

2

Projeto de Estruturas Flutuantes

Geralmente a fase de modelagem de um projeto de uma estrutura flutuante faz uso de diversas ferramentas computacionais. Estas ferramentas auxiliam na criação do modelo geométrico, na análise estrutural (análises estáticas e dinâmicas), no planejamento de processos, na tomada decisão, e até no gerenciamento do fluxo de informações inerentes ao processo de projeto.

Todos estes passos são iterativos, pois necessariamente ao longo do processo como um todo existem fases que requerem que certos estágios a serem reavaliados até se obter a forma do modelo final que satisfaz todas as condições impostas pelo projetista. Desta forma uma automatização de alguns estágios (espiral de projeto) a serem reavaliados é necessário.

Para cada etapa do projeto, existem diferentes ferramentas disponíveis, destacando-se as utilizadas para o desenho, análise e manufatura. Esses sistemas, denominados CAx (*Computer Aided "x"*), devem estar integrados entre si.

Em sistemas CAD, o tratamento mais usual de modelagem é o *Parametric Feature Based Modeling* [Shah95] que têm duas linhas principais: Modelagem baseada em *features* (*Feature Based Modeling*) e Modelagem Paramétrica (*Parametric Modeling*).

Modelagem baseada em *features* (*Feature Based Modeling*) trabalha com combinações de objetos e operadores, e tem sido considerada como um novo paradigma para integração das atividades de engenharia, desde o projeto até a manufatura. Assim o conceito de *features* tem sido usado em uma ampla gama de aplicações como projeto de peças e montagem, projeto para manufatura, planejamento de processo e inúmeras outras aplicações.

Modelagem Paramétrica (*Parametric Modeling*) baseia-se diretamente nos atributos das *features*. A modelagem paramétrica permite a geração de modelos com dimensões variáveis, permitindo a regeneração automática do modelo após cada modificação. As dimensões podem estar relacionadas através de expressões.

Atualmente, *features* são entendidas como sendo elementos geométricos básicos, tais como: pontos, linhas, arcos, planos e superfícies, os quais, quando

reunidos darão origem as *features* compostas.

Uma linha ainda mais recente é o *Constraint-Based Modeling*, o qual baseia-se na satisfação local de restrições para um determinado modelo. Nesta abordagem, é utilizado um grafo orientado representando o problema de restrição. Nesta técnica, os nós do grafo são as entidades geométricas e os arcos são as restrições impostas sobre estas entidades. A satisfação das restrições é feita através de uma técnica conhecida por propagação global, onde o sistema percorre o grafo satisfazendo todas as restrições existentes. Outra técnica para satisfazer as restrições impostas no modelo é conhecida por propagação local, onde o sistema vai satisfazendo as restrições à medida em que estas surgem. Desta forma, as restrições geométricas são automaticamente reconhecidas através de manipulação direta com o ambiente virtual.

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para o modelagem paramétrica de forma a integrar a fase de modelagem com as fases de análise estática e dinâmica no projeto de estruturas flutuantes. Salienta-se que é possível sintetizar a geometria de um modelo em um conjunto de comandos. Estes comandos podem ser parametrizados para reger o modelo obtendo uma nova geometria.

2.1

Processo Usual de Projeto

Projetar um navio ou estrutura flutuante é um problema de alto grau de complexidade e, necessariamente, tem que ser dividido em sub-problemas. Cada sub-problema terá um estágio local de síntese, análise e avaliação. É necessário lembrar que todo o processo é iterativo, onde a definição e avaliação de um elemento poderá influenciar na definição de outros sistemas interligados ao sistema corrente.

Além disto, o custo de um projeto naval está fortemente ligado à escolha das características principais de objeto a ser modelado, sendo que a obtenção de valores ótimos destas características ou variáveis de projeto em um estágio inicial é de muito importância para poder obter um modelo ótimo de projeto.

Pode-se dizer, ainda, que o ato de projetar se assemelha a inventar e está associado à definição dos elementos relativos à representação da estrutura de um casco e à definição de uma geometria que seja a mais eficiente para a determinada função de um navio. Este processo não pode ser confundido com o processo de desenvolver uma simulação para o comportamento mecânico ou dinâmico da embarcação, porém, o objetivo final somente é alcançado combinando as duas abordagens. Isto implica tanto em desenvolver códigos computacionais como em identificar as inter-relações entre as características

utilizadas na modelagem corrente.

Atualmente no mercado profissional existem várias ferramentas que são utilizadas na elaboração de projetos de navios tanto na definição de sua geometria, como também na sua concepção do ponto de vista de sua estabilidade estática ou dinâmica. Algumas destas ferramentas são: AutoCAD [AutoCad09], FastShip [FastShip09], NavCad [NavCad09] e ShipWeight [ShipWeight09]. Pode-se dizer que algumas destas ferramentas são utilizadas na fase de síntese, e outras utilizadas para a fase de análise.

Segundo Amorim [Amorim01], o processo de projeto acontece em ciclos iterativos da definição das características e dos atributos do objeto que será projetado. Estes elementos característicos são agregados envolvendo suposições sobre os elementos ainda indefinidos, num estágio de alta abstração. Posteriormente, em estágios mais avançados do processo de projeto, as características descritivas de detalhes do objeto são definidas e é possível realizar a verificação das suposições e hipóteses formuladas nos estágios iniciais. Portanto, um sistema de modelagem bastante eficiente, completo e abrangente poderia reduzir consideravelmente vários ciclos iterativos de projeto.

Segundo Martins [Martins02], pode-se dizer também que soluções inovadoras de engenharia surgem da inconformidade do projetista. No campo naval e oceânico os cascos-conceito (*swaths*, cascos com efeito de túnel, *wave-piercers* e híbridos) são bons exemplos de projetos em que a imaginação criadora, desvinculada de padrões estabelecidos, dominou o processo.

Em contrapartida, as soluções convencionais são resultado de casos-exemplo e que constituem um referencial rico e útil que dão indicações do caminho a ser adotado (por similaridade, a ser seguido). Na solução de problemas típicos (navios graneleiros, petroleiros, porta-contentores e outras embarcações típicas da engenharia naval e oceânica) as ações disciplinadas (elementos de análise, formulações de dimensionamento e caracterização) constituem os procedimentos dominantes de projeto.

Em termos gerais existem duas classes referenciais num projeto naval e, dependendo do contexto, estes requisitam abordagens distintas que definem a extensão e domínio do projeto.

Projeto Típico Geralmente neste tipo de projeto modelos já construídos são reutilizados, onde soluções já consagradas são consideradas; modelos numérico-computacionais, estatísticas disponibilizadas pela experiência anterior, os quais permitem a construção de correlações entre as características e os atributos do projeto, sobre os quais recaem requisitos importantes do projeto paramétrico.

Projeto Atípico Este tipo de projeto exige alta criatividade na concepção de soluções freqüentemente requisitando equipes de projeto com múltiplas competências. Modelos paramétricos geralmente não estão disponíveis e os modelos racionais tornam-se imprescindíveis. Os múltiplos usuários destes modelos racionais utilizam referências diversas de qualidade relativa, usualmente conflitantes entre si, ocasionando um processo de troca de argumentos técnicos em busca de decisões/soluções negociadas.

Desta forma pode-se perceber que a criação de uma estrutura naval é um processo bastante iterativo, onde de acordo com o tipo de simulação a ser executada, poderia ser necessário cortar a malha do modelo em questão num determinado calado e gerar somente as malhas das superfícies cortadas onde são feitas várias etapas de análise, síntese e avaliação.

2.2

Processo de Projeto Paramétrico

Na área de engenharia naval, a definição dos principais parâmetros de uma estrutura flutuante pode ser um processo repetitivo e exaustivo, até encontrar a geometria adequada a ser utilizada nas análises estática e dinâmica.

Uma forma de reduzir o ato de visitar constantemente a espiral de projetos seria a utilização de técnicas de automação da fase de modelagem que possibilitem ao usuário poder ter controle da resposta do modelo final. Este mecanismo permite controlar as alterações por meio de determinados parâmetros (tais como, altura, profundidade, espessura e outros atributos).

Pode-se citar como exemplo, a definição de um paralelepípedo onde este é definido por um conjunto de pontos no espaço. Considerando que o cubo possui 6 faces, seria necessário definir um total 24 pontos no espaço incluindo os pontos que se sobrepõem.

Já na abordagem paramétrica, podem-se reduzir as variáveis para definir o cubo a um único parâmetro se desejado. Este parâmetro poderia ser o comprimento do cubo, a altura e largura poderiam ser definidos por um valor percentual a partir do valor do comprimento do paralelepípedo. Caso seja necessário mais liberdade, podem-se definir três parâmetros altura, comprimento e largura, independentemente. As variáveis utilizadas para definir o cubo são conhecidas como parâmetros de forma.

É necessário mencionar que este tipo de abordagem vem se tornando cada vez mais ampla e de vital importância na área de engenharia, pois facilita o estudo dos diversos problemas e fenômenos inerentes na fase de modelagem, assim como a possibilidade de variar, sem maiores custos, alguns parâmetros de forma importantes para o modelo.

No projeto paramétrico inverte-se o fluxo tradicional de modelagem de sistemas CAD (figura 2.1). Isto é, na modelagem usual a forma do modelo é definida e posteriormente são extraídas as suas propriedades de forma (fluxo horário da figura 2.1), enquanto que na modelagem paramétrica, parâmetros de forma que venham a definir o objeto a ser modelado são primeiramente especificados ou identificados (fluxo anti-horário da figura 2.1). Desta forma o projetista tem muito mais liberdade para modificar a forma do navio, se desejado, de forma rápida e interativa.

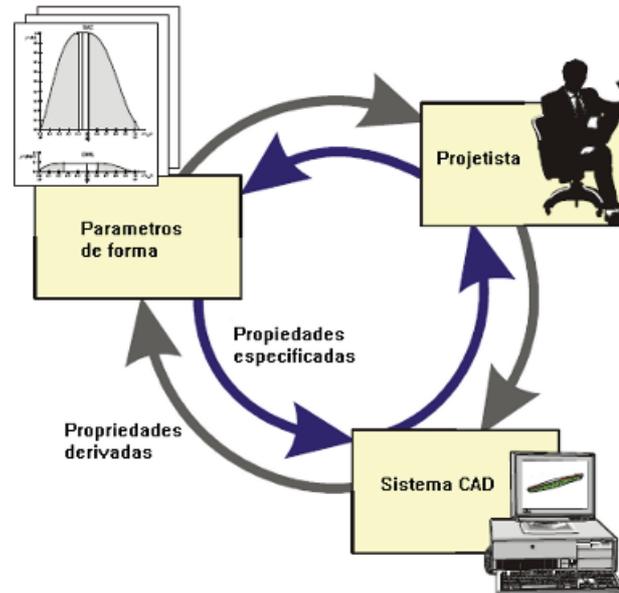


Figura 2.1: Processo de Projeto Usual (sentido horário) vs Processo de Projeto Paramétrico (sentido anti-horário).

Apresentaram-se nesta seção as diferenças existentes entre os paradigmas de Processo de Projeto Usual e Processo de Projeto Paramétrico. Estas duas abordagens podem ser combinadas de forma a oferecer ao modelador geométrico MG uma maior abrangência no seu poder de expressão de modelagem utilizando para isto linha de comandos (*scripts*) que sintetizem a geometria de um determinado modelo.

2.3

Definições e Nomenclaturas Utilizados

A seguir, apresentam-se algumas nomenclaturas básicas necessárias à compreensão deste texto e utilizadas nas ferramentas auxiliares desenvolvidas ao longo deste trabalho, que se encontram no capítulo 4 e nos apêndices.

Alves [Alves06] faz um resumo das principais seções de uma estrutura flutuante, as quais são mostradas na figura 2.2.

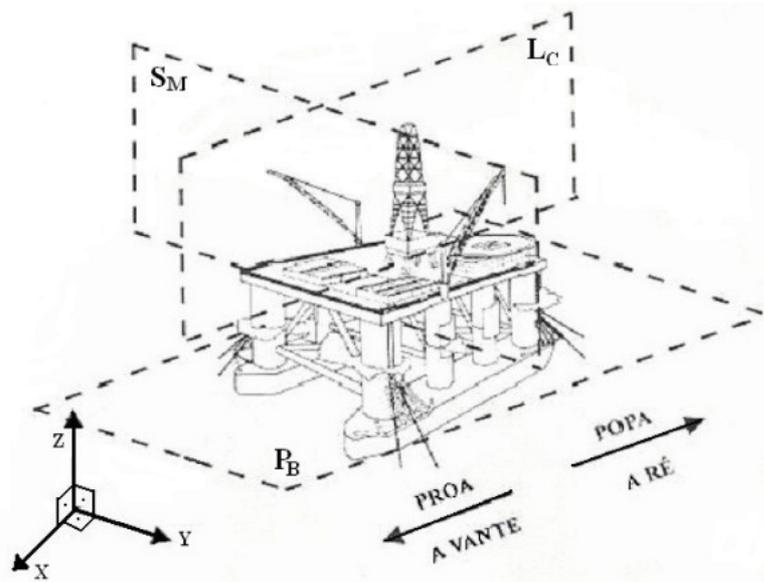


Figura 2.2: Seções de uma estrutura flutuante [Alves06].

Onde:

- S_M é a seção mestra.
- L_C é a linha de centro.
- P_B é o plano de base.
- X é o eixo longitudinal de coordenada local em X.
- Y é o eixo longitudinal de coordenada local em Y.
- Z é o eixo longitudinal de coordenada local em Z.

A seção mestra (aplicável a estruturas com forma de navio ou barcaça) fica localizada no centro longitudinal da plataforma. A linha de centro fica localizada no centro transversal da plataforma e o plano de base é paralelo ao plano xy e fica localizada na altura da quilha.

Cota é a altura dada, em coordenadas locais, da plataforma em relação à quilha. Quando se diz que um objeto está a uma cota de 10 metros, isto quer dizer que há uma distância em z de 10 metros, entre o objeto e a quilha.

Calado é a altura em que a linha da água do mar corta o eixo z, nas coordenadas locais da plataforma.

Uma unidade flutuante possui 6 graus de liberdade de movimento: 3 movimentos de translação linear, e 3 movimentos de rotação em torno de um eixo (angular). As nomenclaturas para estes graus de liberdade são mostradas na figura 2.3.

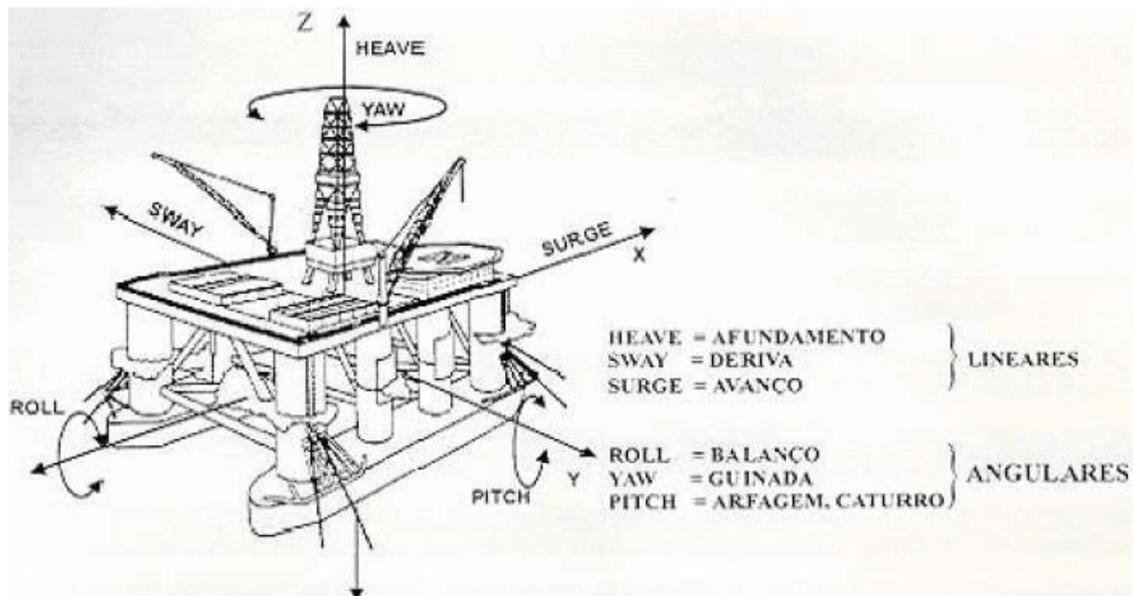


Figura 2.3: Graus de liberdade de uma unidade flutuante [Alves06].

Os deslocamentos (lineares e angulares) de uma plataforma são causados, basicamente, por ventos e ondas incidindo sobre a mesma e podem ser divididos em dois grupos:

Deslocamentos lineares São os movimentos de avanço (*surge*), onde a translação ocorre na direção do eixo longitudinal, o movimento de deriva (*sway*), cuja translação ocorre na direção do eixo transversal, e o movimento de afundamento (*heave*), cuja translação ocorre na direção do eixo vertical.

Alguns destes movimentos sofrem restrição do sistema de ancoragem da unidade e a estrutura deve ser projetada para limitá-los a valores aceitáveis.

Deslocamentos angulares São os movimentos de balanço (*roll*), onde a rotação se dá em torno do eixo longitudinal, o movimento de arfagem (*pitch*), cuja rotação é em torno do eixo transversal, e o movimento de guinada (*yaw*), cuja rotação é feita em torno do eixo vertical.

Estes movimentos sofrem pouca influência do sistema de ancoragem e são limitantes para a operação da unidade.

Os movimentos lineares e angulares são cíclicos, porém a plataforma pode apresentar inclinações permanentes dependendo do seu carregamento. Em projeto típicos de plataformas flutuantes ancoradas os períodos naturais de *surge*, *sway*, e *yaw* são da ordem de 100 segundos ou mais, pois a restauração

deve-se ao sistema de ancoragem. Os períodos de *heave*, *roll* e *pitch* de plataformas semi-submersíveis ficam usualmente na faixa de 10 a 25 segundos, com restauração de origem hidrostática.

Inclinações permanentes no sentido proa-popa são chamadas de *trim* e terão a mesma convenção de sinais das coordenadas longitudinais, ou seja, se a convenção for positivo avante, o *trim* será positivo se a proa tiver mais afundada que a popa.

Inclinações permanentes no sentido bombordo (BB)-boreste (BE) são chamadas de *banda* e terão a mesma convenção de sinais das coordenadas transversais, ou seja, se a convenção for positiva BE, a banda será positiva se BE estiver mais afundada que BB.

Estas inclinações, podem ser vistas na figura 2.4.

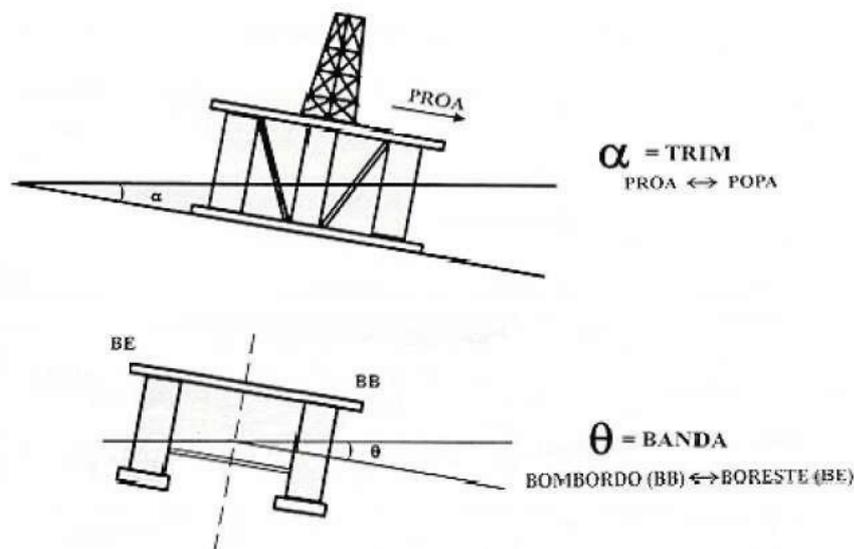


Figura 2.4: Inclinações de banda e trim [Alves06].

2.4 Representação de Modelos Navais

Devido ao foco deste trabalho ser na parte de modelagem para a área de engenharia naval serão especificados alguns parâmetros de forma próprios à geometria do casco de um navio. Isto é, a forma é descrita em termos de curvas longitudinais e seções transversais.

Projetar um navio ou uma estrutura flutuante é um problema muito complexo, o qual é influenciado por uma grande quantidade de variáveis. Por outro lado, um navio é formado por vários sistemas interligados e muitas vezes têm características conflitantes, onde é necessário realizar um balanço para escolher a melhor opção. Todas as variáveis selecionadas influenciam

no comportamento final do navio. Watson [Watson98] e Parson [Parson03] explicam o efeito das relações entre as dimensões principais na estabilidade, resistência ao avanço e resistência estrutural do navio.

Por exemplo a razão entre a boca e o calado está fortemente ligada à estabilidade, uma vez que a posição vertical do centro de gravidade é função do pontal e a altura do metacentro² é fortemente proporcional à boca. Assim como a razão entre o comprimento e o pontal está fortemente ligada à resistência estrutural do navio.

Usualmente, o casco é representado por um conjunto de cortes que formam duas famílias de curvas, chamado de plano de linhas. O plano de linhas é a representação mais comum e antiga do casco. As linhas horizontais são chamadas de linhas de água e as linhas verticais de balizas (figura 2.5).

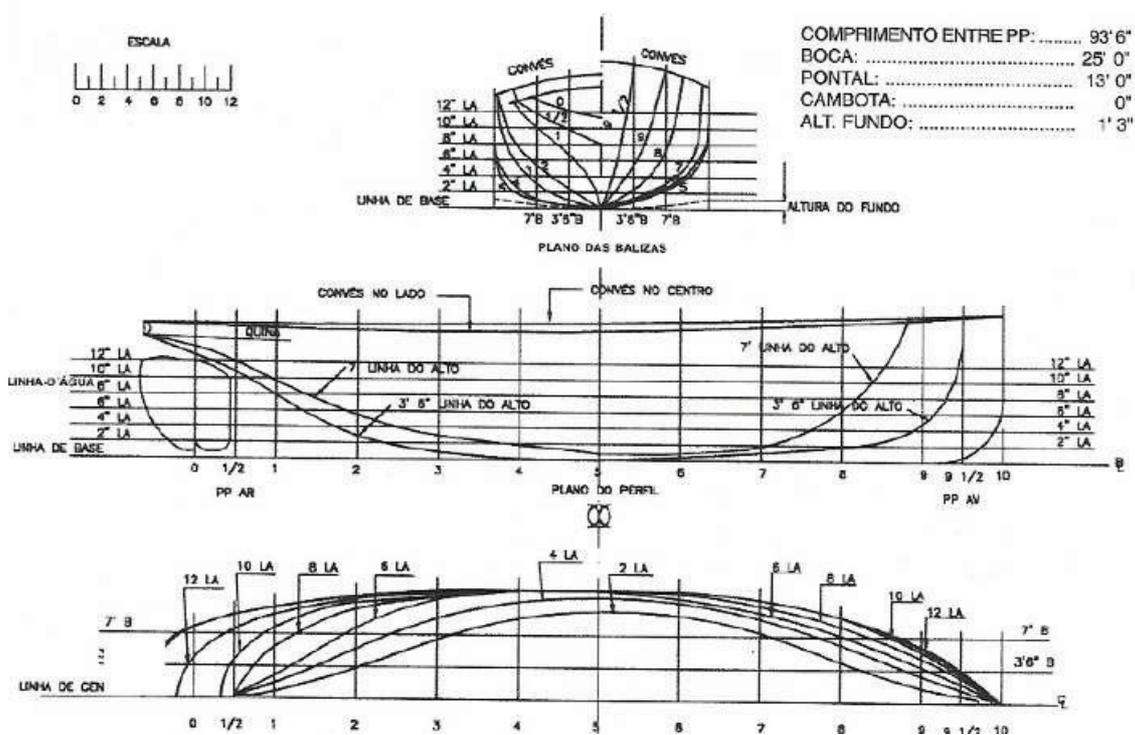


Figura 2.5: Linhas de desenho do casco de um navio [Fonseca05].

As linhas de água, especialmente, a linha de água do projeto deve possuir características geométricas adequadas, pois está relacionada às propriedades da embarcação como resistência ao avanço, facilidade de construção, arranjo geral, entre outros.

²Ponto cuja posição define a estabilidade dos corpos flutuantes e que está definido pela interseção de uma linha vertical que passa pelo centro de flutuação do navio na posição de equilíbrio com a linha que passa pelo novo ponto de flutuação quando o navio sofre uma inclinação transversal (banda)

Além disso, a suavidade das linhas ou superfícies do casco influi diretamente sobre o escoamento em torno do casco, principal fator responsável pela resistência da forma. Para um escoamento suave, não devem haver descontinuidades ou mudanças bruscas na linha do casco. Isto deve ser traduzido matematicamente pela síntese das curvas e superfícies do modelo.

Na vista frontal do casco, aproveita-se a simetria do casco para representar a metade frontal à direita e a metade de trás do casco à esquerda. Outros cortes também podem ser feitos a fim de ajudar na representação e percepção da superfície, como por exemplo cortes longitudinais (chamados de linhas de alto) e cortes diagonais.

Desta forma, para definir a geometria de um modelo é necessário escolher algumas variáveis principais que representem a forma do modelo. Nesta seção serão apresentadas as variáveis principais a serem consideradas na criação do casco de um navio (figura 2.6 e figura 2.7).

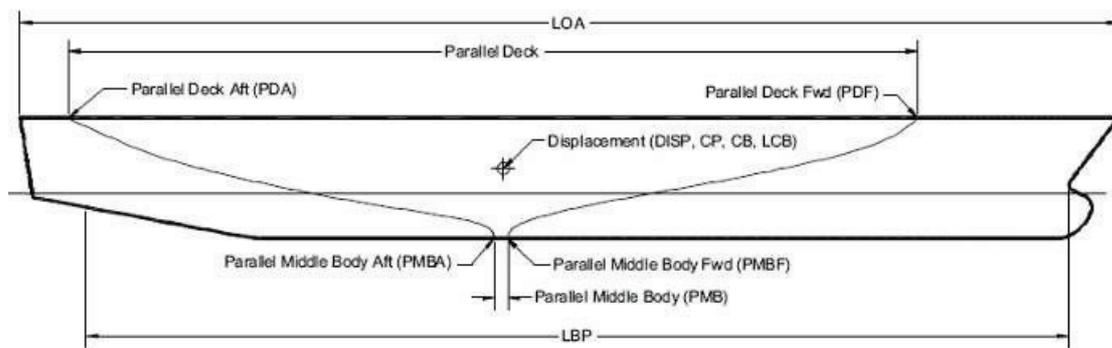


Figura 2.6: Vista 1 dos Parâmetros principais da geometria de um casco [Bole06].

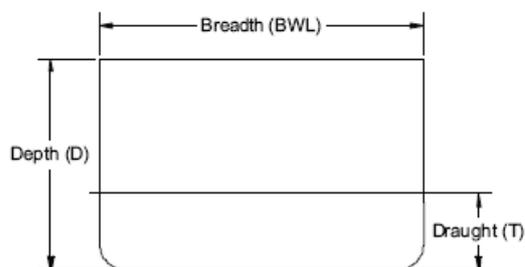


Figura 2.7: Vista 2 dos Parâmetros principais da geometria de um casco [Bole06].

As principais dimensões são:

- LOA (Length overall) : comprimento máximo do casco.

- LBP (Length Between Perpendicular) : comprimento entre perpendiculares do navio.
- Draught(T) : distância da quilha até a linha da água.
- Breadth : Largura ou Boca.
- Depth : Distância vertical desde a quilha até o topo do navio.
- PDA : posição do deck paralelo na popa.
- PDF : posição do deck paralelo na proa.
- PMB : posição do centro do corpo paralelo.

Geralmente a escolha das variáveis de forma de uma estrutura flutuante pode ser um processo exaustivo. A busca da forma ótima de uma estrutura flutuante, leva à construção de diversas instâncias de um mesmo modelo (modelagem geométrica exaustiva).

Desta forma propõe-se que o modelador geométrico utilizado neste trabalho ofereça a possibilidade de geração de *scripts*, o qual ofereceria uma maior flexibilidade para o projetista no momento de manipular e definir a forma do modelo, assim como a geração das malhas para os diferentes tipos de análises necessárias (estáticas ou dinâmicas).

2.5

Segurança Marítima

Em projetos navais é necessário respeitar várias normas de segurança. Em 1948 foi criado pela ONU um organismo internacional denominado a Organização Marítima Internacional, a qual é conhecida como IMO, a partir de seu nome em inglês (*International Maritime Organization*) [IMO78]. Esta organização adota normas e procedimentos voltados para a segurança marítima e que também oferece proteção ao meio ambiente.

O critério de estabilidade intacta ISC (*Intact Stability Code*) emitido em 1993 através do regulamento A-749 aplica-se a todos os tipos de unidades flutuantes. Além desse critério, também é empregado o MODU Code (*Mobile Offshore Drilling Unit Code*) aplicável para unidades auto-elevatórias, FPSOs e semi-submersíveis em situações intacta e em avaria.

Em 1973, a IMO apresentou em Londres o tratado internacional que regulamenta todas as formas de poluição marinha a qual é conhecida como MARPOL73 e em 1978 houve uma mudança nos protocolos em virtude do crescente número de acidentes com navios petroleiros ocorridos no biênio 1976-1977, razão pela qual atualmente é conhecida como MARPOL 73/78. Este tratado define regras de construção dos petroleiros, de equipamento

de separação de hidrocarbonetos/água, de prevenção da poluição por óleo operacional, etc. Também são definidas várias normas e critérios a serem adotados em casos de ocorrer/simular avarias numa embarcação.

Estas normas serão utilizadas no estudo de caso citado no capítulo 4 deste trabalho.