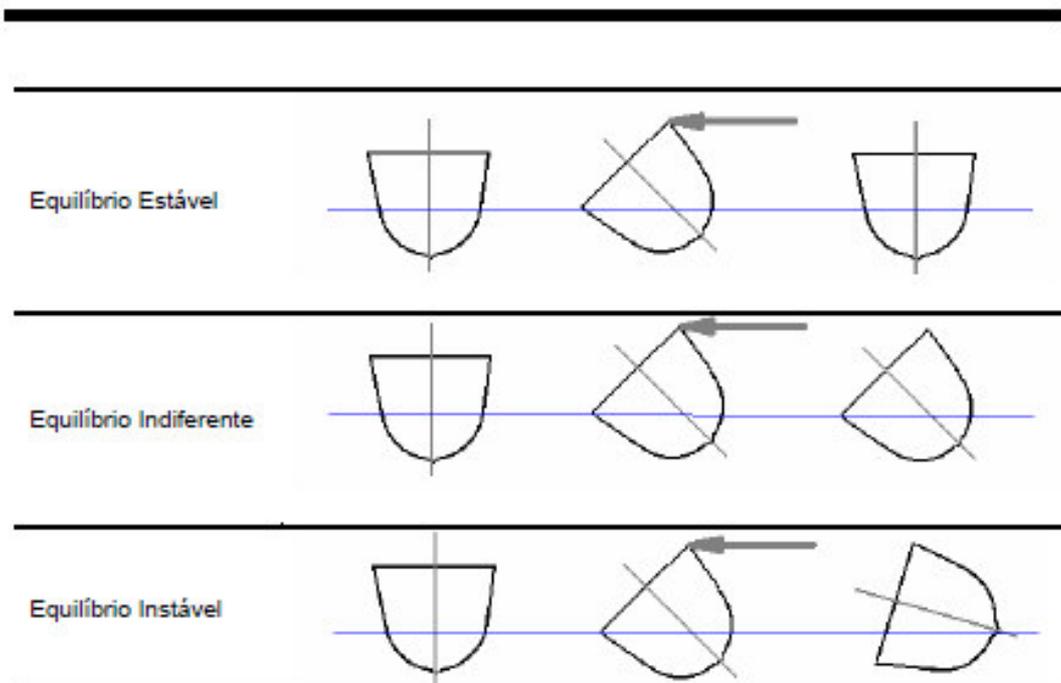
**Figura 9 - Condição de equilíbrio longitudinal.**



**FONTE: PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE, 1988.**

Esta posição de equilíbrio é dita estável, ou positiva, se uma pequena perturbação nesta posição de equilíbrio levar ao aparecimento de forças, ou momentos, que tendam a retornar o corpo à posição inicial. Se um pequeno deslocamento leva ao aparecimento de esforços que tendam a afastá-lo de sua posição inicial, o ponto de equilíbrio é dito instável ou negativo. Existe ainda o ponto de equilíbrio indiferente ou neutro, sendo aquele para o qual o afastamento da posição de equilíbrio sempre leva a uma nova posição de equilíbrio (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010). A Figura 10 apresenta essas três condições.

**Figura 10 - Condições de equilíbrio.**

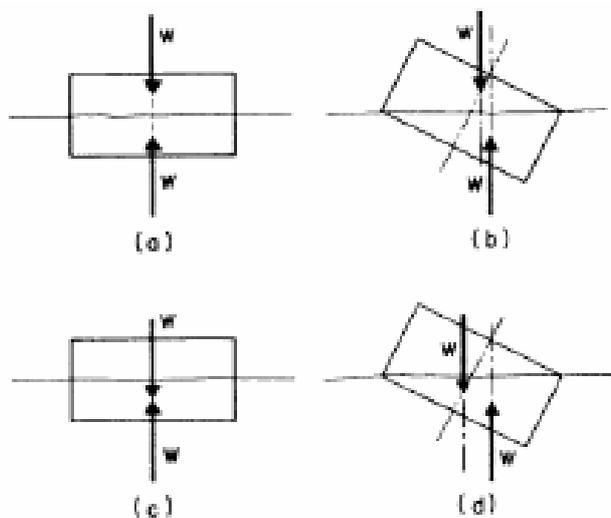


**FONTE: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - EPUSP.**

A posição relativa entre o centro de gravidade e o centro de carena define também a condição de equilíbrio. Em corpos totalmente submersos, a posição do centro de carena é fixa, uma vez que não há variação da geometria submersa quando na presença de uma perturbação da condição de equilíbrio; condição definida pela posição do centro de gravidade. Caso o centro de gravidade esteja acima do centro de carena, a posição de equilíbrio será instável; se estiver abaixo será estável e se coincidir com o centro de carena o equilíbrio será indiferente (Figura 10).

Para corpos flutuantes, não totalmente submersos, o fato do centro de gravidade estar acima do centro de carena não implica necessariamente em uma condição de equilíbrio instável. Isto se verifica devido à alteração da posição do centro de carena após uma perturbação que provoque uma modificação na geometria submersa do corpo. A situação (a) da Figura 11 ilustra esta situação, mostrando que se trata de uma condição de equilíbrio estável. À medida que o centro de gravidade se aproxima do centro de carena, o momento (binário) restaurador aumenta, conforme se verifica nas situações (c) e (d) da mesma figura. À medida que o centro de gravidade se eleva, o ponto de equilíbrio tende à instabilidade.

**Figura 11 - Condição de equilíbrio para corpos flutuantes.**



**FONTE: PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE, 1988.**

### **3.4. Momento de Restauração e Braço de Endireitamento**

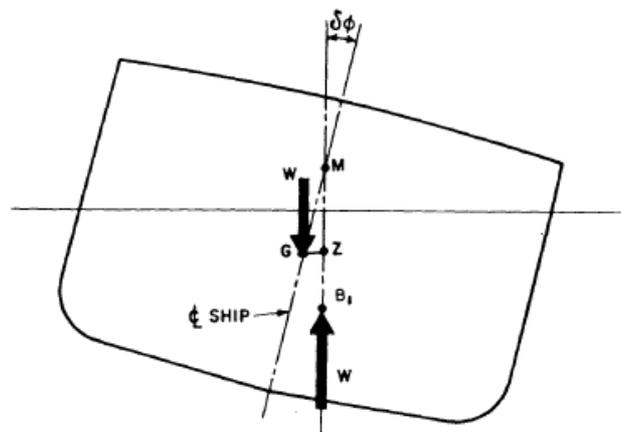
A inclinação entre o plano de simetria longitudinal da embarcação e um plano perpendicular à linha d'água é chamado de Banda. A inclinação, no sentido longitudinal, entre o plano de base da embarcação e um plano paralelo

à linha d'água é chamado de Trim. As condições necessárias para que uma embarcação apresente-se em equilíbrio estável é a de não possuir banda ( $\Phi = 0$ ) ou trim ( $\beta=0$ ).

Momento de restauração é o momento gerado pelo binário formado pelas forças peso e empuxo. Dependendo da geometria do corpo e de sua distribuição de massa, este momento poderá deixar de ser um momento estabilizador (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010).

O metacentro de uma embarcação é o ponto de cruzamento entre uma reta vertical na posição de equilíbrio e a reta perpendicular à superfície do corpo após uma perturbação. Ele pode ser transversal ou longitudinal. O adernamento (inclinação lateral) de uma embarcação promove uma mudança na geometria submersa e conseqüentemente na posição do seu centro volumétrico, passando o centro de carena B para  $B_1$  (Figura 12), o que provoca o surgimento de um momento que pode ser de restauração ou emborcamento, dependendo da posição relativa do centro de massa do corpo em relação ao metacentro M na figura abaixo. Se o centro de gravidade CG estiver abaixo do ponto M, o momento será de restauração e a embarcação encontra-se na situação de equilíbrio estável. Se estiver acima, o equilíbrio é instável (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010).

**Figura 12 - Alteração da geometria submersa, em equilíbrio estável.**



**FONTE: PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE, 1988.**

Na situação de equilíbrio estável, este momento restaurador (ou momento de endireitamento) é importante e define o ângulo de banda devido a uma solicitação externa qualquer ou mesmo uma movimentação de carga a bordo. O valor do momento dessa solicitação externa pode ser calculado como o momento da força peso em relação ao centro de carena ( $B_1$ ) na Figura 12. A distância horizontal entre CG e B é chamada braço de endireitamento GZ. Para a posição inicial ( $\Phi = 0$ ), o braço de endireitamento, como definido, pode ser determinado por:

$$GZ = GM \cdot \sin \Phi \quad (1)$$

Onde GM (altura metacêntrica) é a distância relativa entre o CG e o ponto M, considerada positiva se o CG estiver abaixo do ponto M, e negativa caso contrário.

O momento de restauração para esta posição inicial então será:

$$M(\theta) = \rho \cdot g \cdot V \cdot GM \cdot \sin \Phi \quad (2)$$

onde V é o volume de deslocamento do corpo e  $\Phi$  seu ângulo de banda.

No caso de o CG estar acima do ponto M ( $GM < 0$ ), o momento  $M(\Phi)$  atua como um momento de emborcamento, caracterizando este ponto de equilíbrio como instável.

Analogamente, para uma perturbação longitudinal, provocando o aparecimento de um ângulo de trim  $\beta$ , o braço de endireitamento longitudinal e o momento de restauração longitudinal são determinados por:

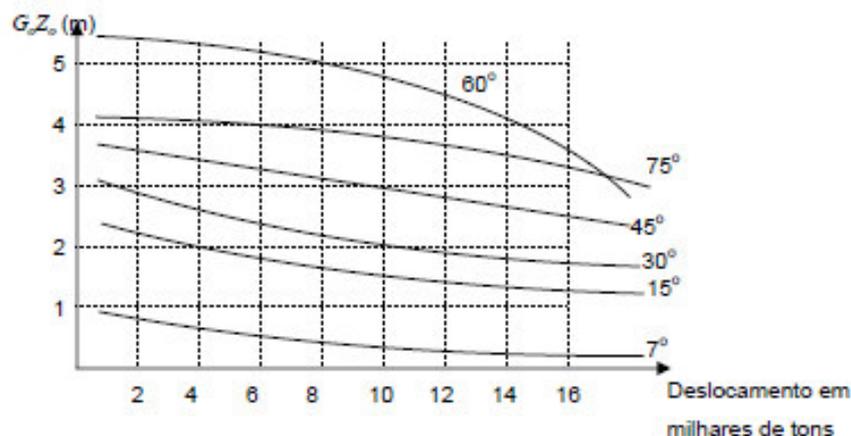
$$GZ_L = GM_L \cdot \sin \beta \quad (3)$$

$$M_L(\tau) = \rho \cdot g \cdot V \cdot GM_L \cdot \sin \beta \quad (4)$$

### 3.5. Curvas Cruzadas de Estabilidade

As curvas cruzadas de estabilidade (CCE) fornecem, para vários deslocamentos e ângulos de banda, o braço de endireitamento/emborcamento  $G_0Z_0$ , para um posição de referência do centro de gravidade  $G_0$ . A Figura 13 apresenta um exemplo de CCE.

**Figura 13 - Curva Cruzada de Estabilidade de uma embarcação.**



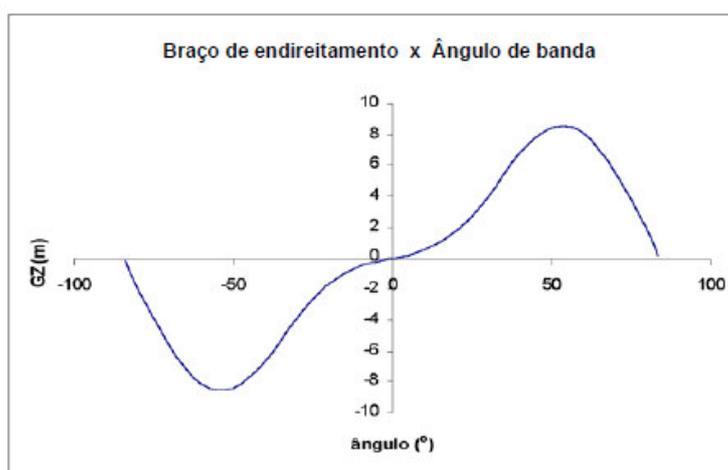
**FONTE: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - EPUSP.**

A consulta às curvas cruzadas permite, para uma dada posição do centro de massa, a determinação dos braços de endireitamento em função do ângulo de inclinação, para qualquer valor de deslocamento do navio (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010).

### 3.6 Curvas de Estabilidade Estática

A curva de estabilidade estática (CEE) para uma dada direção (longitudinal ou transversal) contém todas as informações sobre a estabilidade de uma embarcação operando em um determinado calado (ou deslocamento) (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010). A Figura 14 é um exemplo de uma CEE.

**Figura 14 - Curva de Estabilidade Estática (CEE) para ambos os bordos da embarcação.**



**FONTE: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica – EPUSP.**

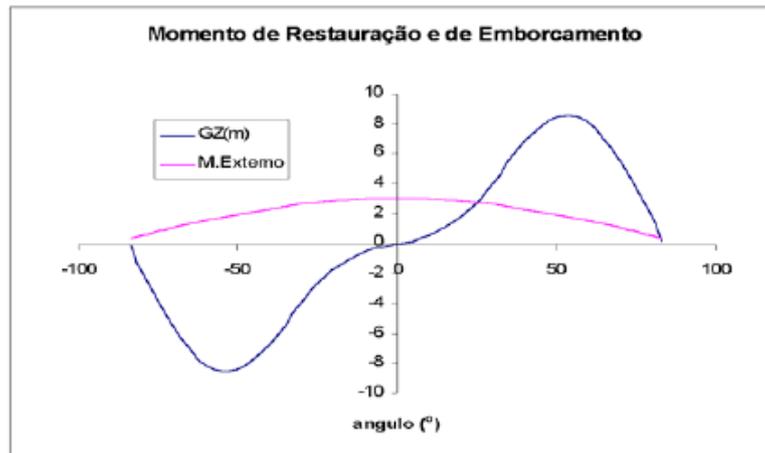
A consulta às curvas de estabilidade estática permitem, para uma dada posição do centro de gravidade ( $G_0$ ), a determinação dos braços de endireitamento em função do ângulo de inclinação, para um deslocamento constante. Basta para isso ler os valores  $G_0Z_0$  sobre uma vertical no deslocamento em questão. Assim pode-se traçar a curva de estabilidade estática.

De posse da CEE é possível estudar o efeito de momentos externos à embarcação, e determinar as posições de equilíbrio que deverão ser consideradas. A Figura 15 apresenta uma curva hipotética para o momento externo atuante na embarcação dividido pelo seu deslocamento e a CEE.

O equilíbrio será atingido quando o momento de restauração se igualar ao momento de emborcamento externo. Porém, como representado na figura,

pode acontecer de existir dois pontos de cruzamento entre a CEE e a do momento externo aplicado sobre o corpo. Neste caso, o ponto da direita representa um equilíbrio instável, uma vez que a embarcação não conseguirá retornar a esta posição após uma pequena perturbação (MARCELO RAMOS MARTINS, 2010).

**Figura 15 - Posições de Equilíbrio.**



**FONTE Departamento de Engenharia Naval e Oceânica – EPUSP.**

## **4. FÍSICA DO ESTUDO DA VIRADA DE CASCO**

A posição emborcada apresenta muitas vantagens na construção de casco de embarcações que possuem um formato mais trabalhado, frequentemente com ou sem um corpo intermediário. Esse tipo de forma de casco é típico de navios militares, rebocadores, barcos de pesca, iates, dentre outros. A utilização do convés principal como base de suporte para a montagem das cavernas ou blocos é mais simples do que erguer toda a estrutura na posição normal ou sobre berços. A construção de casco emborcado aumenta a velocidade de produção e melhora o controle de distorção do casco.

Apesar da construção de casco emborcado apresentar diversos benefícios em construções navais, ela envolve um grau de dificuldade considerável. Normalmente os estaleiros se dedicam à construção de embarcações de pequeno e médio porte e não possuem guindastes com capacidade suficiente para virar um casco completamente em uma única operação. Uma solução normalmente usada é dividir o casco em blocos, sendo que as junções destes não são soldadas, mas somente alinhadas. No entanto, quando se aumenta a quantidade de blocos, os problemas de alinhamento das estruturas ficam mais acentuados, e com eles o risco de os benefícios da construção de casco emborcado não serem tão vantajosos. Da mesma maneira, a utilização de trilhos de transporte para viradas de embarcações pequenas, empurrando-as pelo chão, não é viável para embarcações maiores.

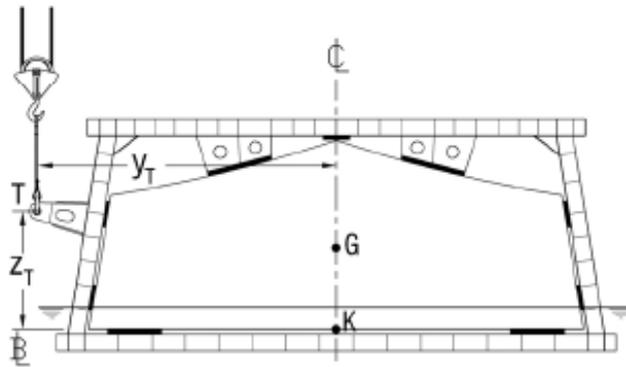
Adicionalmente, na virada em terra firme, a interação entre as forças concentradas de içamento e de cargas distribuídas, associadas com o próprio peso do barco podem causar deformações permanentes na estrutura.

### **4.1. Definições**

#### **4.1.1. Montagem do Anel de Virada**

A Figura 16 representa a seção transversal mostrando a montagem para o Anel de Virada. É uma armação estrutural que rodeia o casco e o convés, com a finalidade de distribuir a força de içamento aplicada pelo guindaste no ponto T. Na figura, o casco encontra-se flutuando na posição emborcada.

**Figura 16 - Montagem típica do Anel de Virada.**



**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

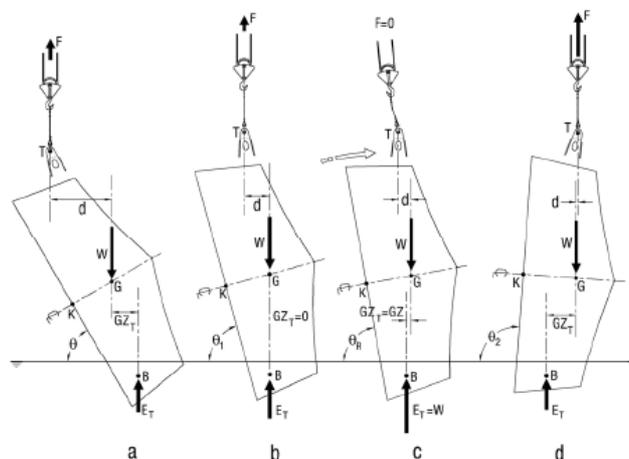
O casco hipotético considerado é o de uma embarcação de passeio com casco de alumínio. Na condição mostrada, a estrutura do casco está finalizada. Todas as aberturas no convés estão fechadas ou não foram cortadas, nos dando um corpo à prova d'água.

Os parâmetros indicados na Figura 16 são:

- $KG$  = Altura do centro de gravidade medida a partir da linha de base invertida (localizada no convés principal) = 1,53 m
- $y_T$  = posição transversal medida a partir da linha de centro no ponto T, onde a força de içamento é aplicada (no caso sendo metade da boca da embarcação).
- $z_T$  = posição vertical medida da linha de base (altura) do ponto T.

A Figura 17 mostra a sequência de virada do casco. A estrutura do anel foi omitida para melhor visualização.

**Figura 17 - Sequência da virada do casco, mostrando a interação entre as forças atuantes no casco.**



**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

### 4.1.2. Forças e Parâmetros Geométricos

A Figura 17.a representa o casco com um determinado grau de inclinação  $\theta$ . Os parâmetros mostrados são:

- $W$  = Peso do casco mais o peso do anel de virada, aplicado no centro de gravidade  $G$ , igual a 42,06 toneladas métricas para o exemplo.
- $F$  = Força de içamento aplicada pelo guindaste no ponto  $T$ . A determinação dessa força é de grande importância para determinar a segurança de operação do guindaste.
- $E_T$  = Força de empuxo atuando no centro de empuxo  $B$ . Nota-se que, diferentemente da condição de flutuação normal onde a força de empuxo é sempre igual a  $W$ ,  $E_T$  muda de acordo com o grau de inclinação  $\theta$ , seguindo a variação de  $F$ .
- $GZ_T$  = Distância entre as linhas verticais de  $W$  e  $E_T$ . Apesar de ser similar, essa distância não é igual ao braço de momento  $GZ$  de uma condição de flutuação comum.
- $d$  = Distância entre as linhas verticais de  $W$  e  $F$ .

## 4.2. Considerações estáticas e dinâmicas

A determinação do ponto de aplicação da força de virada  $T$  é de extrema importância. Uma determinação incorreta pode apresentar sérios riscos à operação ou, por outro lado, a virada pode não ocorrer.

### 4.2.1. Ângulo de inclinação e alcance da virada

Na Figura 17.b o casco alcançou o começo da virada. Então, daquele ponto em diante haverá apenas momentos favoráveis à virada ao redor do ponto  $G$ , e o casco pode até virar sem a ajuda da força  $F$ . Define-se  $\theta_1$  como o ângulo de inclinação onde a linha vertical de  $B$  coincide com a linha vertical de  $W$ , ou o ângulo de virada.

Até o ângulo de virada  $\theta_1$  há equilíbrio entre os momentos em torno de  $G$  devido às forças  $E_T$  e  $F$ . Isso significa que o guindaste tem total controle sobre o casco e, se algo der errado, o operador pode baixá-lo de volta à posição inicial (Figura 16). Perto do ângulo de virada,  $F$  é muito baixo e  $E_T$  é quase igual a  $W$ .

Após o ângulo de virada  $\theta_1$  a posição que corresponde a  $\theta_R$  na Figura 17.c pode ser uma qualquer no intervalo entre  $\theta_1$  e  $\theta_2$  (Figura 17.d). Nessa

condição, o casco vira livremente. Nesse intervalo, a linha vertical associada a  $F$  ainda se localiza antes ou muito próxima da linha vertical de  $W$ . Então, para restaurar o equilíbrio,  $F$  deverá atuar invertida, apontando para a água. Isso é impossível para o guindaste, e o casco continua acelerando após  $\theta_1$ .

O movimento é relativamente rápido e o guindaste não possui condições mecânicas para acompanhá-lo e o cabo fica solto por um tempo.

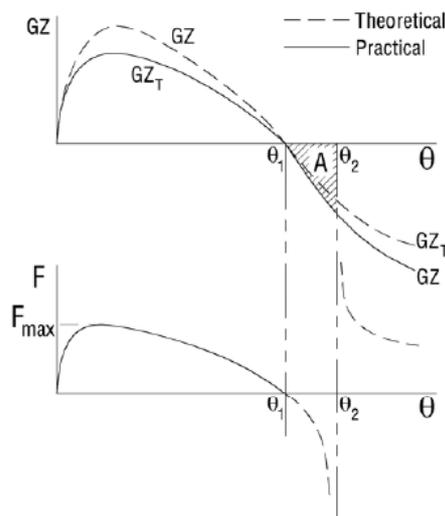
Quando o casco alcança a posição que corresponde ao ângulo  $\theta_2$ , a linha vertical de  $F$  se desloca minimamente para depois da linha vertical de  $W$ , como mostrado na figura 17.d. Então, teoricamente,  $F$  pode balancear  $E_T$  novamente. No entanto, a distância  $d$  ainda é muito pequena em  $\theta_2$ . Por outro lado, ao mesmo tempo  $GZ_T$  já é maior que  $d$ , então  $F$  deve ser bem maior para compensar a falta de um braço de momento equivalente.

Adicionalmente, o casco adquiriu uma energia cinética considerável, acelerada pelo momento gerado por  $W_T$  e  $E_T$ , quando virando livremente entre  $\theta_1$  e  $\theta_2$ . Então, pode acontecer de o guindaste sofrer um impacto severo em  $\theta_2$ .

Uma vez que a força  $F$  deixa de atuar entre  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , apenas o peso e o deslocamento atuam no casco. Então o braço de momento  $GZ_T$  funciona como o  $GZ$  convencional em uma curva de estabilidade comum.

Deve-se observar que na Figura 18, a curva de  $F$  após  $\theta_1$  é teórica pelo fato de que após esse ponto até  $\theta_2$  é impossível para o guindaste controlar o movimento e após  $\theta_2$  é desnecessário tentar equilibrar as forças  $F$  e  $E_T$ . O operador do guindaste deve soltar o cabo, permitindo que o casco caia para posição desemborcada, talvez apenas acionando os freios para diminuir sua velocidade.

**Figura 18 - Sincronia entre os comportamentos de  $GZ_t$ ,  $GZ$  e  $F$ .**

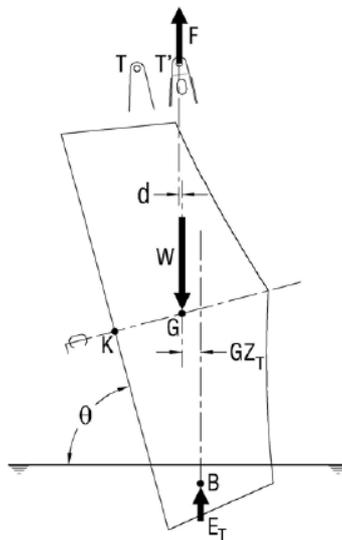


**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

### 4.2.2. Não virada

Uma posição errada para o ponto T de aplicação da força F pode também evitar a virada. A Figura 20 representa um guindaste atuando em um ponto T' ao invés de T. Nesse ponto, o braço de momento d se torna muito curto para compensar  $GZ_T$ . Apesar de uma virada bem planejada ocorrer com valores bem baixos para a força F quando o casco se aproxima à inclinação  $\theta_1$ , essa força pode alcançar valores que se aproximam de W. Esse valor ainda é maior que  $F_{MAX}$ , o que deve ocorrer para pequenos ângulos de inclinação. Isso significa que o casco foi levantado ao invés de virado.

**Figura 19 - Aplicando F no ponto T' no lugar de T apenas levanta o casco.**



**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

Efeitos secundários como vento, resistência e fricção da água são difíceis de prever corretamente nessa situação, então deve-se levar em conta uma margem de erro considerável para compensá-los.

## 4.3. Método numérico

### 4.4.1. Equações de equilíbrio

Considerando que o processo pode ser analisado quase de uma maneira estática, pode-se deduzir que as equações de equilíbrio são:

$$\Sigma M_G = 0 \quad (5)$$

$$\Sigma F_x = 0 \quad (6)$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad (7)$$

$$\Sigma F_z = 0 \quad (8)$$

As forças atuantes ao longo das direções x e y (comprimento e boca respectivamente) não são significantes e as equações (6) e (7) não serão usadas.

Para simplificar as estimativas, os momentos são considerados com relação a G. Levando em consideração todos os momentos baseados nas forças da Figura 17 pode-se desenvolver a equação (5) como:

$$\Sigma M_G = F.d - E_T.GZ_T$$

$$0 = F.d - E_T.GZ_T$$

$$F = (E_T.GZ_T) / d \quad (9)$$

Considerando todas as forças verticais mostradas na figura 17, pode-se definir a equação (8) como:

$$\Sigma F_z = E_T + F - W$$

$$0 = E_T + F - W$$

$$F = W - E_T \quad (10)$$

Então há duas equações para se determinar F. De acordo com (9), F poderia ser obtida se o balanceamento do momento for conhecido também. Para (10), a relação é sobre as forças verticais. Então, para melhor compreensão do método proposto, reescrevendo (9) e (10):

$$F_M = E_T.GZ_T / d \quad (11)$$

$$F_V = W - E_T \quad (12)$$

Se os dados obtidos por esse método forem consistentes, obtém-se:

$$F = F_M = F_V \quad (13)$$

O que significa que a diferença entre as duas forças deve ser:

$$\Delta F = F_M - F_V = 0 \quad (14)$$

#### **4.3.2. Utilização das curvas Cruzadas de Estabilidade**

Uma característica importante dessa metodologia é a capacidade de se usar curvas cruzadas de estabilidade convencionais, calculadas por qualquer

software de computador. Uma recomendação é escolher um software que possa rodar as curvas para qualquer ângulo desejado. Essa propriedade permite estudar o ângulo de inclinação em passos tão próximos quanto a 1 grau.

A Tabela 1 é uma típica tabela de dados gerados por um software de arquitetura naval para curvas cruzadas de estabilidade. Ela apresenta as curvas em um formato numérico, que para cada ângulo de inclinação:

- D = Deslocamento em água salgada expresso em toneladas métricas.
- $GZ_0$  = Braço de momento restaurador considerando o centro de gravidade hipotético colocado no ponto K.

**Tabela 1- Curvas cruzadas de estabilidade de um casco qualquer.**

10°		20°		30°		40°		50°		60°		70°		80°	
D (t)	$GZ_0$ (m)														
1.09	4.28	0.54	4.19	0.38	3.89	0.31	3.46	0.29	2.92	0.30	2.29	0.34	1.60	0.46	0.87
4.50	4.08	2.21	4.09	1.54	3.84	1.27	3.44	1.16	2.92	1.22	2.31	1.41	1.63	1.89	0.94
10.39	3.88	5.07	4.00	3.53	3.79	2.91	3.41	2.70	2.91	2.78	2.32	3.20	1.67	4.29	1.01
18.83	3.68	9.16	3.91	6.34	3.74	5.23	3.39	4.85	2.91	4.99	2.34	5.75	1.71	7.68	1.09
29.91	3.48	14.50	3.82	10.02	3.69	8.23	3.36	7.63	2.90	7.86	2.35	9.04	1.75	12.06	1.16
43.70	3.27	21.11	3.72	14.57	3.64	11.95	3.34	11.06	2.90	11.38	2.37	13.08	1.79	17.45	1.23
60.23	3.07	29.02	3.63	20.01	3.59	16.40	3.31	15.16	2.89	15.57	2.38	17.88	1.83	23.83	1.31
79.52	2.86	38.21	3.54	26.33	3.54	21.57	3.29	19.92	2.89	20.45	2.40	23.46	1.86	31.24	1.38
101.57	2.66	48.73	3.44	33.57	3.48	27.47	3.26	25.36	2.88	26.01	2.41	29.83	1.90	39.64	1.45
126.4	2.46	60.63	3.35	41.70	3.43	34.11	3.23	31.48	2.88	32.27	2.42	36.99	1.94	48.70	1.51
153.9	2.26	73.89	3.25	50.73	3.38	41.49	3.21	38.26	2.87	39.22	2.44	44.93	1.98	58.21	1.55
184.1	2.06	88.52	3.16	60.68	3.33	49.62	3.18	45.74	2.87	46.85	2.45	53.66	2.01	68.08	1.59
216.9	1.86	104.5	3.06	71.57	3.28	58.49	3.15	53.91	2.86	55.19	2.47	63.14	2.05	78.22	1.61
252.1	1.67	121.9	2.97	83.42	3.22	68.11	3.13	62.76	2.85	64.23	2.48	73.16	2.08	88.61	1.63
289.7	1.49	140.7	2.87	96.23	3.17	78.47	3.10	72.31	2.85	73.98	2.49	83.57	2.10	99.22	1.65

**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

A Tabela 2 é uma amostra de como determinar  $F$ ,  $E_T$  e  $GZ_T$  em um ângulo de inclinação arbitrário de 60 graus.

O valor corrigido de  $GZ$  convencional para a coordenada  $z$  de  $G$  foi obtido utilizando a equação:

$$GZ = GZ_0 - KG \cdot \text{sen}\theta \quad (15)$$

O braço de momento restaurador para a força  $F$  foi obtido usando a seguinte equação:

$$d = (KG - z_T) \cdot \text{sen}\theta + y_T \cdot \text{cos}\theta \quad (16)$$

Foi assumido um valor arbitrário de  $KG = 1,53$  m, para  $y_T = 5,5$  m e  $z_T = 2,2$  m como as coordenadas do ponto T. Então, substituindo esses valores em (16), obtém-se,

$$d = 2,17 \text{ m}$$

Nota-se que o valor  $d$  é constante para todos os deslocamentos relativos ao ângulo de inclinação de 60 graus.

**Tabela 2 - Amostra de interpolação das curvas cruzadas para um ângulo de inclinação de 60 graus ( $y_t = 5,5$  m;  $z_t = 2,2$  m).**

D From CC ( t )	GZ <sub>0</sub> From CC ( m )	GZ Eq.(11) ( m )	F <sub>M</sub> Eq.(7) ( t )	F <sub>V</sub> Eq.(8) ( t )	ΔF Eq.(10) ( t )
0.30	2.29	0.96	0.13	41.76	-41.63
1.22	2.31	0.98	0.55	40.84	-40.29
2.78	2.32	0.99	1.27	39.28	-38.01
4.99	2.34	1.01	2.33	37.07	-34.74
7.86	2.35	1.02	3.71	34.20	-30.49
11.38	2.37	1.04	5.48	30.68	-25.20
15.57	2.38	1.05	7.57	26.49	-18.92
20.45	2.40	1.07	10.13	21.61	-11.48
26.01	2.41	1.08	13.01	16.05	-3.04
32.27	2.42	1.09	16.29	9.79	6.50
39.22	2.44	1.11	20.15	2.84	17.31
46.85	2.45	1.12	24.29	-4.79	29.08
55.19	2.47	1.14	29.12	-13.13	42.25
64.23	2.48	1.15	34.19	-22.17	56.36
73.98	2.49	1.16	39.72	-31.92	71.64

**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

Analisando a coluna para  $\Delta F$  na Tabela 2 pode-se observar que com um aumento do deslocamento, esse parâmetro também aumenta positivamente. Nas linhas em destaque, entre os deslocamentos de 26,01 t e 32,27 t, o sinal de  $\Delta F$  muda de negativo para positivo, o que significa que a curva que descreve o parâmetro passou pelo valor zero no intervalo de -3,04 t e 6,50 t.

Portanto se  $\Delta F$  é zero,  $F_M$  e  $F_V$  são iguais e pode-se interpolar os valores para  $E_T$  e  $GZ_t$ . A interpolação linear pode ser usada.

Os valores interpolados na Tabela 2 para  $E_T$  e  $GZ_T$  foram:

$$E_T = 28,00 \text{ t}; GZ_T = 1,08 \text{ m}$$

Da mesma maneira, os valores de  $F_M$  e  $F_V$  foram interpolados:

$$F_M = 14,06 \text{ t}; F_V = 14,06 \text{ t}$$

Importante notar que eles são exatamente iguais, concordando com a equação (9):

$$F = F_M = F_V = 14,06 \text{ t}$$

Para uma checagem adicional da coerência dos dados, pode-se rearranjar a equação (6) para obter exatamente o mesmo peso  $W$  do casco:

$$W = F + E_T$$

$$W = 14,06 + 28,00 = 42,06 \text{ t}$$

#### 4.4.3. Análise da Força de Virada $F$

Repetindo o processo para cada ângulo desejado, a Tabela 3 foi gerada. Agora pode-se analisar com uma maior precisão para a faixa onde  $F$  se torna negativo, entre os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$ .

**Tabela 3 - Parâmetros de virada para diferentes ângulos de inclinação ( $y_t = 5,5 \text{ m}$ ;  $z_t = 2,2 \text{ m}$ ).**

$\theta$ (deg.)	$E_T$ ( t )	$GZ_T$ ( m )	$d$ ( m )	$F$ ( t )
0	0	0	5.50	0
10	26.03	3.28	5.30	16.03
20	25.72	3.14	4.94	16.34
30	25.85	2.78	4.43	16.21
40	26.23	2.28	3.78	15.83
50	26.87	1.71	3.02	15.19
60	28.00	1.08	2.17	14.06
70	30.62	0.47	1.25	11.44
75	33.97	0.18	0.78	8.09
79	41.03	0.01	0.39	1.03
80	44.92	-0.02	0.30	-2.86
81	44.51	-0.08	1.38	-2.45
82	46.47	-0.12	1.29	-4.41
83	48.70	-0.17	1.20	-6.64
84	4.50	-0.77	-0.09	37.56
85	8.72	-0.73	-0.19	33.34
90	18.42	-0.74	-0.57	23.64

**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

O passo adotado de 10 graus foi utilizado na Tabela 3. Mas agora, ao aproximar-se do ângulo de virada os resultados são refinados para um passo igual a 1 grau. Nas linhas em destaque nota-se que  $F$  se torna negativo de 80 a 83 graus. Esses valores são  $\theta_1$  e  $\theta_2$  respectivamente.

Nota-se que  $F$  cai para um valor mais baixo em 79 graus, perto do ângulo de virada, e como ele pula de um valor negativo para um valor alto e positivo após atingir  $\theta_2$ , como na Figura 18.

Outro resultado importante é o valor máximo de  $F_{\max}$  para a força  $F$ , e o ângulo de inclinação  $\theta_{\max}$  em que ela ocorre. Analisando as duas últimas colunas da Tabela 3, pode-se observar que a força máxima é igual a 16,34 t em um ângulo de inclinação de 20 graus.

Os resultados obtidos nas Tabelas 2 e 3 foram avaliados para uma posição específica do ponto T de aplicação da força, representado pelas coordenadas  $y_t$  e  $z_t$ . Uma pequena mudança nas coordenadas pode gerar grandes mudanças nos resultados finais.

A Tabela 4 mostra uma análise onde apenas a coordenada  $z_t$  muda, mantendo o mesmo valor para  $y_t$ . Pode-se observar em qual faixa  $\Delta\theta$  é relativamente grande e onde a virada não é realizada corretamente.

**Tabela 4 - Faixa de  $\theta$  e comparação de  $F_{\max}$  para diferentes valores de  $z_t$ .**

$Z_T$ ( m )	$\theta_1$ (deg.)	$\theta_2$ (deg.)	$\Delta\theta$ (deg.)	$F_{\max}$ ( t )	$\theta_{\max}$ (deg.)
1.0	80	95	15	15.70	15
1.2	80	93	13	15.79	15
1.4	80	91	11	15.89	15
1.6	80	89	9	15.99	15
1.8	80	87	7	16.09	15
2.0	80	85	5	16.20	20
2.2	80	83	3	16.34	20
2.4	80	81	1	16.50	25
2.6	79	79	0	16.69	25
2.8	79	79	0	16.94	30
3.0	No Turnover			28.96	75
3.2	No Turnover			35.69	73

**FONTE: Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.**

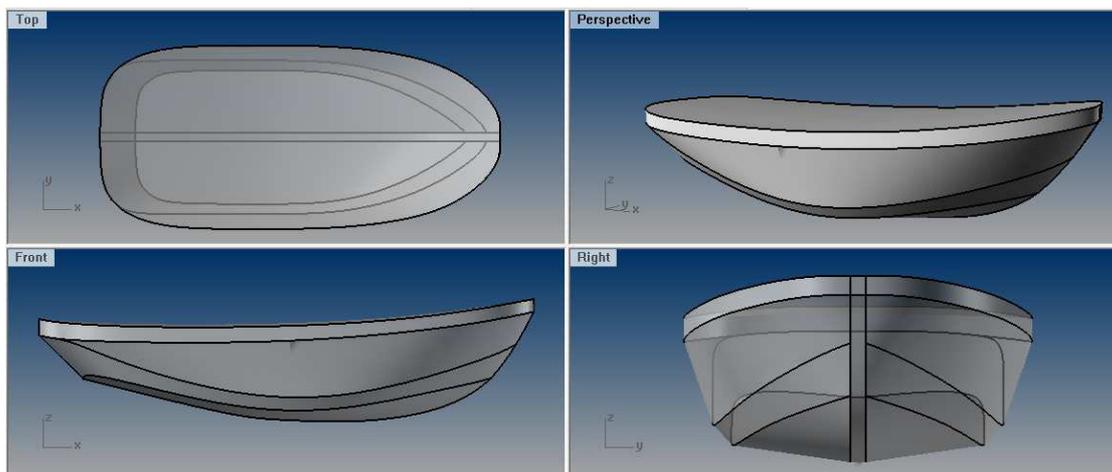
No estudo de caso apresentado a seguir, o software escolhido retorna todos os parâmetros até então citados, sem a necessidade de fazer manualmente a interpolação das curvas cruzadas de estabilidade para cada ângulo de inclinação e, uma vez que o foco do estudo é descobrir quais parâmetros para a ocorrência da virada, focou-se em achar apenas o ângulo e o esforço necessário para tal.

## 5. ESTUDO DE CASO

O casco de um Rebocador de 60 t de Bollard Pull está em construção pelo método emborcado no estaleiro INACE. Quando concluído, o casco emborcado será levado pelos trilhos ao elevador sincrolift, desembocando na água. A necessidade de um estudo da virada desse casco é necessária para avaliar a viabilidade do método.

O estrutural do casco a ser virado inclui: quilha, cavernas, estruturas internas, chapeamento de costado e do convés principal. Um modelo da estrutura a ser virada foi projetado no software de desenho Rhinoceros 4.0. O projeto do casco foi criado, com a representação volumétrica de todos os elementos antes mencionados, que deverão compor o casco real, como na Figura 20.

**Figura 20 - Modelo do Casco no Rhinoceros 4.0**



**FONTE: AUTORA.**

O modelo da embarcação foi então emborcado no Rhinoceros (para a simulação de casco emborcado na água) e a origem xyz foi colocada no ponto mais abaixo do casco emborcado e à meia nau do modelo. A linha de base então ficou invertida, não mais no ponto mais abaixo do casco (na quilha), mas perpendicular ao chapeamento do convés principal da embarcação.

Antes do início da construção da embarcação, um levantamento de dados do peso e das coordenadas do centro de gravidade do casco foi realizado para o projeto: o LCG (longitudinal, positivo a vante), o TCG (transversal, positivo a bombordo) e o VCG (vertical e positivo acima da linha de base):

**Tabela 5 - Dados de Peso e Centro de Gravidade do Casco 604.**

<b>Peso (t)</b>	<b>LCG (m)</b>	<b>TCG (m)</b>	<b>VCG (m)</b>
125,00	-0,256	-0,017	3,231

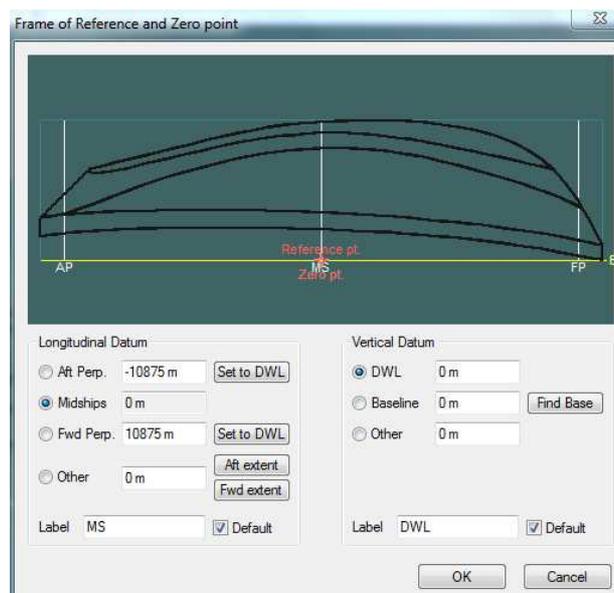
**FONTE: AUTORA.**

Os dados da Tabela 5 foram obtidos através do programa Ship Constructor. O software de construção naval simula as estruturas da embarcação, com o usuário inserindo os componentes e materiais utilizados e tem uma função que retorna as coordenadas do centro de gravidade e peso total equivalente das estruturas.

O modelo do Rhinoceros foi então importado para o software Maxsurf, para a definição da localização da Perpendicular de Vante e Perpendicular de Ré, que são as linhas verticais que passam pela linha de centro com a linha d'água. Essa determinação é necessária para a introdução do modelo no software de análise de estabilidade, que faz uso das coordenadas de flutuação da embarcação para gerar a simulação de acordo com o que foi projetado.

As perpendiculares de vante e de ré têm coordenadas definidas pelo projeto da embarcação. A seção a meia-nau é a origem e, de acordo com o projeto, a perpendicular de vante fica a 10,875 m da origem e a perpendicular de ré a -10,875 m, como mostrado na Figura 21.

**Figura 21 - Interface do Software Maxsurf para definição das Perpendiculares de Vante (FP) e Ré (AP).**

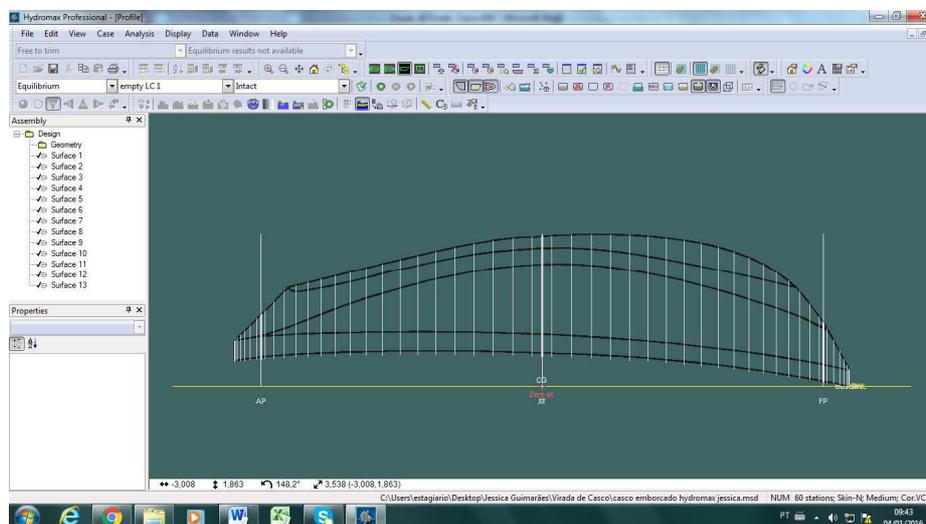


**FONTE: AUTORA.**

Com as perpendiculares definidas, o modelo pôde então ser importado no software de análise de estabilidade. O software de análise hidrodinâmica de

embarcações utilizado foi o Hydromax, que é uma extensão do software Maxsurf (Figura 22).

**Figura 22 - Interface inicial do Software Hydromax, com o modelo embarcado.**



**FONTE: AUTORA.**

O software Hydromax permite a análise de uma grande variedade de características de estabilidade hidrostática: análise de equilíbrio; análise de uma condição específica; gera as curvas de estabilidade estática e curvas cruzadas de estabilidade; relaciona força, condição e estabilidade; dentre vários outros modos de análise. Nesse estudo, será feito o uso dos valores das curvas cruzadas de estabilidade gerados pelo software.

Para o estudo da virada do Rebocador de 60t de Bollard Pull em construção no estaleiro, três estudos de casos de carregamento foram analisados:

- Casco embarcado flutuando na água sem forças atuantes nele (1),
- Casco embarcado flutuando na água com uma força aplicada (2),
- Casco embarcado flutuando na água com duas forças aplicadas nas cavernas 5 e 28 (3).

### **5.1 Caso 1 – Casco embarcado flutuando em equilíbrio na água**

O Caso 1 simula a embarcação de cabeça para baixo, flutuando estaticamente, sem influência de qualquer força além do empuxo atuante e o peso do modelo. Esse estudo de caso teve como objetivo um melhor entendimento da utilização do software e a visualização da condição inicial da embarcação quando levada à água, antes de ser virada.

Para o primeiro caso, o casco embarcado flutuando em equilíbrio sem a presença de forças atuantes, uma loadcase (estudo de caso) foi criada para a inserção dos dados do Caso 1. Nessa loadcase, os parâmetros como o LCG, TCG, VCG e peso total do casco foram inseridos (Figura 23).

**Figura 23 - Parâmetros para o Caso 1, casco embarcado flutuando na água sem forças externas atuantes.**

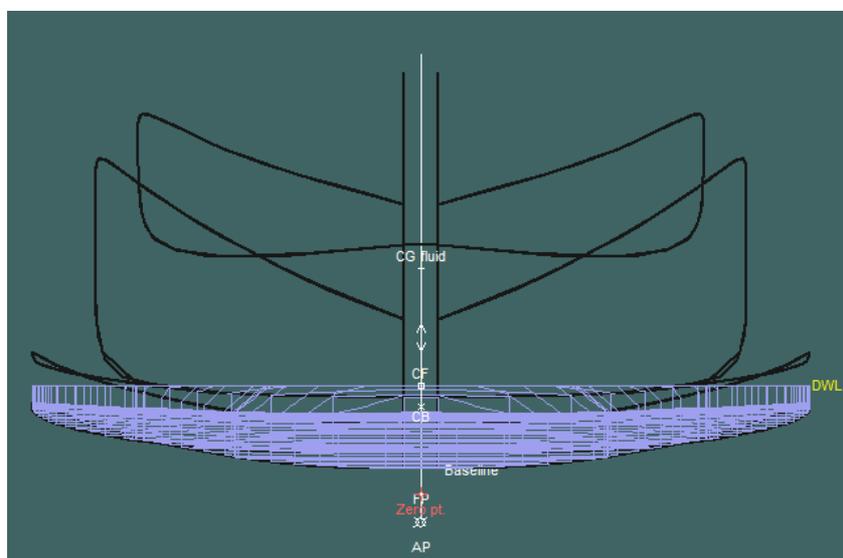
	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m <sup>3</sup>	Total Volume m <sup>3</sup>	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	<b>125,000</b>	125,000			-0,256	0,000	3,231	0,000	User Specified
2	<b>Total Loadca</b>			125,000	0,000	0,000	-0,256	0,000	3,231	0,000	
3	<b>FS correction</b>								0,000		
4	<b>VCG fluid</b>								3,231		

**FONTE: AUTORA.**

A primeira linha da loadcase refere-se ao peso leve da embarcação e comporta o peso (em toneladas) e as coordenadas do centro de gravidade da embarcação (em metros). Foram então utilizados os dados do centro de gravidade de projeto, obtidos pelo software Ship Constructor (Figura 18). Os dados em negrito na Figura 23 representam os números retornados pelo software Hydromax depois de inseridos os dados na primeira linha.

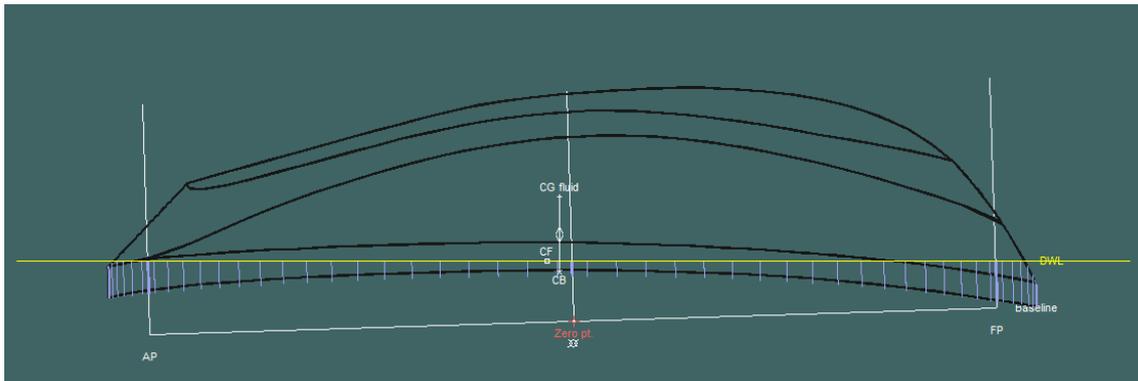
Para uma análise visual do Caso 1, a função EQUILIBRIUM do Hydromax foi selecionada e a simulação foi rodada (Figuras 24 e 25).

**Figura 24 - Simulação do casco embarcado flutuando na água – Vista frontal.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 25 - Simulação do casco emborcado flutuando na água - Vista lateral.**



**FONTE: AUTORA.**

Observa-se nas Figuras 24 e 25 a localização do CG do modelo, a localização do centro de carena CB, a linha d'água (DWL), a linha de base (Baseline), bem como as perpendiculares de Vante (FP) e de Ré (AP). Observa-se também que uma parte da embarcação encontra-se submersa, que flutua devido à força de empuxo.

## **5.2 Caso 2 – Casco emborcado flutuando na água com uma força atuante**

O Caso 2 simula a embarcação emborcada, flutuando na água e sofrendo a ação de uma força externa, que tem direção vertical ascendente e é inserida para simular a ação do guindaste que iria auxiliar a virada aplicando a força no anel de montagem. Essa Loadcase é fundamental para esse estudo, pois com ela pode-se descobrir qual a força necessária que o guindaste deve aplicar para que a virada ocorra.

Para o segundo caso, casco emborcado flutuando na água com uma força ascendente atuando, uma nova Loadcase foi criada, com os mesmos parâmetros anteriores do barco (LCG, TCG, VCG e peso) para a primeira linha. Uma segunda linha foi inserida, relacionada à força ascendente aplicada e com as coordenadas do ponto de aplicação dela, no caso, a localização do anel de montagem.

As coordenadas escolhidas para o ponto de aplicação da força foram: longitudinalmente na mesma coordenada do CG ( $LCG = -0,256$  m), transversalmente na extremidade onde a boca do barco é máxima (-5,5 m); e verticalmente a 1,3 m. Considerando que a força de aplicação tem sentido contrário ao peso da embarcação, para um melhor entendimento, é como se

estivesse retirando peso daquele ponto, vide o sinal negativo na coluna *Quantity* para a força.

**Figura 26 - Loadcase base para o Caso 2, casco emborcado flutuando na água com ação de força externa.**

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	125,000	125,000			-0,256	0,000	3,231	0,000	User Specified
2	Applied Force	-1	0,000	0,000			-0,256	-5,500	1,300	0,000	User Specified
3	Total Loadca			?	?	?	?	?	?	?	
4	FS correction								?		
5	VCG fluid								?		

**FONTE: AUTORA.**

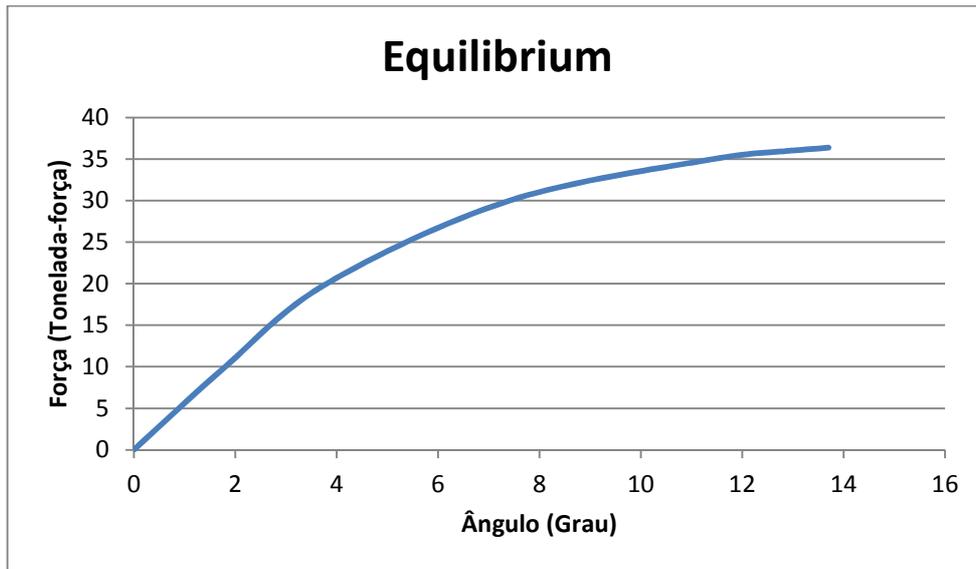
O foco do estudo do segundo caso é descobrir qual a força aplicada necessária com a qual o casco vira. A função Equilibrium foi selecionada e várias simulações foram realizadas para diferentes valores de força aplicada e, para cada um desses valores, o software retornou o grau de inclinação do CG do casco. A Tabela 6 contém os valores dos ângulos obtidos para cada simulação de força aplicada, a Figura 23 mostra o gráfico da função Equilibrium para os resultados obtidos.

**Tabela 6 - Tabela Força aplicada e Grau de inclinação do CG correspondente encontrado.**

Função "Equilibrium"	
Força (Tonelada-Força)	Grau de inclinação do CG (°)
0	0
10	1,8
20	3,8
30	7,4
35	11,4
36	12,9
36,1	13,1
36,2	13,3
36,3	13,5
36,4	13,7
36,5	156,5

**FONTE: AUTORA.**

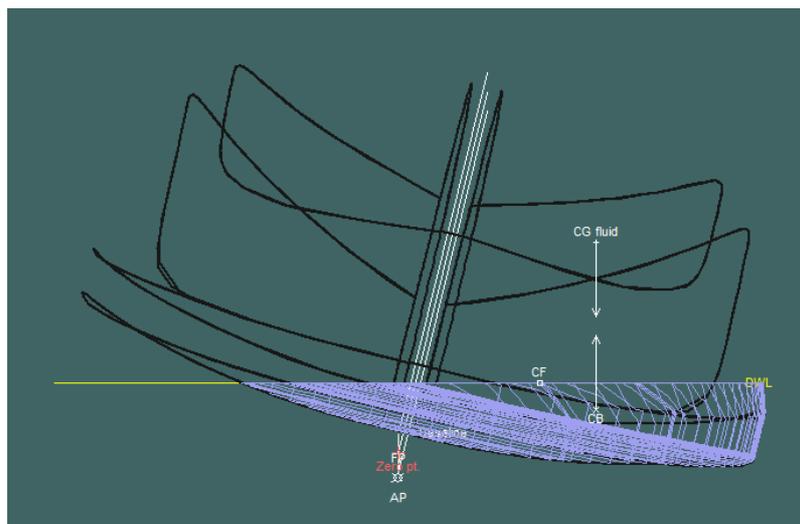
**Figura 27 - Gráfico Força x Grau de Inclinação do casco.**



**FONTE: AUTORA.**

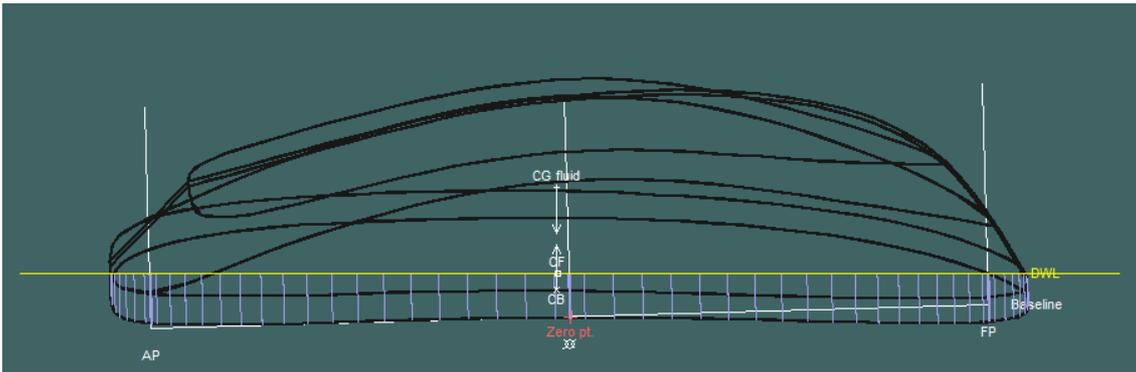
Após várias tentativas, observou-se que ao aplicar uma força de 36,5 toneladas, o ângulo de inclinação aumentou subitamente, o que significa que o casco virou. As Figuras 28 e 29 mostram o resultado da simulação para uma força aplicada de 36,4 toneladas, o casco encontra-se na iminência de virar. O braço do momento restaurador é nulo para essa força aplicada e, qualquer perturbação faz a virada ocorrer. Conclui-se que essa é a força mínima necessária para a virada do casco. As figuras 30 e 31 mostram a simulação para a força aplicada de 36,5 toneladas, onde se pode ver que o casco encontra emborcado.

**Figura 28 - Simulação com força aplicada de 36,4 t – Vista Frontal.**



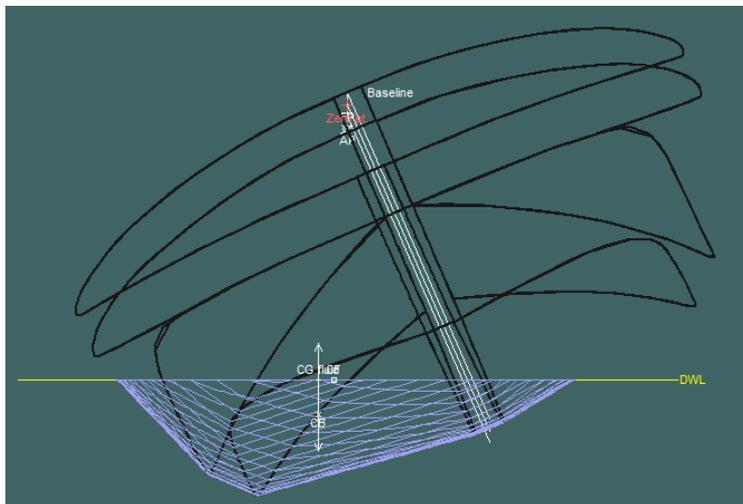
**FONTE: AUTORA.**

**Figura 29 - Simulação com força aplicada de 36,4 t – Vista Lateral.**



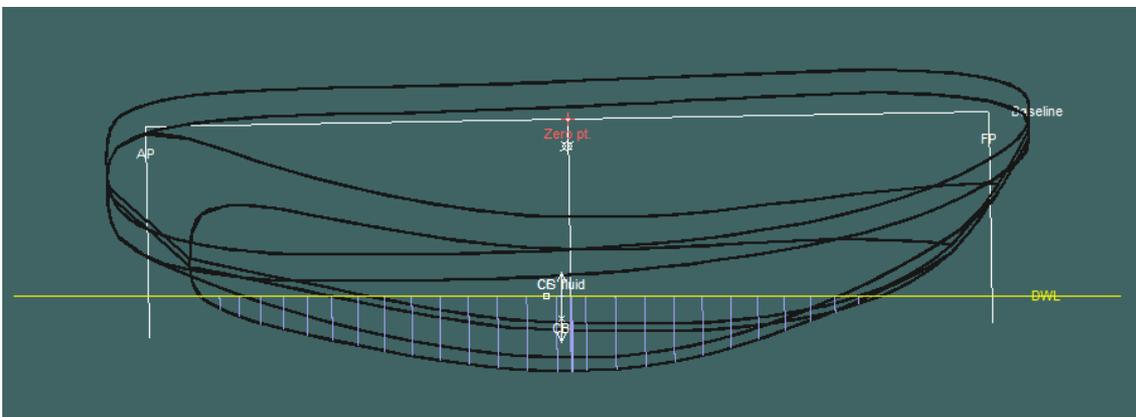
**FONTE: AUTORA.**

**Figura 30 - Simulação com força aplicada de 36,5 t, ocorreu a virada – Vista Frontal.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 31 - Simulação com força aplicada de 36,5 t, ocorreu a virada – Vista Lateral.**



**FONTE: AUTORA.**

Para a confirmação dos resultados obtidos pela aplicação da força de 36,4 toneladas, a Loadcase da Figura 32 foi analisada com a função Large Angle Stability, que faz a análise de grau em grau e retorna os resultados, fazendo uso das CEE's do casco, geradas pelo software. A Tabela 7 contém os dados obtidos da simulação e o gráfico Braço de Momento x Ângulo de Inclinação foi gerado para observar o comportamento do casco (Figura 33).

**Figura 32 - Loadcase para uma força atuante de 36,4 toneladas.**

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m <sup>3</sup>	Total Volume m <sup>3</sup>	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	125,000	125,000			-0,256	0,000	3,231	0,000	User Specified
2	Applied Force	-1	36,400	-36,400			-0,256	-5,500	1,300	0,000	User Specified
3	<b>Total Loadca</b>			88,600	0,000	0,000	-0,256	2,260	4,024	0,000	
4	FS correction								0,000		
5	VCG fluid								4,024		

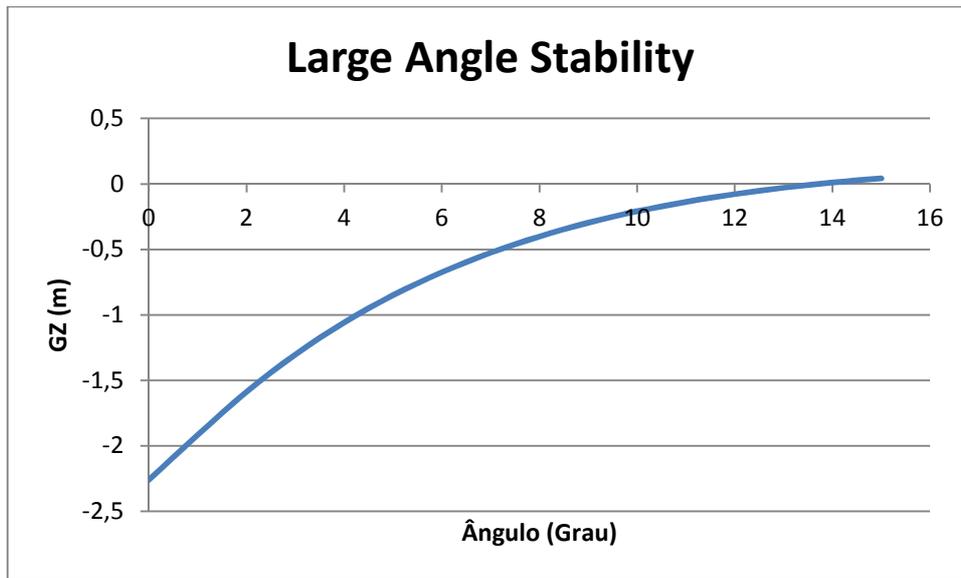
**FONTE: AUTORA.**

**Tabela 7- Dados obtidos pela função Large Angle stability para ângulo de inclinação e braço de momento restaurador GZ.**

<b>Função "Large Angle Stability"</b>	
<b>Braço de Momento GZ (m)</b>	<b>Grau de Inclinação do CG</b>
-2,26	0
-1,916	1
-1,587	2
-1,302	3
-1,058	4
-0,85	5
-0,674	6
-0,525	7
-0,401	8
-0,296	9
-0,209	10
-0,137	11
-0,078	12
-0,029	13
0,011	14
0,042	15

**FONTE: AUTORA.**

**Figura 33 - Gráfico Braço de Momento restaurador (GZ) x Ângulo de Inclinação.**



**FONTE: AUTORA.**

Observa-se que GZ, o braço de momento restaurador, passa pelo zero entre 13 e 14 graus, confirmando os resultados obtidos pela função Equilibrium. Então é razoável assumir 36,4 toneladas como a força mínima necessária para a virada, ou seja, a força que o guindaste deve exercer.

Aplicar uma força de 36,4 toneladas com as coordenadas de aplicação escolhidas é possível, mas não viável. Um guindaste para essa operação teria de ser alugado, uma vez que o estaleiro não disponibiliza de um guindaste tão potente. O aluguel de maquinário tão pesado é extremamente oneroso, o que se torna um empecilho para viradas de cascos dessa magnitude. Por esse motivo faz-se necessária uma solução alternativa.

### **5.3 Caso 3 – Casco emborcado flutuando na água com duas forças atuantes (Cavernas 5 e 28)**

Apesar de o estaleiro INACE não disponibilizar do equipamento requerido para o caso 2, há dois guindastes menores, cuja carga máxima de operação é de 20 toneladas cada. Dessa maneira uma alternativa pode ser estudada: a de utilizar dois guindastes de maneira que a carga seja dividida.

Esse estudo de caso visa à possibilidade de uma virada de casco com o auxílio de dois guindastes, cada um em um ponto de aplicação diferente. Para isso, uma nova Loadcase foi criada, com duas linhas a mais, cada uma

representando a força a ser aplicada com suas respectivas coordenadas de aplicação.

As coordenadas escolhidas para as forças encontram-se na Loadcase da Figura 34. As coordenadas longitudinais das forças aplicadas 1 e 2 coincidem com as cavernas 5 e 28 respectivamente. Essa escolha tem o objetivo de aplicar as forças em parte mais resistente do barco e essas cavernas são quase completamente fechadas, apenas com aberturas de passagem, o que ajuda a diminuir a concentração de tensões na estrutura à medida que o casco é içado. As coordenadas transversais são exatamente a metade da boca da embarcação nessas determinadas cavernas, medidas a partir da linha de centro. As coordenadas verticais foram escolhidas como sendo a distância da linha de base para o convés principal.

**Figura 34 - Loadcase base para Caso 3 com duas forças atuantes nas Cavernas 5 e 28 respectivamente.**

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m <sup>3</sup>	Total Volume m <sup>3</sup>	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	125,000	125,000			-0,510	0,000	3,165	0,000	User Specified
2	Caverna 5	-1	0,000	0,000			-9,075	-5,000	1,264	0,000	User Specified
3	Caverna 28	-1	0,000	0,000			3,575	-5,293	1,133	0,000	User Specified
4	<b>Total Loadcase</b>			?	?	?	?	?	?	?	
5	FS correction								?		
6	VCG fluid								?		

**FONTE: AUTORA.**

Utilizando o mesmo método de tentativas e simulações com o Hydromax, a Tabela 8 foi obtida, mostrando cada configuração de força aplicada e o respectivo ângulo de inclinação do CG.

**Tabela 8 - Tabela Força aplicada e Grau de inclinação do CG correspondente encontrado.**

<b>Equilibrium</b>		
<b>Força no olhal da Cav. 5 (Toneladas)</b>	<b>Força no olhal da Cav. 28 (Toneladas)</b>	<b>Grau de inclinação do CG (°)</b>
18,2	18,2	11,3
18,4	18,4	11,8
18,6	18,6	12,5
18,8	18,8	13,2
18,8	18,9	13,9
18,9	18,8	13,4
18,9	18,9	13,7
18,9	19	13,9
19	18,9	13,9
19	19	155,4

**FONTE: AUTORA.**

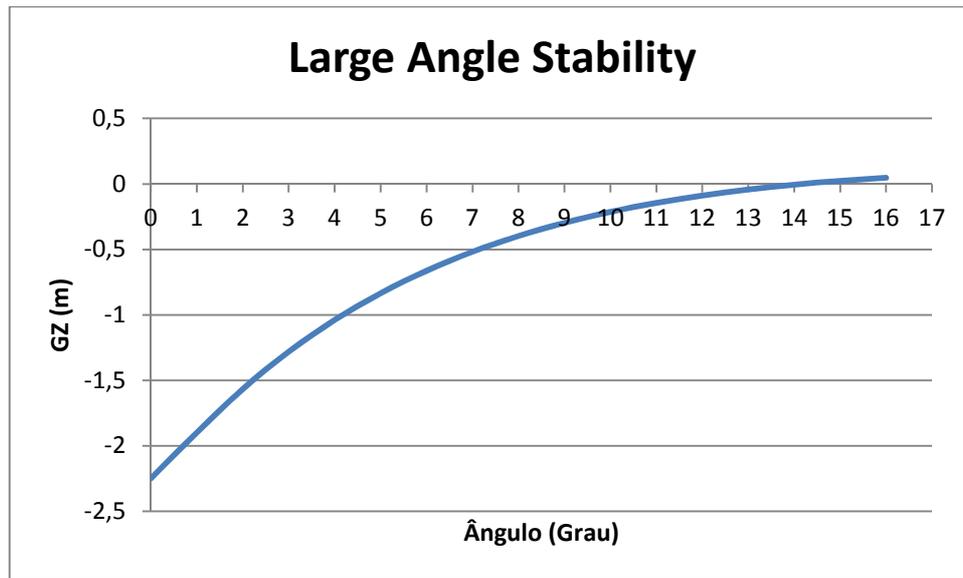
Observa-se que para o Caso 3, a virada ocorre quando há a aplicação de uma força de 19 t em cada anel de virada, com um ângulo de inclinação do CG em torno de 14°. Para a confirmação dos resultados, a função Large Angle Stability também foi analisada. A Tabela 9 foi obtida com os dados das simulações.

**Tabela 9 - Dados obtidos pela função Large Angle stability para ângulo de inclinação e braço de momento restaurador GZ.**

<b>Large Angle Stability</b>	
<b>Braço de Momento GZ (m)</b>	<b>Grau de inclinação do CG (°)</b>
-2,248	0
-1,898	1
-1,566	2
-1,281	3
-1,039	4
-0,835	5
-0,663	6
-0,518	7
-0,397	8
-0,297	9
-0,213	10
-0,145	11
-0,088	12
-0,042	13
-0,005	14
0,024	15
0,047	16

**FONTE: AUTORA.**

**Figura 35 - Gráfico Braço de Momento restaurador (GZ) x Ângulo de Inclinação.**



**FONTE: AUTORA.**

Do gráfico da Figura 35 é possível observar que o braço de momento GZ passa pelo zero (quando ele está na iminência de virar) em um ângulo de inclinação de aproximadamente 14°, o que é coerente com os dados obtidos pela função Equilibrium.

Os valores de magnitude da força aplicada aos anéis de virada de 19 t são coerentes e viáveis, tornando possível uma virada com os pontos de aplicação de força nas cavernas 5 e 28, de maneira que os guindastes do estaleiro podem ser utilizados sem o custo adicional de aluguel de maquinário.

## 6. FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO E SIMULAÇÃO DA VIRADA

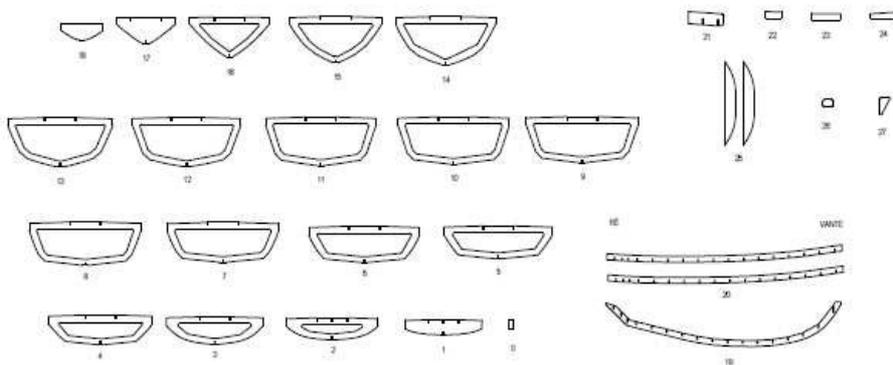
Para uma simulação de virada com os parâmetros encontrados, um protótipo correspondente ao casco do rebocador na proporção de 1:15 foi fabricado, com quilha, anteparas, chapeamento do costado e do convés principal, representando também o peso e estrutura correspondente ao casco em tamanho real. O peso do protótipo foi estimado para uma escala de 1:15, dividindo o peso do real pela escala no plano volumétrico:

Peso do casco real =  $P_r = 125000 \text{ kg}$

Peso do protótipo =  $P_p = 125000 / (15^3) = 37 \text{ Kg}$

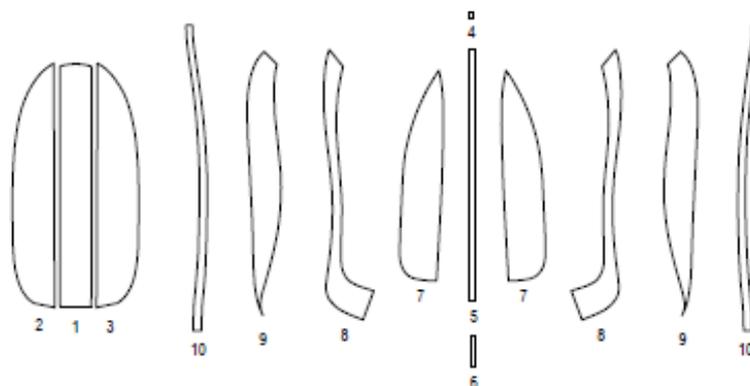
A quilha e as anteparas foram cortadas de acordo com a Figura 36 em uma chapa de alumínio de 4 mm de espessura e o chapeamento do costado e convés em uma de 2 mm, como na Figura 37. As peças foram cortadas em máquina CNC e lixadas para um melhor acabamento (Figuras 38, 39 e 40).

**Figura 36 - Peças a serem cortadas - cavernas e quilha.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 37 - Peças a serem cortadas - chapeamento do casco e convés principal.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 38 - Foto do processo de corte das peças pela máquina CNC.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 39 - Foto das peças depois de cortadas.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 40 - Foto das peças das esmerilhadas.**



**FONTE: AUTORA.**

O estrutural do protótipo foi soldado (Figura 41) e em seguida o chapeamento (Figura 42). Para um melhor acabamento do chapeamento, ele foi esmerilhado (Figura 43).

**Figura 41 - Foto do esqueleto do protótipo, com cavernas e quilha.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 42 - Foto do processo de esmerilhamento do chapeamento do casco.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 43 - Foto do modelo esmerilhado.**



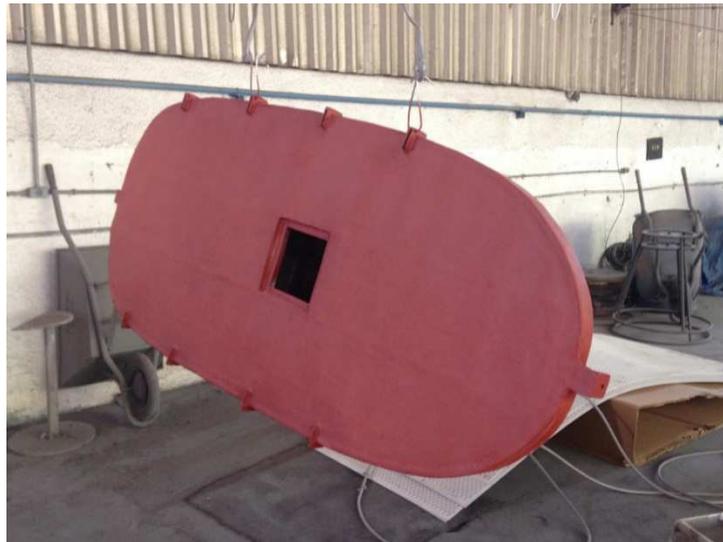
**FONTE: AUTORA.**

Uma abertura no convés principal foi feita para a necessidade de manipulação dentro do protótipo, como observa-se na Figura 44, com a finalidade de adicionar pesos e ajustar o CG para se aproximar do CG do real,

correspondendo ao da simulação computacional. As Figuras 44, 45 e 46 mostram, respectivamente, o processo de revestimento do casco.

Após o protótipo ser soldado e esmerilhado, foi aplicado um primer (Figura 44) e utilizada fibra de vidro para impermeabilizar o modelo (Figura 45), pois a solda apresentava falhas e na ocorrência de entrada de água, o modelo afundaria.

**Figura 44 - Foto do modelo na estação de secagem, após a utilização do primer para aplicação de fibra de vidro.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 45 - Foto do processo de aplicação de fibra de vidro.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 46 - Foto do modelo pintado após a aplicação da fibra de vidro.**



**FONTE: AUTORA.**

Pequenas estruturas representando os anéis de virada foram soldados nas coordenadas correspondentes às cavernas 5 e 28, bem como algumas outras cavernas, como se observa na Figura 46. Essas estruturas também existirão no casco real, que serão soldadas com reforços internos para suportar os esforços adquiridos durante o processo de virada, substituindo os anéis de virada.

Um pequeno teste de flutuabilidade foi realizado (Figura 47) para ver se havia falhas no casco que permitissem a entrada de água, o que afetaria os testes, uma vez que o real será selado para impedir a entrada de água.

**Figura 47 - Foto do teste de flutuabilidade do modelo.**



**FONTE: AUTORA.**

O CG do protótipo foi descoberto por meio de testes de equilíbrio simples, apoiando o modelo com um suporte, de peso e CG conhecidos (para

depois ser descontado dos cálculos do CG do protótipo), em cima de uma mesa e o levando até a borda para ver o ponto de desequilíbrio no qual o conjunto tendia a descolar da mesa, indicando que o CG do conjunto não mais estava apoiado (Figura 48).

**Figura 48 - Foto do processo de análise do CG do protótipo.**



**FONTE: AUTORA.**

O ajuste do CG foi feito com a inserção de retalhos de chapa e a abertura no topo foi selada. O protótipo foi então pesado com o auxílio de duas balanças de malas e cordas de amarração, como na Figura 49.

**Figura 49 - Foto da pesagem do protótipo.**



**FONTE: AUTORA.**

Dois dispositivos foram construídos para representar os guindastes (Figura 50). Eles foram feitos de retalhos e cantoneiras soldadas, com um sistema de polias e catraca. Os dispositivos foram equipados com balanças de mala convencionais, a fim de obter os esforços atuantes em cada ângulo de inclinação dos testes do protótipo.

**Figura 50 - Foto do protótipo com os dois dispositivos representativos dos guindastes.**



**FONTE: AUTORA.**

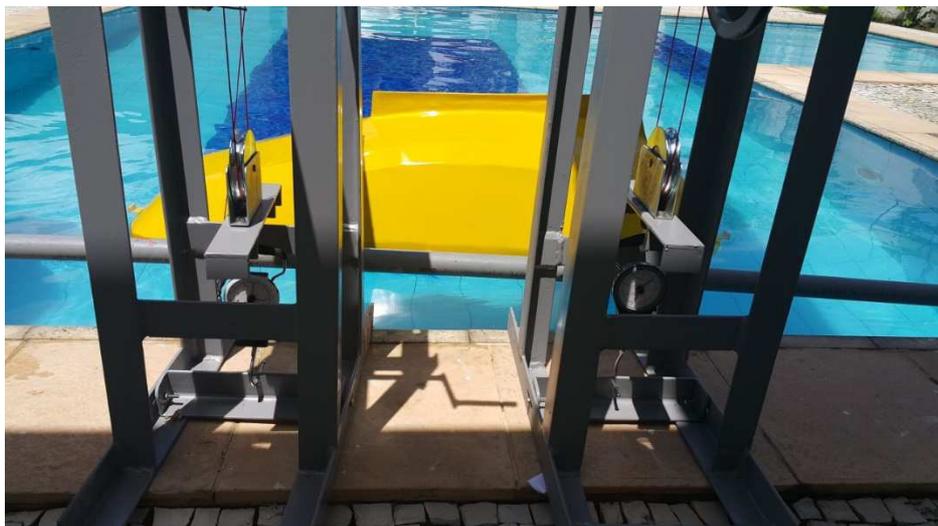
Os acabamentos como pintura e detalhamento foram finalizados e vários testes de virada de casco emborcado foram realizados com o protótipo e os dispositivos de guindastes. As medições obtidas nas balanças de mala foram coerentes com os dados obtidos do Hydromax para as duas forças necessárias à virada.

**Figura 51 - Foto do protótipo flutuando emborcado, com marcações em lugares estratégicos para leitura de calado.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 52 - Foto dos dispositivos de guindastes quando içando o protótipo.**



**FONTE: AUTORA.**

**Figura 53 - Foto do teste de virada do protótipo.**



**FONTE: AUTORA.**

As Figuras 51, 52 e 53 mostram as condições dos testes no dia, ensolarado e com ventos fortes, que algumas vezes influenciavam nos testes de virada. As linhas vermelhas representam os cabos de içamento dos guindastes e o tubo de PVC, pendurado nas estruturas que representam os guindastes (Figura 53), representa o cais do estaleiro, com a finalidade de saber se o casco poderia colidir com este.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelo software de análise hidrodinâmica Hydromax forneceram parâmetros para a ocorrência da virada. As duas forças de içamento de 19 toneladas aplicadas às coordenadas selecionadas (da parte mais externa da boca das cavernas 5 e 28), mostraram-se viáveis para a virada do casco.

O protótipo construído com a finalidade de representar fielmente o real, construído em escala de 1:15 e utilizado em diversos testes, apresentou resultados de parâmetros para sua virada semelhantes aos obtidos pelo software para o real, apresentando coerência com os cálculos de escala para sua fabricação.

Diante dos resultados obtidos pelo Estudo da Virada de Casco, pode-se afirmar que os guindastes presentes no estaleiro podem ser usados para auxiliar a virada, sem a necessidade de alugar um guindaste maior e consequentemente diminuindo os gastos do estaleiro com o processo de construção.

## 8. REFERÊNCIAS

- Antônio Gil. F. Bezerra; Antonio Paulo P. Bastos; Aurélio G. Girão; Marcio F. Igreja - Application of the Hull Turnover Afloat as a Shipbuilding Tool.
- Mecânica do Navio – Estática
- Lewis, E. V., Ed. 1988 Principles of Naval Architecture. Vol. I, Stability and Strength.
- The Society of Naval Architects and Marine Engineers - Displacement and Weight Relationships.
- ARTE NAVAL- Volume 1 - Caps 1 e 2.
- Hydromax Manual
- Marcelo Ramos Martins, Hidrostática e estabilidade – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica – EPUSP, 2010.