

1 Introdução

No contexto da modelagem geométrica para elementos finitos, a malha de elementos finitos é definida a partir da descrição geométrica do domínio do problema que está sendo estudado. Sendo assim, a criação de um modelo geométrico que possa reproduzir os objetos reais de engenharia que precisam ser modelados torna-se uma etapa crucial no conjunto dos procedimentos necessários para se realizar uma análise completa utilizando-se o método dos elementos finitos (MEF).

Como muitos modelos em engenharia envolvem a criação de objetos extremamente complexos em sua forma e geometria, é necessária a utilização de modeladores que possam reproduzir, de forma completa, simples e eficiente, a geometria dos objetos em estudo. Além disso, é preciso que tais modeladores possuam recursos suficientes para manter uma interface amigável com o usuário e para que o mesmo possa reproduzir digitalmente o modelo geométrico que deseja analisar da forma mais simples e rápida possível.

As metodologias de modelagem existentes são diversas, e na literatura podem-se encontrar várias bibliotecas e aplicativos gráficos que adotam enfoques e representações de dados de diferentes tipos [1,2,3,4,5]. Segundo Lira [6], na simulação 3D de problemas de engenharia usando o MEF, qualquer metodologia de modelagem deve tratar dois diferentes aspectos: modelagem geométrica com detecção automática de múltiplas regiões fechadas e interseções de superfícies e suporte para geração automática de malhas de elementos finitos.

Este tipo de metodologia foi implementado num modelador geométrico tridimensional de elementos finitos denominado MG [7]. O MG é um pré-processador com suporte para geração de malhas em superfícies e malhas sólidas [8]. Atualmente, o MG incorpora a capacidade de realização de interseções entre superfícies paramétricas, entre superfícies paramétricas e curvas paramétricas e a detecção automática de múltiplas regiões fechadas a partir de retalhos de superfícies com geometria qualquer. As Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 ilustram modelos gerados no MG que utilizam tais facilidades.

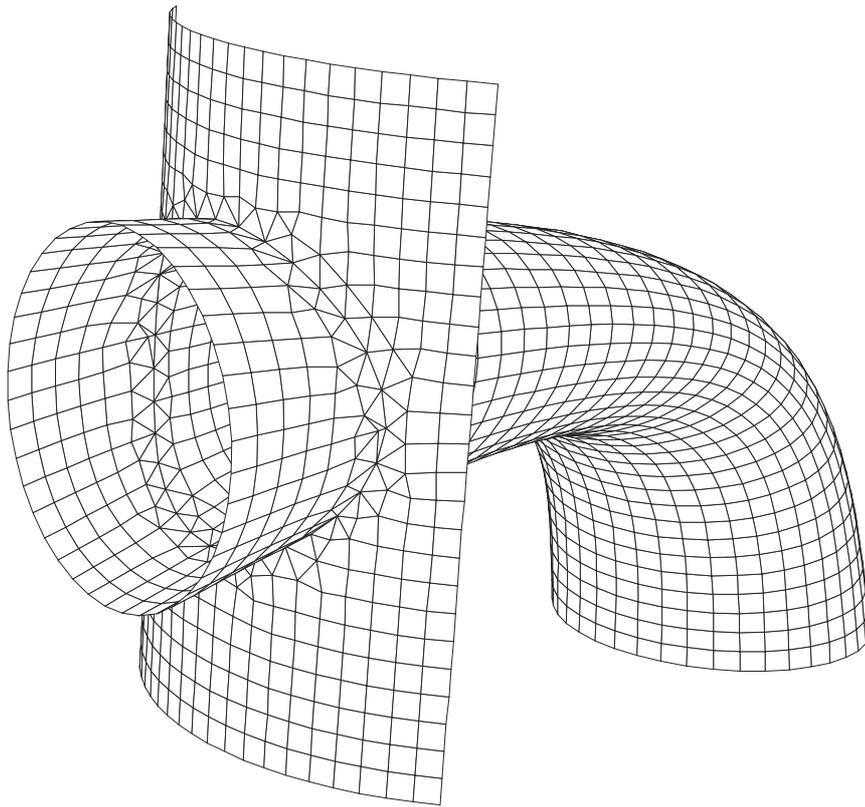
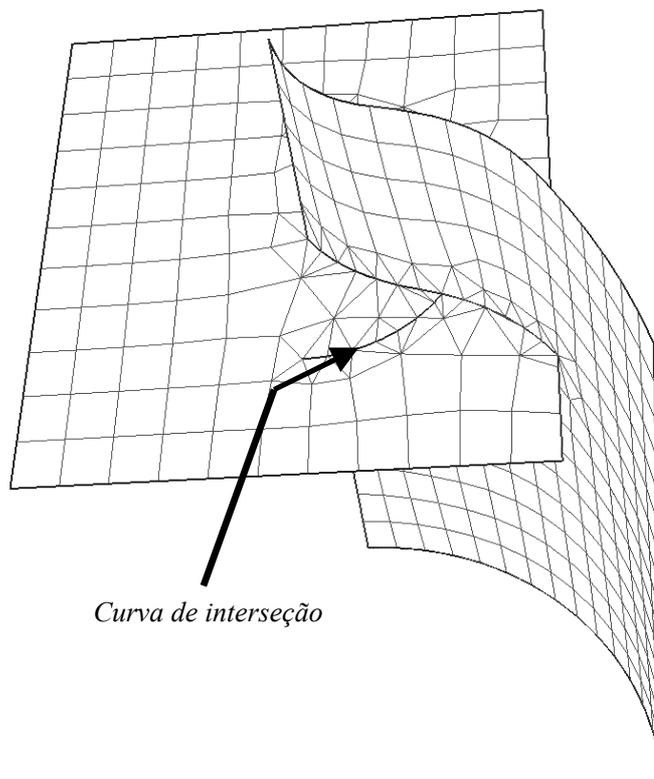


Figura 1.1 – Interseção entre malhas de superfícies [8].



Curva de interseção

Figura 1.2 – Caso patológico de interseção de superfícies [6].

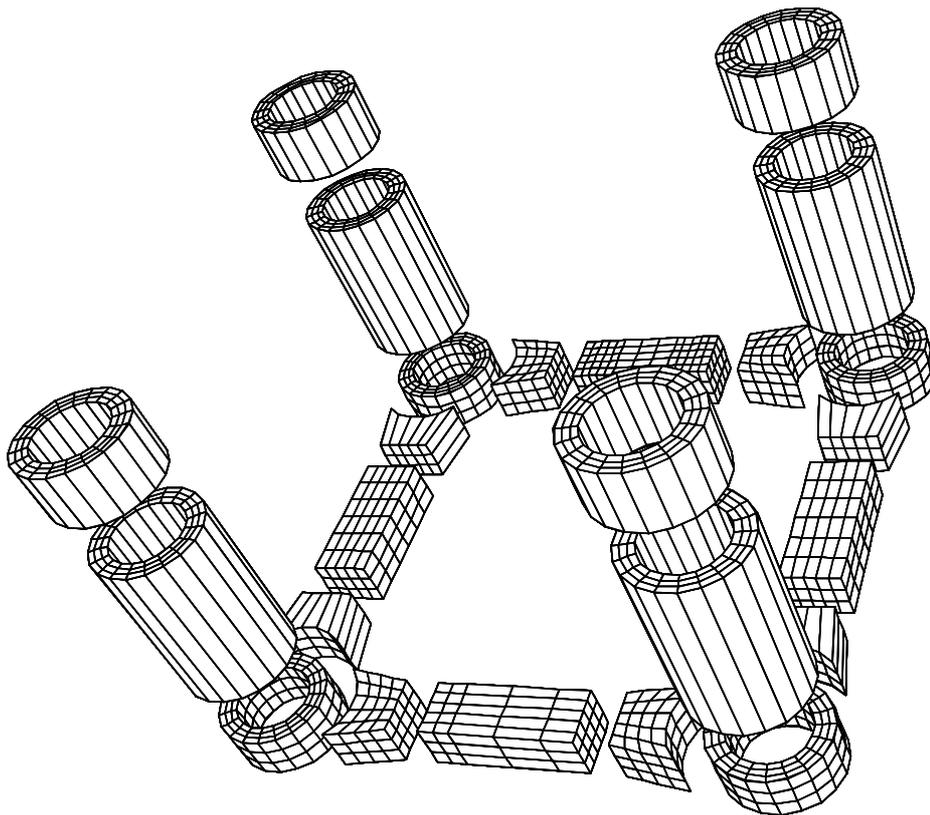


Figura 1.3 – Modelo explodido: detecção automática de regiões [6].

A estratégia de modelagem do MG pode ser classificada como uma Representação de Fronteira (*Boundary Representation – B-Rep*) [9,10], pois os volumes sólidos são representados explicitamente pelas curvas e superfícies na sua borda.

O paradigma de modelagem do MG, na sua versão original, era baseado na criação e manipulação das curvas e superfícies que compõem o modelo. Para tanto, o MG apresenta uma interface com o usuário amigável e eficiente. Este paradigma tem como principal vantagem o abrangente poder de representação, pois permite que praticamente qualquer tipo de geometria sólida seja representada, incluindo regiões múltiplas e degenerações de sólidos, tais como cascas representadas pela sua superfície média. O principal problema deste paradigma é que a modelagem depende muito da intervenção do usuário para a determinação de todas as curvas do modelo, o que poderia ser mais facilmente gerado com interseções automáticas.

A organização interna do MG segue o conceito de Programação Orientada a Objetos, com uma estruturação interna dos dados de forma simples e organizada. Com o trabalho de Lira [6], o MG incorporou o uso de diversas bibliotecas auxiliares com implementações computacionais já comprovadamente

eficientes e robustas, resultando em um modelador cada vez mais poderoso no contexto da modelagem B-Rep de sólidos e na geração automática de malhas bi e tridimensionais.

Entretanto, para que a aplicabilidade do MG no campo da engenharia se tornasse ainda maior, de modo que a criação de modelos complexos pudesse ser realizada sem exigir do usuário tempo e um número de passos de modelagem excessivos, era necessário que o MG passasse a incorporar um outro paradigma de modelagem, já presente em outros modeladores: as operações booleanas. Neste paradigma, utilizam-se primitivas sólidas simples para obterem-se modelos com geometrias mais complicadas, desta forma minimizando as intervenções do usuário no processo de modelagem. O paradigma de modelagem através de operações booleanas é típico de modeladores cuja representação não é baseada na representação explícita da fronteira, mas sim na representação direta do conjunto de pontos que formam o sólido. Este tipo de representação é chamado de CSG (*Constructive Solid Geometry*) [11]. Esta representação é dita *implícita* pois a fronteira não é representada explicitamente, ao passo que a representação B-Rep é chamada de explícita.

Deve-se ressaltar que as operações booleanas apresentam-se apenas como um paradigma de modelagem, não sendo exclusivas de representações CSG. No contexto deste trabalho, o que se buscou foi incorporar este paradigma de modelagem a um modelador com representação B-Rep com capacidade de representar múltiplas regiões. Para manter o caráter genérico das outras ferramentas implementadas no MG, sem que restrições tenham que ser impostas ao domínio dos problemas já tratados, era necessário que estas operações booleanas fossem implementadas de forma que quaisquer objetos, em qualquer número e com qualquer dimensão, pudessem ser combinados com outros objetos com as mesmas características, gerando um resultado válido e passível de ser representado topológica e geometricamente pela representação de fronteira do MG.

É fácil notar que para que isto fosse possível, as ferramentas já mencionadas relativas à interseção de superfícies paramétricas e detecção automática de regiões já deveriam estar implementadas no MG, do contrário a generalização requerida não seria possível de ser atingida. Tais ferramentas aliadas a algoritmos geométricos presentes nas bibliotecas utilizadas pelo MG permitiram que o conjunto das operações booleanas pudesse ser implementado de forma razoavelmente simples e extremamente eficiente.

1.1. Motivações e Trabalhos Anteriores

Desde que a primeira versão do MG [8] foi implementada, sempre se buscou manter como meta a simulação de problemas tridimensionais reais de engenharia pelo MEF, através da modelagem geométrica e da geração de malhas de elementos finitos. A versão original já possuía uma interface amigável e eficiente, sendo bastante satisfatória na representação dos modelos geométricos desejados, contudo possuía certas limitações que ao longo do tempo tiveram de ser eliminadas.

Uma destas limitações diz respeito à maneira como foi implementada a sua estrutura interna de dados. Não havia um formalismo desejável para atender a todas as capacidades de modelagem necessárias, de modo que muitas vezes a intervenção do usuário se fazia necessária para que a consistência geométrica do modelo fosse mantida. Na Figura 1.4 pode-se vislumbrar um problema real de engenharia em que a detecção automática de regiões se faz bastante necessária, visto que a determinação explícita dos retalhos de superfície que formam um volume fechado é uma tarefa não-trivial.

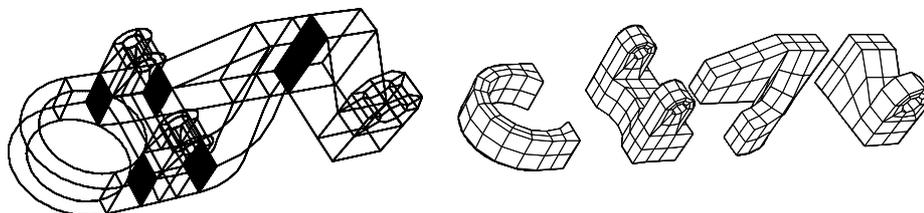


Figura 1.4 – Dificuldade para detecção de multi-regiões [6].

Entre Coelho [8] e Lira [6], pode-se perceber a evolução do modelador MG desde a sua versão original, valendo ressaltar a reestruturação interna do código seguindo o conceito de POO, o que proporcionou ao MG um nível de organização bastante significativo, e a utilização de uma metodologia de representação topológica denominada CGC (*Complete Geometric Complex*) [12], responsável pela criação e manutenção de subdivisões espaciais. Atualmente, o MG pode ser classificado como um modelador de sólidos *non-manifold* [12,13,14,15,16,17,18], pois seu poder de representação não está limitado a sólidos cujas fronteiras são variedades de dimensão 2 (*2-manifolds*). Na representação *2-manifold*, ou simplesmente *manifold* [17], cada porção conexa da fronteira de um sólido (face) é homeomorfa a uma esfera, onde cada ponto

tem uma vizinhança mapeável para um disco bidimensional. A representação é dita *non-manifold* pois é capaz de tratar sólidos com múltiplas regiões (interfaces internas) e porções degeneradas (cascas e arames) de forma consistente. Nestes tipos de sólidos as fronteiras não são homeomorfas à esfera.

Tendo em vista a continuidade do trabalho de Coelho e Lira, surgiu a necessidade de se implementar dentro do MG uma ferramenta de modelagem ainda não presente neste modelador, de forma a tornar o MG um aplicativo mais abrangente em termos de modelagem geométrica tridimensional pelo MEF.

As operações booleanas surgem então como um elemento adicional imprescindível para o conjunto das ferramentas de modelagem, de forma a permitir ao usuário do MG um leque amplo de opções para gerar modelos reais de engenharia.

A possibilidade de se optar pela criação explícita de curvas e retalhos de superfície ou pela combinação de operações booleanas aplicadas a primitivas geométricas simples para produzir um modelo qualquer faz com que o MG passe a ser um aplicativo mais flexível e eficiente para o usuário, o qual passa a ter nas mãos a tarefa de decidir por qual caminho se enveredar, podendo usar critérios pessoais relativos à complexidade do modelo, tempo necessário para a criação do mesmo e número de passos de modelagem aliado ao grau de dificuldade para gerar o modelo, inerentes a cada forma de modelagem.

1.2. Objetivos e Principais Contribuições

Este trabalho se propõe a apresentar um algoritmo genérico para a realização de operações booleanas entre entidades geométricas de qualquer dimensão.

Este algoritmo foi implementado no MG. Para isso, diversas facilidades pré-existentes neste modelador ou em bibliotecas de que ele se utiliza são usadas como elementos-chave para que tal implementação pudesse ser realizada de forma simples, eficiente e robusta. Buscando-se manter a organização interna do código, novas classes foram criadas para que o conjunto das operações booleanas se tornasse uma ferramenta totalmente independente da forma particular de representação de dados do MG. As classes e métodos utilizados pelo algoritmo podem ser facilmente generalizados através dos conceitos básicos de modelagem baseada em representações B-Rep.

Outra preocupação foi a manutenção de uma interface simples que permitisse ao usuário a utilização das operações booleanas da forma mais eficiente possível. Uma nova classe, responsável exclusivamente pela amarração entre as operações booleanas e a interface do programa, foi criada especialmente com este objetivo.

As operações booleanas são realizadas usando conceitos apresentados por Hoffmann [9] e Mäntylä [10], sendo que neste trabalho estes conceitos foram adaptados para que estas operações não precisassem se limitar a sólidos poliedrais *2-manifold* e para permitir que os sólidos pudessem se interceptar antes da aplicação de uma destas operações. A representação *non-manifold* do MG permite que as operações booleanas não regularizadas sejam tratadas. Em modeladores que só são capazes de representar sólidos *manifold*, as possíveis situações *non-manifold* resultantes das operações booleanas têm que ser eliminadas, em um processo que se denomina regularização [9,11].

Algumas facilidades necessárias para que o conjunto das operações booleanas pudesse ser implementado no MG de forma eficaz dizem respeito a algoritmos geométricos de grande utilidade prática, como os de classificação do tipo ponto/sólido e curva/sólido, além de algoritmos de verificação do fechamento de regiões (volumes) e identificação de cada uma destas regiões dado um conjunto de retalhos de superfície. Estes algoritmos encontravam-se disponíveis numa biblioteca de classes baseada na representação CGC, descrita por Cavalcanti [19]. Uma classe auxiliar foi criada no MG apenas para disponibilizar tais métodos para serem utilizados na realização das operações booleanas, fazendo assim a interface entre a CGC e as operações booleanas no MG. Tal classe tem papel crucial na adaptação destes algoritmos geométricos para o contexto do MG, de forma a permitir o uso de retalhos de superfícies curvas.

Podem-se resumir as principais contribuições deste trabalho da seguinte forma:

- Desenvolvimento de um algoritmo genérico para a realização de operações booleanas regularizadas ou não em ambientes de modelagem baseados em representações B-Rep.
- Extensão do algoritmo proposto por Mäntylä [10] de forma a eliminar as restrições inerentes ao universo de representação dos objetos com os quais se deseja trabalhar (superfícies não-poliedrais e sólidos *non-manifold*).

- Apresentação do conceito de Grupo para definir um conjunto de entidades topológicas com qualquer dimensão pertencentes a um mesmo domínio.
- Extensão dos algoritmos geométricos presentes na biblioteca CGC para detecção de ponto em região, ponto sobre superfície ou ponto sobre curva para que curvas e superfícies modeladas com NURBS possam ser consideradas.
- Implementação do algoritmo proposto no modelador geométrico tridimensional MG, aumentando assim a sua capacidade de simular com eficiência e rapidez problemas complexos de engenharia.
- Tratamento de casos particulares e patológicos do algoritmo de operações booleanas, permitindo a sua utilização de forma confiável e robusta em uma grande quantidade de problemas.

1.3. **Organização da dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. Este capítulo buscou dar uma visão geral do trabalho desenvolvido e da organização da dissertação.

O Capítulo 2 dá uma visão global do modelador MG e da estrutura interna de dados do mesmo, mostrando a organização sistemática do código baseada no conceito de POO.

O Capítulo 3 descreve o algoritmo proposto neste trabalho, enfatizando todas as generalidades já mencionadas, como a inexistência de restrições quanto ao número de entidades a serem combinadas, a geometria destas entidades, a dimensão das mesmas, e o tratamento de casos patológicos.

O Capítulo 4 mostra como o algoritmo proposto está implementado no MG, apresentando as novas classes criadas, a adaptação dos métodos apresentados no algoritmo à estrutura de dados do MG, o esquema de interface com o usuário e a extensão dos algoritmos geométricos da classe CGC.

O Capítulo 5 ilustra diversos exemplos, detalhando as etapas do processo de modelagem dos objetos criados através das operações booleanas. Neste capítulo também são feitos paralelos entre modelos gerados através da manipulação explícita de curvas e superfícies e através da aplicação de um conjunto de operações booleanas, em termos de tempo de modelagem, dificuldade e número de passos necessários.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais deste trabalho, resumindo sua importância e aplicabilidade e apresentando sugestões para trabalhos futuros.

O Apêndice trata de conceitos básicos referentes à modelagem geométrica de sólidos, apresentando o contexto histórico no qual está inserida, a evolução dos sistemas de modelagem, as formas de representações de sólidos, passando pela topologia como elemento-chave de uma sistema de modelagem e pela importância e aplicação das estruturas de dados topológicas.