

1

Introdução

A utilização de técnicas de simulação nos meios científico e industrial vem se tornando cada vez mais ampla. Pode-se dizer que em ambos os casos, simulações são utilizadas para facilitar a compreensão e o estudo de diversos problemas e fenômenos, permitindo que se estude as conseqüências das variações de parâmetros importantes sem maiores custos.

Há diversos problemas de engenharia que fazem uso de modelos inerentemente geométricos. Por exemplo, para analisar o comportamento mecânico destes modelos é necessário o emprego de métodos numéricos computacionais, como o Método dos Elementos Finitos (MEF) Zienkiewicz [Zienkiewicz00], o Método de Elementos de Contorno (MEC) Beer [Beer92], entre outros.

O MEF é baseado em discretizações do domínio de um modelo geométrico do objeto. O uso do MEF se deve, principalmente, à sua grande versatilidade, à qualidade dos resultados e à relativa facilidade na implementação computacional, embora o custo computacional e a preparação dos modelos sejam maiores do que no MEC.

O MEC, dependendo do problema físico, oferece algumas vantagens. Uma das principais vantagens do MEC é a redução considerável do sistema de equações envolvidas, pois as aproximações numéricas são realizadas apenas sobre o contorno do sólido em questão.

A modelagem geométrica permite a representação e descrição geométrica através de expressões matemáticas que representam as entidades geométricas discretizadas. Este tipo de modelagem pode representar entidades geométricas (vértices, curvas, superfícies e volumes) dependendo do programa e das necessidades relativas à solução de determinado problema.

Este trabalho apresenta uma proposta para geração de modelos de engenharia 3D utilizando a modelagem geométrica paramétrica com automação de *scripts*, assim como as soluções para os diversos problemas que se enfrenta ao se utilizar combinações de retalhos individuais para gerar e modelar objetos mais complexos. Salienta-se que neste trabalho os modelos geométricos estão focados na representação de plataformas de petróleo os quais podem ser

estruturas flutuantes ou fixas localizadas sobre uma determinada lâmina de água.

1.1 Tipos de Plataformas Petrolíferas

Plataformas petrolíferas são largamente utilizadas para a exploração, perfuração e produção de poços de petróleo em campos marítimos (*offshore*). A perfuração de poços de petróleo é realizada através do uso de uma sonda de perfuração. Trata-se de uma torre metálica que sustenta um tubo vertical chamado de coluna de perfuração, em cuja extremidade é colocada uma broca (figura 1.1).

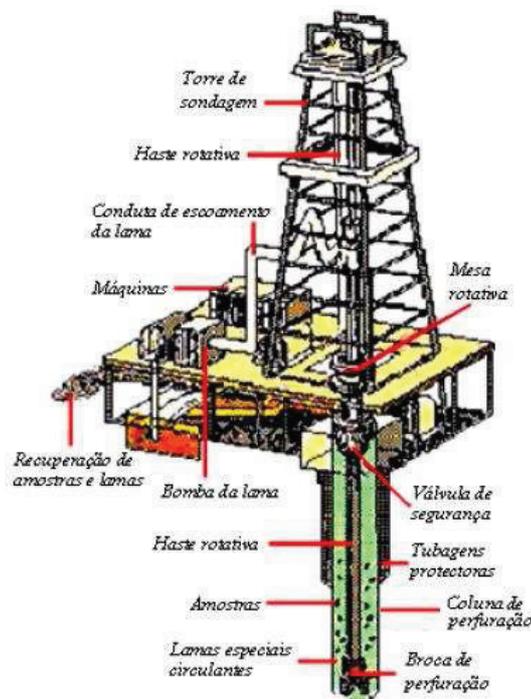


Figura 1.1: Sonda de Perfuração.

Uma vez atingida uma determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada e as paredes do poço são preenchidas com uma pasta de cimento (operação de cimentação) de forma a evitar o desmoronamento das paredes do poço.

Concluída a fase de perfuração, é necessário preparar o poço afim de garantir que esteja em condições de operar de forma segura, durante toda a sua vida produtiva (fase de completação).

A fase de intervenção é caracterizada pela restauração ou manutenção dos poços produtores. O intuito deste procedimento é o de manter a produção do poço a níveis aceitáveis. Alguns problemas no poço que podem gerar uma

operação de intervenção são: produção excessiva de gás, produção excessiva de água, baixa produtividade, produção de areia, falhas de equipamentos e depletação do reservatório [Oliveira04].

Pode-se citar os seguintes tipos de plataformas petrolíferas: plataformas fixas, auto-eleváveis, semi-submersíveis e FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), entre outras (figura 1.2).

As plataformas petrolíferas são utilizadas nas fases de perfuração, completação, produção e intervenção em poços de petróleo.



Figura 1.2: Tipos de plataformas [Neto07].

As plataformas fixas caracterizadas por estarem apoiadas no solo marinho são constituídas de estruturas modulares de aço (conhecidas como jaquetas), e são projetadas para receber todos os equipamentos de perfuração, bem como todas as instalações necessárias para a sua respectiva produção.

Podem-se citar os seguintes tipos de plataformas fixas: Jaquetas e Torres Complacentes (*Compliant Piled Tower - CPT*).

A plataforma de Torre Complacente consiste de uma torre estreita e flexível fixada a uma fundação de pilares capazes de suportar uma superestrutura convencional para operações de perfuração e produção. Este tipo de plataforma pode ser dotado de tanques de flutuação.

Geralmente são utilizadas em profundidades que variam de 300 metros a 600 metros. Este tipo de plataforma possui a capacidade de poder suportar grandes forças laterais.

As plataformas auto-eleváveis são construídas para serem utilizadas em águas que variam de 5 a 130 metros. Isto é, possuem uma altura variável ditado pelo comprimento das pernas de sustentação da plataforma, acionadas por meio mecânico ou hidráulico, os quais se movimentam para baixo até atingirem o fundo do mar. Este tipo de plataforma pode executar operações de produção e/ou perfuração.



Figura 1.3: Plataformas de petróleo: a) Torre Complacente b) TLP (Fonte:Offshore Technology).

Um tipo de plataforma intermediário entre as fixas e as flutuantes é a plataforma de Pernas Atirantadas (*Tension Leg Platform - TLP*), que é uma estrutura presa a um local determinado por tendões verticais conectados ao solo marinho através de pilares fixos. Os tendões permitem a utilização desta plataforma em uma escala de profundidade de água maior, porém com movimento vertical limitado (figura 1.3).



Figura 1.4: Plataformas tipo Spar Buoy (Fonte:Offshore Technology).

Dentre as plataformas flutuantes pode-se citar a plataforma do tipo Spar, a qual é projetada sob o conceito de uma grande estrutura de bóia com um enorme reservatório submerso para armazenamento *offshore*. Geralmente é um único cilindro vertical de grande diâmetro que suporta uma plataforma. Estas plataformas são utilizadas em profundidades de até 900 metros e são empregadas para a produção e/ou perfuração de poços, além de possuir grande capacidade de armazenamento ao longo dos seus segmentos (figura 1.4).

A escolha do tipo de plataforma a ser utilizada depende da localização, lâmina da água, condições ambientais, afastamento dos poços, capacidade requerida de processamento, segurança operacional, custo, entre outros fatores.

A plataforma do tipo FPSO, é um navio tanque com capacidade para processar, armazenar e transportar o petróleo de um determinado ponto a outro. É instalada no convés da FPSO uma planta de processo para separar e tratar os fluidos produzidos pelos poços. Finalmente o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio, sendo transferido para um navio aliviador de tempos em tempos. O navio aliviador é um petroleiro que atraca na popa da FPSO para receber petróleo e transportá-lo para terra.

Finalmente, as plataformas semi-submersíveis são compostas de um ou mais conveses apoiados por colunas em flutuadores submersos, que são denominados de *pontoons*, os quais apóiam as colunas, e que por sua vez sustentam os conveses. Este tipo de estrutura é amplamente utilizado para a produção, completação e perfuração *offshore*.

A geometria destas estruturas flutuantes apresenta diversos problemas para ser modelada. Há diversos outros ramos da engenharia que também possuem geometrias complexas, tais como : automóveis, turbinas, aviões, compressores, etc. Salienta-se então que há uma necessidade de se desenvolver sistemas computacionais de modelagem que sejam capazes de reproduzir as diferentes formas geométricas do problema, seja esta de forma iterativa ou de forma automatizada.

É conveniente ressaltar que os modelos a serem estudados neste trabalho são relativos somente a plataformas flutuantes. As plataformas fixas não pertencem ao escopo deste trabalho.

1.2

Exemplos de Metodologia de Projeto de Estruturas Flutuantes

Projetar e construir uma estrutura flutuante não é uma tarefa simples, pois possui várias fases, os quais devem seguir uma determinada metodologia que envolve: requisitos iniciais, análises de custos, simulações do modelo por computador, entre outros, até chegar, finalmente, à sua construção

propriamente dita.

Segundo Martins Filho [Martins02], a definição das características de um navio num projeto de engenharia naval, é feita a partir de um plano de balizas. Este plano de balizas define a geometria dominante do navio a ser construído. Geralmente os navios são simétricos em relação ao seu plano diametral.

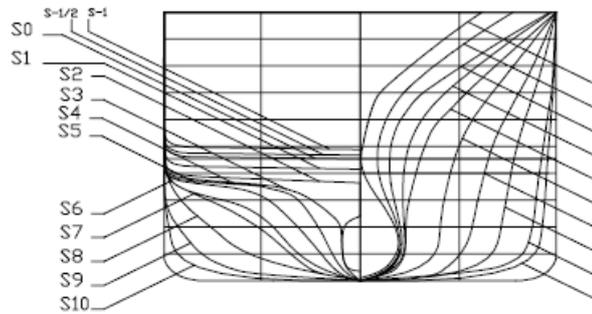


Figura 1.5: Plano de balizas.

A mais marcante contribuição na descrição de uma sistemática a ser seguida para desenvolver projetos navais foi feita por Evans [Evans59] (figura 1.6).



Figura 1.6: Espiral de projeto [Evans59].

Esta descrição é feita em uma espiral de projeto, isto é, o projeto evolui em estágios cíclicos crescentes de detalhamento das características do objeto a ser projetado, através do seqüenciamento de passos estrategicamente escolhidos.

Desenvolver de maneira satisfatória um projeto está relacionado fortemente com a interdependência dos seus subsistemas, e a espiral explora

muito bem este fato. Isto é, a cada ciclo todo o processo é recalculado, até que, no último ciclo, tem-se todos os subsistemas interagindo conjuntamente.

Outra metodologia de projeto segundo, Watson [Watson76], geralmente utilizada na área naval, divide o problema de projetar uma estrutura flutuante em três etapas: síntese, análise e avaliação. Veja a figura 1.7 que mostra de forma geral o fluxograma de projeto.

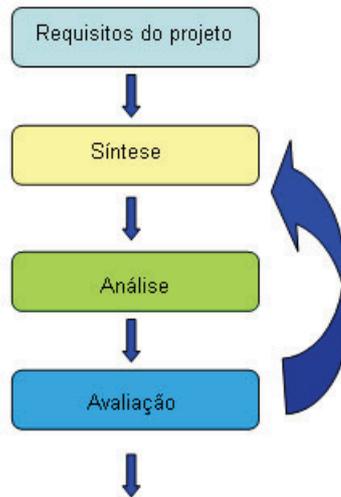


Figura 1.7: Trinômio Síntese, Análise e Avaliação [Watson76].

Síntese A fase de síntese consiste na geração de idéias, sintetizando assim elementos de solução, identificando cada problema, suas possíveis soluções, interações com outros componentes de projeto e iterações (raciocínio dedutivo). A identificação dos subsistemas resulta na matriz de influência, que é a que correlaciona as etapas do projeto mostrando o grau de relação que uma etapa possui com outra.

Análise Os dados gerados pelo processo de síntese são submetidos a critérios de avaliação e desempenho. Estes dados são as características particulares que tornam um determinado projeto único. A identificação dos sub-problemas resulta na matriz de qualidade, que é outra ferramenta de grande importância, pois aqui são relacionados os sub-problemas com os critérios de qualidade (análise) que o navio deve possuir. Em outras palavras qualifica-se o processo de síntese.

Avaliação O objetivo desta fase é avaliar os resultados obtidos na fase de análise anterior. Se os resultados não são satisfatórios pode-se repetir o processo. Isto é verifica-se se a síntese inicial é aceitável.

Uma característica muito marcante desta metodologia de projeto é a disponibilidade de modelos matemático-computacionais tanto para a escolha das características principais (dimensões principais), como para o dimensionamento dos elementos mais detalhados (como reforços estruturais, escolha de elementos do sistema propulsivo, etc.), já que partem de uma solução típica ou padrão, para a qual se pode identificar uma correlação entre os elementos característicos do objeto de projeto.

Outra metodologia de projeto é o conceito de QFD (*Quality Function Deployment*) [Teminko97]. QFD é uma metodologia proposta e desenvolvida por Yogi Akao, do Departamento de Qualidade do Mitsubishi Heavy Industries, para o projeto e construção de petroleiros, de forma a poder correlacionar as necessidades do cliente (requisitos de qualidade) com os elementos característicos definidos pelo projetista (elementos constituintes do sistema). Esta abordagem utiliza duas matrizes de forma a poder ordenar todos os problemas identificados em relação ao nível de complexidade do projeto. Estas matrizes: são a matriz de influência e a matriz de qualidade.

Para uso nas metodologias de projeto citadas, dentre outras ferramentas, a Petrobras possui três programas computacionais para o estudo de estruturas flutuantes desenvolvidas em conjunto por duas instituições e equipes de desenvolvimento: o CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobras) e o Tecgraf, Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio. Estas ferramentas são: o MG (*Mesh Generator*) [Coelho98], Sstab [Coelho03] [Alves06], os quais são de uso exclusivo do programa de estabilidade naval oficial da Petrobras, e o Wamit [Wamit08]. Estas ferramentas são utilizadas em todos os sistemas flutuantes instalados na Bacia de Campos.

Para a fase de modelagem geométrica é utilizado o MG, onde é definida a geometria básica da estrutura flutuante e as malhas geradas são utilizadas tanto para análise estática quanto dinâmica.

Na fase de análise estática, utiliza-se o Sstab para calcular a curva de estabilidade estática que indica a capacidade da estrutura flutuante poder restaurar seu equilíbrio inicial após uma perturbação qualquer, como também para calcular o volume do modelo. Finalmente na fase de análise dinâmica, utiliza-se o Wamit para analisar a influência das ondas do mar com relação ao casco da estrutura flutuante. Esta análise é feita no domínio da frequência.

1.3

Trabalhos Correlatos

A modelagem geométrica permite a descrição da geometria de uma estrutura através de fórmulas matemáticas. Isto permite uma eficiente

representação computacional do modelo e este fato foi reconhecido já no final dos anos 50. Nessa época, concluiu-se que a forma mais adequada de tratar o problema era através da descrição paramétrica das curvas e superfícies [Farin84].

Para [Mortenson85], o termo modelagem geométrica começou a ser utilizado na década de 70 com o rápido desenvolvimento dos computadores e programas CAD (*Computer Aided Design*).

Na engenharia naval, os modeladores geométricos utilizados para modelar estruturas flutuantes pertencem a um grupo conhecido como CASHD (*Computer Aided Ship Hull Design*), pois estes modeladores permitem que seja possível realizar cálculos como a tabela hidrostática do modelo, curva de estabilidade, etc.

Uma das motivações principais deste trabalho é a busca da automação real do processo de simulação de problemas tridimensionais em engenharia naval (variação de geometrias complexas). Neste contexto, as questões referentes à modelagem geométrica de estruturas flutuantes assumem uma importância fundamental e vêm sendo estudadas durante os últimos anos.

No desenvolvimento deste tipo de sistema existem duas questões a serem abordadas: representação e especificação. A representação do modelo lida com o problema de como caracterizar objetos e como converter esta caracterização em estruturas concretas. A especificação do modelo se relaciona com as técnicas usadas para construir essas estruturas e a interface do sistema com o usuário [Velho02].

Há diversas abordagens de modelagem geométrica ou de sólidos usando as mais variadas estruturas de dados [ACIS09] [Parasolid09] [Ansys09]. Como já mencionado, diversos problemas de engenharia possuem geometria complexa (automóveis, sistemas flutuantes, turbinas, compressores, etc) e estes, por sua vez, dependem de um sistema de modelagem capaz de reproduzir as diferentes formas geométricas do problema e, numa segunda instância, definir uma determinada malha de elementos finitos associada à forma do objeto para se poder realizar as simulações numéricas.

Uma forma de se construir modelos complexos consiste em combinar várias superfícies ou sólidos construídos individualmente em uma única representação. Para que esse tipo de modelagem seja produtivo, o problema de interseção entre retalhos de superfícies deve ser tratado de forma eficiente [Coelho98].

A estratégia de modelagem apresentada por [Coelho96] no software MG (*Mesh Generator*) é classificada como uma representação de Fronteira (*Boundary Representation-BRep*) [Hoffman89] [Mantyla88], pois os sólidos são

representados explicitamente pelas suas curvas e superfícies de bordo.

O paradigma de modelagem do MG, está baseado na criação e manipulação das curvas e superfícies que compõem o modelo. Assim, este paradigma tem como principal vantagem uma grande abrangência de poder de representação, pois praticamente qualquer tipo de geometria pode ser modelada.

Lira [Lira02] implementou um esquema de detecção de multi-regiões de forma automatizada, utilizando uma estrutura de dados topológica denominada CGC (*Complete Geometric Complex*) [Rossignac90], como também estendeu a representação de modelagem de superfícies por meio de NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) [Piegl91] [Piegl99].

A geração de malhas do MG é feita utilizando o algoritmo de Miranda [Miranda00] que implementa técnicas de avanço de fronteira com decomposição espacial recursiva (*quadtree*). Pode-se mencionar ainda um outro trabalho recente sobre geração de malhas feita por Teixeira [Teixeira03] que apresenta um algoritmo de geração de malhas combinando também a técnica de avanço de fronteira com o auxílio da decomposição espacial recursiva (*quadtree*).

Uma modelagem automática parametrizada é implementada por Oliveira [Oliveira08], onde é utilizado o MG e um ambiente externo para poder definir a forma do modelo. É possível também obter instâncias do modelo variando alguns parâmetros de forma. Os modelos gerados são utilizados para realizar otimização de estruturas flutuantes utilizando algoritmos genéticos para as diversas simulações de análise estática e dinâmica do modelo.

Mendonça [Mendonça04] também implementa um sistema que permite realizar otimização de uma estrutura flutuante utilizando, porém, uma estratégia híbrida de algoritmos genéticos e redes neurais., utilizando a linguagem Lua [Ierusalimschy04]. O ambiente de modelagem e otimização são independentes e interconectados por um *script* em Lua.

Um outro trabalho que menciona linguagem de comandos, segundo Birk [Birk98] [Birk06] apresenta o processo de otimização de cascos de estruturas flutuantes do ponto de vista hidro-dinâmico, combinando ferramentas de modelagem de CAD e CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A linguagem de comandos é implementada para a geração e automação de processos de modelagem.

Pode-se perceber uma tendência à busca de uma forma de automatização de processos na fase de modelagem geométrica. Isto é, gerar um conjunto de instâncias de um modelo variando alguns parâmetros de forma. Este conjunto é então utilizado para minimizar uma determinada função objetivo de projeto.

1.4

Objetivos

Os trabalhos de Oliveira [Oliveira08] e Mendonça [Mendonça04] estão centralizados no paradigma de modelagem geométrica de forma automática. Entretanto, o enfoque de modelagem automática é proposto fazendo-se uso de um ambiente externo ao modelador geométrico utilizado. Estes trabalhos abordam o problema de um ponto de vista particular e não geral, pois a automação do processo é dependente do tipo de problema a ser tratado.

Pode-se dizer que o objetivo principal do presente trabalho é propor métodos para a automatização de processos de forma rápida e confiável. Este fato é muito importante e indispensável na fase de modelagem de um projeto naval. Apresenta-se, assim, uma generalização (*framework*) do problema de modelagem paramétrica de forma automática, onde é possível criar modelos para análise estática e dinâmica com a menor intervenção possível do usuário. Isto é, chama-se a atenção ao fato de possibilitar a geração automática de variantes de um determinado modelo padrão, a fim de atingir uma determinada configuração desejada, seja no aspecto geométrico ou com relação a sua estabilidade estática ou dinâmica. Este processo é feito por meio de *scripts* criados pelo usuário para o respectivo problema a ser modelado ou analisado. Desta forma, a intenção deste trabalho é reduzir o processo de revisitar a espiral e projeto proposta por Evans [Evans59] na fase de projeto.

Para resolver este problema, incorporou-se a linguagem Lua, de forma embarcada, no modelador geométrico utilizado neste trabalho. Desta forma, cria-se um histórico da modelagem do usuário (*script*). Este histórico de modelagem permite recuperar e reproduzir, de forma intuitiva, todas as ações feitas pelo usuário desde a criação de um vértice, superfície, etc, até se chegar ao modelo final.

É possível também a partir de um modelo geométrico extrair um conjunto de *scripts* que sintetizam de forma fiel a geometria real do modelo. Logo, este *script* pode ser parametrizado de forma a obter leves variações na forma do modelo final. Este conjunto de instâncias de um mesmo modelo pode ser utilizado para estudar a influência da forma do casco de uma estrutura flutuante com respeito à sua estabilidade estática ou dinâmica.

Finalmente, apresenta-se um conjunto de comandos de modelagem capaz de sintetizar todas as ações do usuário.

Como objetivos secundários para a realização deste trabalho pode-se citar a proposição de mecanismos auxiliares à modelagem geométrica apresentada por Coelho [Coelho98], de tal forma que permitam ao usuário poder interagir com os dados modelados, realizar uma verificação da consistência topológica

das malhas geradas e poder detectar erros de modelagem, os quais podem ser corrigidos antes da sua exportação final. Pode-se mencionar, ainda, que é possível realizar uma simplificação das malhas de acordo ao tipo de simulação a ser efetuada (análise estática ou dinâmica).

O processo de definir discretizações para as curvas de bordo, que são usadas para interpolar uma malha numa superfície, pode, em alguns casos, gerar inconsistências no processo de corte, ou interseção, criando entidades que estão fora da malha, mas estão corretamente posicionadas na descrição matemática da superfície. Para evitar este problema salienta-se que as malhas geradas sempre devem estar conformes com as suas curvas de bordo.

Nas simulações numéricas (análises estáticas e dinâmicas), é conveniente que as malhas utilizadas possam considerar o modelo completo ou parte deste modelo. Assim, apresenta-se um meio de poder cortar o modelo final em diferentes calados ou planos de corte, previamente definidos pelo usuário, para, em seguida, gerar as malhas das superfícies cortadas, sem a necessidade de editar uma única entidade (curvas, vértices, superfícies, volume) do modelo original.

Estas novas funcionalidades, implementadas neste trabalho, são partes de um possível *framework* integrado de modelagem, simulação e otimização para o estudo de estruturas flutuantes e é mostrado na figura 1.8.

O *framework* integrado de modelagem e simulação de estruturas flutuantes proposto neste trabalho (figura 1.8), permite modelar, variar uma geometria complexa de forma automatizada por meio de *scripts*, e finalmente realizar as respectivas análises estática (Sstab) e dinâmica (Wamit) de uma determinada estrutura flutuante. Uma vez realizadas estas análises, os resultados são exportados para um módulo de otimização. Caso o modelo não atenda as restrições de geometria e estabilidade, alguns parâmetros de forma da estrutura devem ser alterados. Estas alterações são repassadas para o MG, via *scripts* ou linha de comandos Lua, que gera um novo modelo geométrico, e o processo recomeça até que haja uma convergência nas simulações.

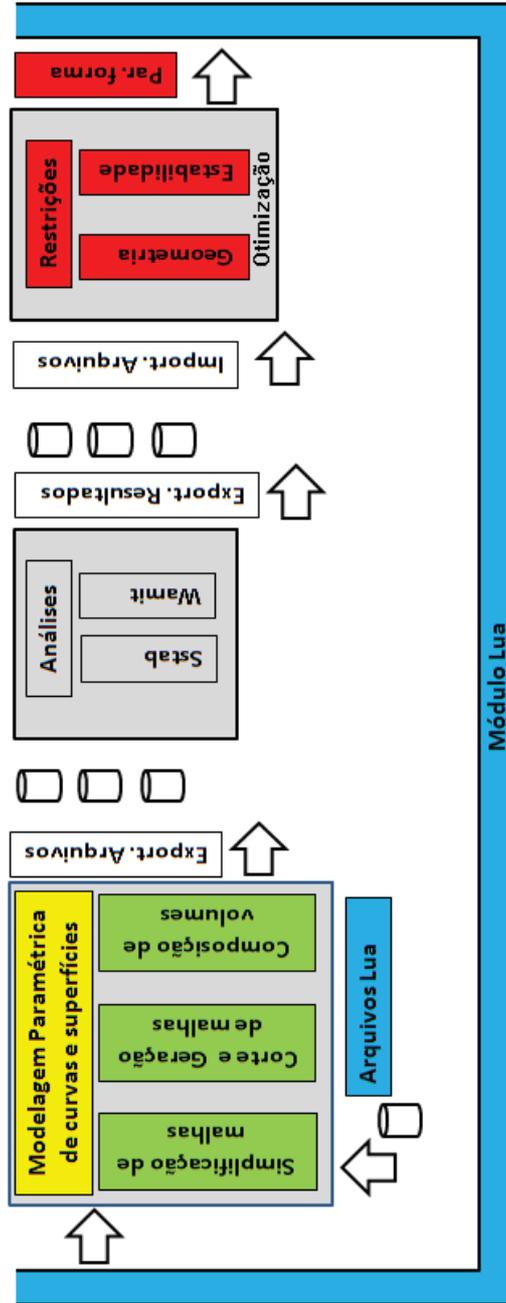


Figura 1.8: Framework de Modelagem.

1.5

Organização da tese

A tese está organizada em 5 capítulos:

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução do problema, assim como também apresenta um possível *framework* integrado de modelagem, simulação e otimização para o estudo de estruturas flutuantes.

O Capítulo 2 descreve as diferenças principais entre um projeto iterativo e um projeto automático, assim como a sua influência direta na espiral de projeto proposta por Evans. Faz-se um levantamento dos principais parâmetros de forma que definem uma estrutura flutuante. Uma vez identificados os parâmetros de forma que modificam a forma da estrutura, estes podem ser configurados para assumirem diferentes valores, os quais gerariam diversas instâncias de um mesmo modelo, porém com leves variações na sua forma.

No Capítulo 3 faz-se uma proposta de integração da modelagem paramétrica no MG. Apresenta-se um ambiente de programação embutido alcançado por meio da linguagem Lua [Jerusalimschy04]. É apresentado um conjunto de macro-comandos de modelagem que, juntamente com os comandos nativos Lua, provêem um ambiente de modelagem por scripts ou linha de comandos.

O Capítulo 4 apresenta um estudo de casos sobre a influência de alguns parâmetros de forma do casco de um navio com respeito à sua estabilidade estática. A variação dos parâmetros de forma é feita por meio de *scripts*.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e as direções futuras para a continuação deste trabalho.

Nos Apêndices A e B apresenta-se uma listagem dos comandos Lua incorporados no MG.

Os Apêndices C e D apresentam respectivamente as ferramentas auxiliares implementadas no MG de forma a poder gerar as malhas para as análises estáticas e dinâmicas com a menor intervenção possível do usuário.

É necessário mencionar que o projeto de estruturas flutuantes envolve cálculos de estabilidade estática e dinâmica. Os modelos dinâmicos não serão abordados. Este trabalho analisa a influência dos parâmetros de forma de uma estrutura flutuante e sua relação com a estabilidade estática. Estudo semelhante poderia contemplar também uma análise dinâmica.