

Uma Metodologia para Posicionamento de Prédios em Terrenos Acidentados

JÚLIO GUIDO OLIVEIRA MILITÃO¹
PAULO CEZAR PINTO CARVALHO²

¹DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO
R. Marquês de São Vicente, 255, 22451-041 Rio de Janeiro, RJ, Brasil
militao@inf.puc-rio.br

²IMPA-INSTITUTO DE MATEMÁTICA PURA E APLICADA
Estrada Dona Castorina, 110, 22460-320 Rio de Janeiro, RJ, Brasil
pcezar@impa.br

Abstract. This paper presents a methodology for positioning buildings on irregular terrain. The combination of terrain models (given by meshes) with buildings, represented by polyhedral models, is implemented. The system uses interactive tools to allow users to view and manipulate the objects in the scene.

Keywords: Computer Graphics, Image Processing, Digital Terrain Modeling.

1 Introdução

O crescimento desordenado das cidades está, cada vez mais, revelando a necessidade de ferramentas que auxiliem no Planejamento Urbano e no monitoramento da Infraestrutura Básica dos centros urbanos.

A primeira etapa para a realização de um planejamento urbano é a realização do estudo da viabilidade de edificação na área alvo. Tal viabilidade se caracteriza pela identificação dos aspectos geotécnicos e topográficos desta área.

Este trabalho discute o uso de ferramentas de Computação Gráfica no suporte a este tipo de estudo de viabilidade. O objetivo é fornecer valores quantitativos e imagens da área após a inclusão *virtual* dos prédios no terreno modelado.

Aplicações com estas características precisam utilizar modelos de naturezas diversas na representação do terreno e dos objetos a serem posicionados. O estudo de tais modelos híbridos só agora começa a ser explorado [Danahy-Hoinkes 1995], já que a literatura, de um modo geral, se concentra sobre técnicas isoladas.

Como contribuição básica este artigo apresenta um método para combinação de terrenos modelados por malhas planares e objetos modelados por prismas retos, que representam prédios e acessos.

2 Metodologia

A metodologia adotada para alcançar as metas descritas anteriormente consiste em quatro etapas fundamentais. São elas:

- Aquisição da Topografia
- Modelagem do Terreno e dos Objetos a Posicionar no Terreno
- Posicionamento dos Objetos no Terreno
- Visualização

Descrevemos a seguir cada uma destas etapas.

3 Aquisição da Topografia

Representar computacionalmente a topografia de um terreno significa descrever sua superfície através de uma função que forneça a elevação de cada ponto do terreno a partir de suas coordenadas horizontais. Isto é, uma função da forma

$$z=f(x,y)$$

onde, dependendo das dimensões do terreno considerado, x e y podem ser coordenadas cartesianas expressas numa unidade adequada (em quilômetros por exemplo), ou coordenadas geográficas (latitudes e longitudes).

Esta representação é uma simplificação da realidade pois não podemos, com ela, representar túneis, cavernas e outros acidentes geográficos. Para poder representar todos os tipos de terrenos, é necessário adotar modelos sólidos. No entanto, na maioria dos casos, a representação acima é adequada e menos complexa computacionalmente do que uma representação sólida.

A representação em computador da função f descrevendo a superfície do terreno apresenta dificuldades. Ter a função f representada significa ter um processo através do qual, dadas as coordenadas x e y de qualquer ponto, a cota z pode ser obtida. No entanto, apenas uma quantidade finita de informações pode ser usada para descrever f . Como a superfície de um terreno é complicada demais para ser expressa por uma única expressão matemática e o armazenamento das cotas de cada ponto do terreno não é possível, é necessário descrever f através de uma aproximação. A esta aproximação de f dá-se o nome de Modelo Numérico de Terreno - MNT, ou ainda, Modelo Digital de Terreno - MDT.

O processo para obtenção de um MNT, de um modo geral, passa por 3 etapas: (1) obtenção de uma amostra de pontos (x,y,z) do terreno; (2) decomposição da superfície do terreno em sub-regiões simples (triângulos por exemplo) e (3) obtenção de uma função f , normalmente polinomial por partes, que descreve uma aproximação do terreno para cada uma destas sub-regiões. O caso mais comum é de funções lineares por partes, o que significa aproximar o terreno por uma superfície poliédrica.

As técnicas usadas nos dois últimos passos do processo delineado acima dependem do tipo de amostra obtida no primeiro passo. Neste trabalho consideramos três tipos de amostras classificadas segundo sua distribuição espacial e a conectividade entre as observações:

Amostra Regular, em que as observações estão dispostas numa grade retangular sobre o terreno;

Amostra Irregular, formadas por uma coleção de pontos (x,y,z) distribuídos irregularmente sobre o terreno;

Amostra obtida a partir de Curvas de Nível, em que as observações são dispostas em curvas que descrevem a superfície nas várias cotas. É o tipo de amostra obtida a partir de mapas topográficos.

3.1 Aquisição de Amostra Regular

Uma amostra regular é tipicamente obtida através do tratamento de levantamentos aerofotogramétricos (em geral utilizando estereoscopia [Anderson 1982]) ou através da conversão de outro tipo de amostra.

O formato TAME (Terrain Access Made Easy), por exemplo, fornece dados topográficos do globo terrestre estruturados numa grade regular.

3.2 Aquisição de Amostra espaçada Irregularmente

Amostras irregulares surgem naturalmente em levantamentos topográficos realizados em campo. Podem ser originadas da conversão de outros tipos de representação, tais como mapas de declividade e mapas de isolinhas.

Quando os levantamentos em campo são realizados segundo linhas pré-definidas, como drenagens ou estradas, a amostra resultante é chamada de semi-regular.

3.3 Aquisição de Amostra Organizada em Curvas de Nível

Os mapas de curvas de nível em papel são as principais fontes deste tipo de amostra. A aquisição destas amostras envolve uma etapa de conversão dos dados para um formato digital. Esta conversão pode ser realizada segundo dois processos (figura 1): um manual e outro semi-automático.

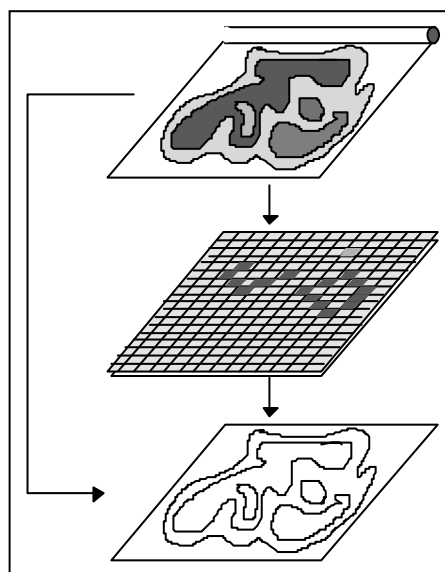


Figura 1: Processos para aquisição das Curvas de Nível

O processo manual de conversão é baseado na digitalização individual de cada contorno. A digitalização é realizada com o auxílio de uma mesa digitalizadora e um mecanismo apontador (mouse). Assim, cada curva do mapa é percorrida em sua totalidade e, ao final, fornecido o valor da cota pelo teclado. Como resultado do processo, um arquivo contendo as linhas digitalizadas e suas cotas é gerado.

O processo semi-automático envolve duas etapas: a rasterização do mapa e a vetorização da imagem obtida. Na primeira etapa, o mapa é convertido através de um scanner em uma imagem digital. Na etapa seguinte, as

curvas são identificadas a partir da imagem gerada pelo passo anterior [Militão 1995].

4 Modelagem do Terreno

Qualquer dos tipos de amostra descrito na seção anterior fornece os valores de $z=f(x,y)$ em um pequeno subconjunto do domínio. O próximo passo é estender estes valores para todo o domínio de modelagem. O problema a ser resolvido é o de obter uma superfície que aproxime ou interpole os pontos amostrais dados. Neste trabalho, optamos por considerar superfícies interpolantes poliedrais; isto é, superfícies lineares por partes que contêm os pontos dados. Como cada uma das faces planares da superfície a ser obtida fica completamente caracterizada a partir de três de seus pontos, o problema de obter tal superfície pode ser reduzido ao de obter uma triangulação apropriada para os pontos amostrais projetados no plano xy .

Os diversos tipos de amostra discutidos na seção 3 dão origem a problemas de triangulação com diferentes graus de estruturação.

Quando a amostra é regular, é natural optar por um esquema regular de triangulação, como o da figura 2. Isto dispensa uma estrutura de dados para armazenar a triangulação, implicitamente armazenada na grade de valores. Se o ambiente de modelagem exigir a construção explícita da triangulação, será necessário aplicar um algoritmo de subamostragem, convertendo a amostra em uma amostra irregular, já que amostras regulares tipicamente possuem um grande volume de observações.

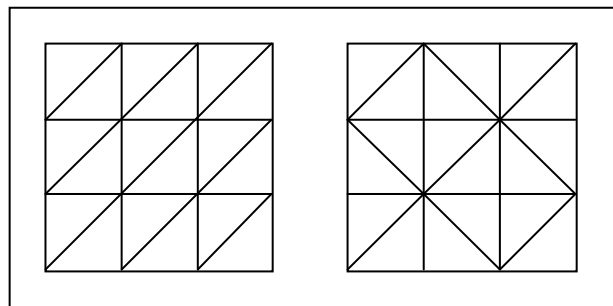


Figura 2: Esquema Regular de Triangulação

O problema de construir uma superfície com base numa amostra irregular é o problema clássico de triangulação de um domínio do plano. O objetivo aqui, porém, é o de obter uma superfície tão suave, quanto possível, evitando-se simultaneamente a ocorrência de triângulos finos. Para tanto, é necessário levar em consideração a cota de cada observação no algoritmo de triangulação.

É comum, no entanto, ignorar a cota dos pontos e concentrar atenção em obter uma boa triangulação do

ponto de vista da projeção. A triangulação de Delaunay [Carvalho-Figueiredo 1991] é uma das triangulações que tem as propriedades desejáveis.

Quando a amostra é semi-regular, determinadas arestas devem estar obrigatoriamente presentes e o problema resultante é o de triangulação com restrições. A triangulação de *Delaunay* com restrições é freqüentemente adotada nestes casos [Dyn et al 1990], [De Floriani-Puppo 1992].

A construção de uma superfície usando curvas de nível pode recair nos casos anteriores, tomando as observações ao longo de cada curva como observações isoladas ou gerando, por interpolação, uma amostra regular.

Existem, no entanto, métodos que exploram explicitamente a organização da amostra em curvas de nível e permitem a obtenção de melhores resultados. Tais métodos se baseiam no tratamento de quatro problemas básicos [Meyers et al 1992]: o problema de correspondência entre curvas adjacentes; o problema de composição da superfície (*tilling*); o problema de *branching* e o problema de ajuste da superfície.

5 Modelagem dos Objetos a Posicionar no Terreno

Consideramos dois tipos de objetos a serem posicionados no terreno: as edificações e os acessos. Cada um dos objetos requer uma representação específica. Isto é necessário devido ao impacto diferenciado que tais objetos exercem sobre a topografia do terreno

Edificações são naturalmente representadas por modelos sólidos. Já para os acessos, admitimos que os mesmos estejam contidos na superfície do terreno; portanto podemos defini-los através de sua projeção no plano horizontal.

5.1 Representação para as Edificações

As edificações compreendem quaisquer objetos que sejam caracterizados por uma fundação e uma construção. Os exemplos típicos são casas, prédios, templos e monumentos. As edificações são os objetos que fornecerão ao usuário dados numéricos relevantes para a análise de viabilidade.

Neste trabalho, as edificações são representadas, de modo simplificado, através de prismas retos. A base de cada prisma é um polígono definido pela fronteira da projeção da edificação no plano XY . A altura do prisma é definida pela altura total da construção, equivalente à medida tomada da base da fundação ao ponto mais alto da edificação.

5.2 Representação para os Acessos

Os acessos são objetos que compoem a malha viária, como ruas e calçadas. Um acesso é um objeto que se deseja inserir na cena para prover uma maior aproximação da realidade e auxiliar no posicionamento dos prédios. Além de elemento visual, os acessos contribuem para a área ocupada da cena.

Um acesso é representado por uma poligonal, que representa o eixo da rua, com um atributo adicional que define a largura da faixa associada.

6 Posicionamento dos Objetos no Terreno

Quando um objeto (edificação ou acesso) é posicionado no terreno, a malha representante do mesmo deve ser atualizada para acomodar os novos objetos. Isto requer a subdivisão da malha onde o objeto se insere, através da inserção de arestas que representam a interseção da superfície lateral do objeto com a superfície do terreno.

A execução eficiente deste tipo de operação depende fundamentalmente da estrutura de dados utilizada para representar o terreno. Inicialmente, cogitou-se de representá-lo através de uma simples lista de faces. No entanto, o uso de tal tipo de representação se mostrou desaconselhável por não permitir tratar a inclusão de objetos de forma local, já que seria necessário percorrer toda a lista para identificar as faces afetadas pela inclusão de um novo objeto. Deve-se frisar que, tipicamente, o número de faces afetadas é muito pequeno em relação ao número total de faces do modelo.

Por esta razão, julgou-se importante recorrer a uma estrutura de dados topológica para armazenar o modelo do terreno. Tais estruturas se caracterizam por manter informações de adjacência entre os elementos topológicos (vértices, arestas e faces) da superfície.

A representação escolhida foi a estrutura de dados *Half-Edge* [Mäntylä 1988] implementada pela biblioteca HED [Celes et al. 1994], desenvolvida pelo Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio - TECGraf. Esta biblioteca representa uma subdivisão planar e implementa todos os algoritmos geométricos e topológicos de uma subdivisão incremental. Sua principal vantagem é que a estrutura topológica é gerada automaticamente a partir da geometria da subdivisão. Para as finalidades deste trabalho, no entanto, é necessário adicionar a cada vértice um atributo representando sua altura no modelo de terreno, já que a biblioteca HED lida apenas com a projeção da malha.

6.1 Manutenção da Integridade da Malha

É de fundamental importância que a malha do terreno não se altere à medida que objetos sejam movimentados na sua superfície. O método adotado neste trabalho permite a adição e remoção de objetos e sua movimentação cumulativa sem comprometer o modelo original.

Para tal, são identificadas duas operações básicas: a inserção e a remoção de um objeto. O deslocamento de um objeto de uma posição para outra é realizado através de uma remoção seguida por uma adição.

A biblioteca HED fornece suporte para a inclusão e a remoção de arestas na estrutura de dados que representa a projeção da malha do terreno no plano horizontal. No entanto, os vértices criados quando da inclusão de uma aresta não são automaticamente removidos quando ela é retirada. Para que isto ocorra (e portanto para que a malha possa ser restaurada à sua estrutura original), cada elemento topológico da malha deve ser classificado como pertencente a um objeto, ao terreno ou a ambos (figura 3). Quando da remoção de um objeto, os elementos topológicos a ele pertencentes são removidos e os elementos pertencentes ao terreno são restaurados.

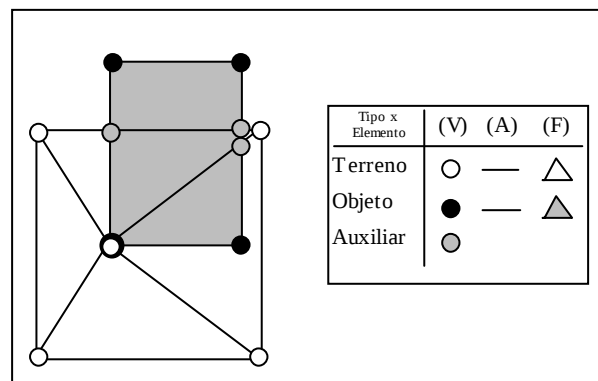


Figura 3: Identificação dos Elementos Topológicos da Malha

Descrevemos abaixo os processos de inserção e remoção de objetos em mais detalhes.

6.1.1 Inserção de um Objeto no Terreno

O processo de inserção se encarrega de realizar a subdivisão da malha que representa o terreno, de forma a acomodar o novo objeto. A subdivisão da malha consiste no particionamento das faces que interceptam as arestas do objeto e a posterior identificação dos elementos topológicos criados ou modificados.

Nesta fase do processo de inserção, os vértices (v) do contorno do objeto a serem posicionados são

tomados em projeção, no plano XY. Os vértices projetados serão chamados de *pontos*. Assim, os *pontos* do objeto delimitarão a região da malha que deve sofrer a subdivisão. Cada *ponto* deve ser inserido na malha do terreno, pois faz parte da nova subdivisão da malha.

O processo de inserção de cada objeto é realizado em três passos, segundo a figura 4: (i) a inserção dos *pontos* do objeto na malha; (ii) a inclusão das arestas que ligam os *pontos*; e (iii) a identificação de arestas e faces internas ao objeto.

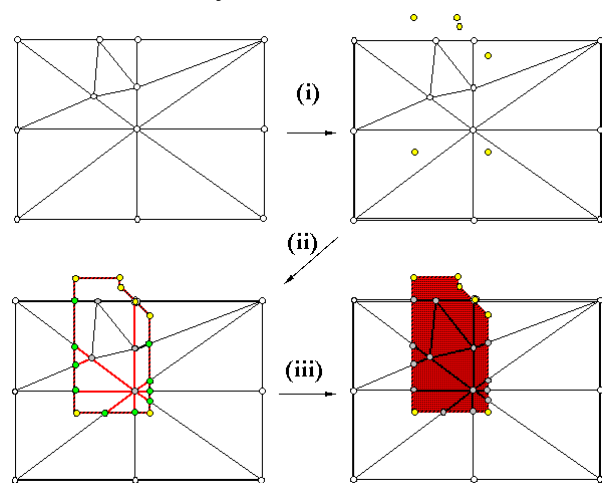


Figura 4: Inserção de um Objeto no Terreno

No primeiro passo existe a possibilidade do *ponto* incidir em um vértice, uma aresta ou face da malha. Esta incidência é detectada pela biblioteca HED que utiliza um parâmetro de tolerância definido pelo usuário.

A cota de cada *ponto* inserido deverá ser calculada de forma que o vértice correspondente esteja na superfície do terreno. Assim, quando um *ponto* incidir numa aresta existente, sua cota corresponde ao valor interpolado dos extremos da mesma. Quando o *ponto* incidir numa face, sua cota deverá ser calculada em função do plano da face correspondente.

No segundo passo, é realizada a inserção de arestas, com o cuidado de identificar quais arestas e faces da malha estão sendo subdivididas. Este processo é realizado pela biblioteca HED que informa, à medida que são criados, novos vértices, arestas e faces. Os novos vértices criados serão chamados de vértices auxiliares.

Com a geometria já definida e os novos elementos criados é necessário realizar a identificação dos elementos topológicos criados. Este processo é realizado pelo percorrimento das faces do terreno, verificando geometricamente se os vértices estão dentro do objeto. Em lugar de percorrer exaustivamente todas

as faces, é possível explorar as informações de adjacência da estrutura de dados para limitar a busca às faces que são afetadas pela inserção do objeto.

6.1.2 Remoção de um Objeto do Terreno

O processo para remoção de um objeto do terreno consiste em identificar todos os elementos topológicos da malha que fazem referência a um determinado objeto e, dependendo da sua identificação, removê-los ou restaurá-los para o estado anterior.

A estratégia adotada segue cinco etapas (figura 5): (i) Identificação das faces que pertencem ao objeto e alteração do seu tipo para *terreno*; (ii) Remoção das arestas da borda do objeto; (iii) Alteração do tipo de arestas e vértices interiores ao objeto para *terreno*; (iv) Remoção dos vértices auxiliares; (v) Remoção dos *pontos* do objeto.

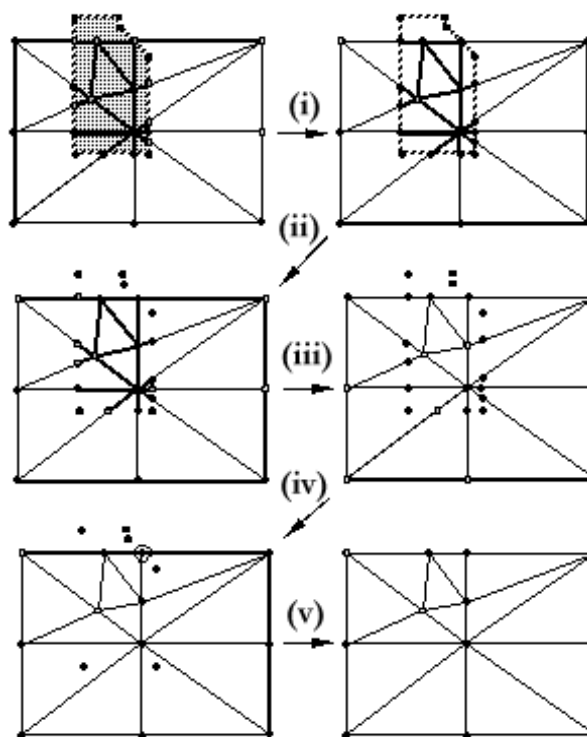


Figura 5: Remoção de um Objeto no Terreno

6.2 Cálculo de Valores Quantitativos

Os valores quantitativos são calculados após o posicionamento de cada objeto no terreno. Isto acontece após a inserção de um novo objeto ou pela modificação de um já existente.

A primeira informação relevante é o cálculo da área ocupada pelos objetos no terreno. Esta área é dada pela soma das áreas da projeção horizontal de todos os

objetos da cena. A área de cada objeto é calculada através da soma algébrica das áreas orientadas dos triângulos $op_i p_{i+1}$ determinados por um ponto fixo arbitrário e dois vértices consecutivos p_i e p_{i+1} do polígono [Carvalho-Figueiredo 1991]. Em geral, é útil apresentar a área ocupada como uma fração da área total do terreno, que pode ser obtida por processo análogo.

Para cálculo do volume, consideramos apenas objetos do tipo edificação. Este volume é calculado com base na porção do objeto “enterrado” no terreno. Entende-se por enterrado a porção que está abaixo da superfície do terreno e acima do plano de base do objeto. Este volume corresponde à quantidade aproximada de solo a ser removida para seu assentamento.

O volume enterrado correspondente a cada objeto é formado por um ou mais troncos de prisma, cada um correspondente a uma face da malha interior ao objeto. O volume enterrado pode ser encontrado através de uma soma algébrica dos volumes orientados de troncos de prismas triangulares definidos por vértices consecutivos de cada face da malha interior (ver [Militão 1995] para maiores detalhes).

7 Visualização

A fase de visualização das informações resultantes da combinação de modelos de edificações e malhas de terreno é fundamental para a análise visual da viabilidade das construções e para a interação do usuário com o modelo.

O sistema trabalha com duas vistas diferentes do modelo. A primeira é uma vista superior da malha, com todas as arestas que compõem o modelo. Nesta vista é possível realizar a movimentação dos objetos no plano XY, e alterar a escala dos objetos.

A outra vista apresenta a cena segundo uma perspectiva definida pelo usuário. Nesta vista é possível, por manipulação direta, movimentar os objetos no eixo XZ (figura 6).

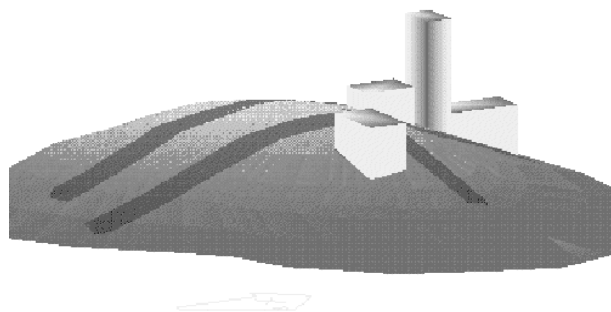


Figura 6: Vista da cena em perspectiva

8 Protótipo

O SYSTER é um protótipo que resultou da implementação das técnicas descritas neste documento. Sua principal característica é o poder de combinar os dois modelos propostos: a malha representante do terreno e os sólidos prismáticos representando as edificações.

A implementação do SYSTER tem características multiplataforma. Atualmente, o sistema está implementado para Silicon Graphics e RS6000, podendo migrar para ambiente SUN e PC. Esta facilidade deve-se às bibliotecas utilizadas.

Para compor a ferramenta utilizamos três bibliotecas auxiliares: o HED [Celes et al. 1994], que mantém a malha do terreno, o OpenGL [Neider-Woo 1993], que fornece ferramentas para visualização de modelos tri-dimensionais, e a biblioteca GLUT [Kilgard 1995], que cria a interface gráfica com o servidor X.

O protótipo é dividido em três módulos: um módulo para aquisição de dados, um módulo para combinação dos modelos e o terceiro módulo para visualização da cena em três dimensões.

Além da ferramenta SYSTER, um editor bidimensional foi implementado para a construção de objetos dentro do ambiente de posicionamento.

A figura 7 mostra uma tela do protótipo, exibindo as duas vistas.

9 Conclusões

A metodologia abordada permite a combinação de sólidos com representações distintas: um terreno, representado por uma malha poliedral é combinado com edificações, representadas por prismas retos. Esta combinação pode ser vista como o resultado de operações *booleanas* de adição e subtração entre os objetos e o terreno.

O uso da biblioteca HED [Celes et al. 1994], desenvolvida pelo TECGRAF, torna simples as rotinas geométricas e topológicas envolvidas na subdivisão da malha em projeção.

Em função das operações realizadas, é possível obter dados numéricos de área ocupada e volume enterrado dos sólidos.

A partir da metodologia definida, um protótipo foi implementado. O protótipo (SYSTER) fornece ao usuário um sistema interativo para o assentamento de objetos (edificações e acessos) em terrenos com dimensões reduzidas.

10 Referências

- Anderson, Paul. *Fundamentos para Fotointerpretação*, Sociedade Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, 1982.
- Carvalho, P. C. P. e Figueiredo, L. H. *Introdução à Geometria Computacional*. Instituto de Matemática Pura e Aplicada - VIII Colóquio de Matemática, 1991.
- Celes Filho, W., Gattass, M. e Carvalho P. C. P. *Gerenciamento de Subdivisões Planares Hierárquicas*. Anais do VII Sibgrapi. Curitiba, 1994.
- Danahy J. , Hoinkes R. *Polytrim: collaborative setting for environmental design*. Tech. Report 118, School of Architecture and Landscaping Architecture, U. of Toronto, 1995.
- De Floriani, L. and Puppo, E. *An on-line algorithm for constrained Delaunay triangulation*. Computer Graphics Models and Image Processing, 54 (3):290-300, julho 1992.
- Dyn, A. Levyn, D., e Rippa S. *Data Dependent triangulations for piecewise linear interpolation*. IMA J. Num., (10):137-154, 1990.
- Kilgard, Mark J. *The OpenGL Utility Toolkit - GLUT. Programming Interface*. Technical Report 2, Silicon Graphics. Março 1995.
- Mäntylä, Martti. *An introduction to Solid Modeling*. Computer Science Press, 1988.
- Militão, J. G. O. *Uma metodologia para Posicionamento de Prédios em Terrenos Acidentados*. Tese de Mestrado. PUC-Rio, novembro 1995.
- Meyers, D., Skinner, S, e Sloan, K. *Surfaces from contours*. ACM Transactions on Graphics, 11 (3):328-258, Julho 1992.
- Neider, J., Davis, T. E Woo, M. *OpenGL Programming Guide*. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.

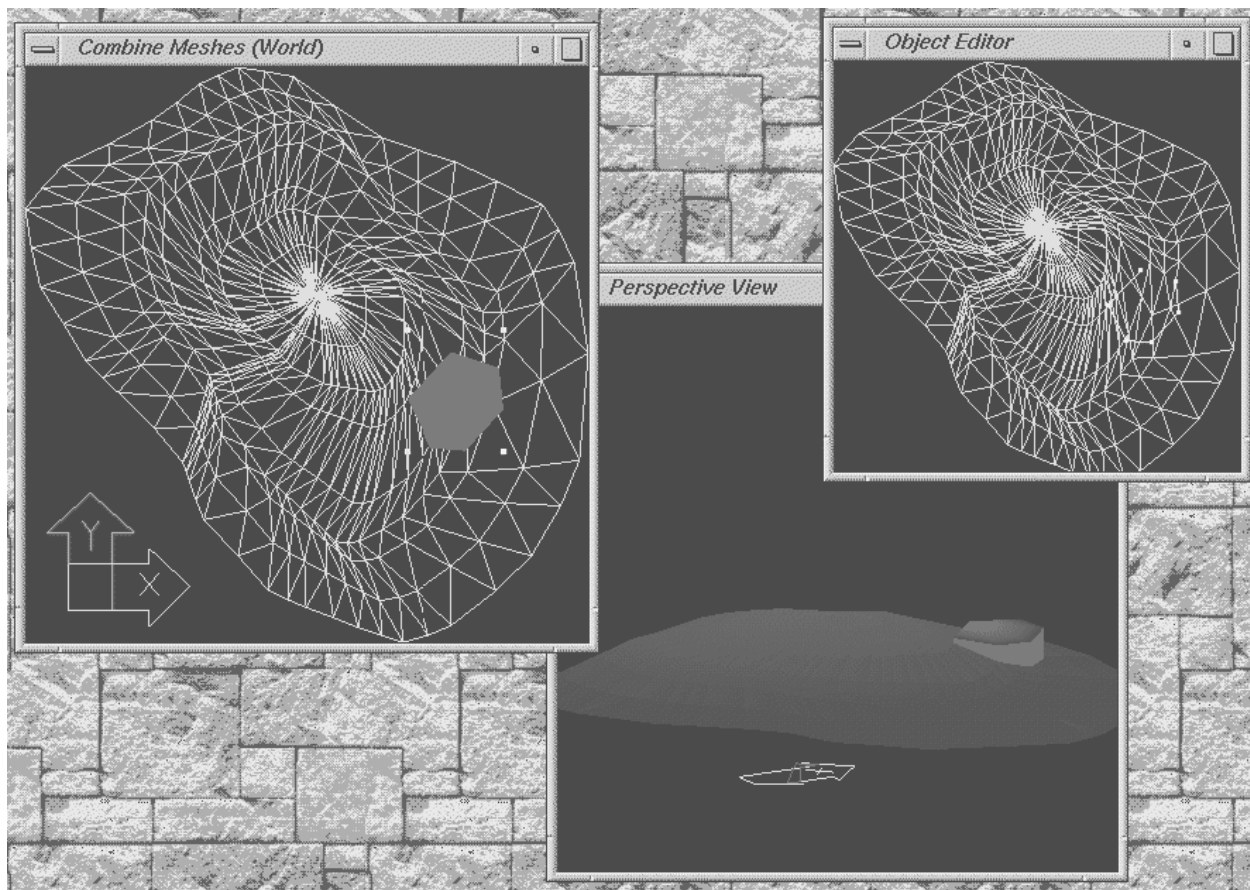


Figura 7. Vistas do Protótipo - SYSTER