

Modelação de Ambientes Rodoviários de Grandes Dimensões

Carlos Campos¹
cjc@isep.ipp.pt

João Miguel Leitão¹
jml@isep.ipp.pt

Carlos M. Rodrigues²
cmr@fe.up.pt

1 Instituto Superior de Engenharia do Porto - R. Dr. António Bernardino de Almeida, Porto

2 Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto - R. Dr. Roberto Frias, Porto

Resumo

As aplicações imersivas em ambientes virtuais extensos e em especial as aplicações de simulação de condução, requerem frequentemente a utilização de modelos de redes rodoviárias de grandes dimensões. Muitas vezes, estes ambientes correspondem à representação de zonas com várias dezenas de quilómetros de extensão e requerem modelações precisas de áreas ou situações reais. A criação destes ambientes, com o detalhe e o realismo adequados, constitui uma das tarefas mais delicadas e consumidoras de recursos na preparação de sistemas imersivos deste tipo.

Este artigo apresenta o trabalho realizado no âmbito da criação de metodologias expeditas para a geração automatizada de ambientes rodoviários de grandes dimensões. A metodologia apresentada permite a utilização directa de especificações incluídas em projectos de estradas e de dados obtidos de Sistemas de Informação Geográfica. A partir da especificação do traçado, do perfil transversal e do perfil longitudinal, as ferramentas desenvolvidas produzem de forma automatizada um modelo 3D de uma via rodoviária ou de uma rede viária complexa. A este modelo poligonal são adicionadas representações da sinalização vertical e horizontal.

O modelo do terreno envolvente é também preparado a partir de mapas de elevação e intervencionado através da realização de taludes de escavação e taludes de aterro de forma a permitir a sobreposição da estrada, tal como acontece com os deslocamentos de terras envolvidos nos trabalhos de construção de estradas reais.

Ambos os modelos são otimizados para visualização interactiva em tempo real, através da aplicação de técnicas de selecção e de variação automática do nível de detalhe.

A metodologia proposta e as ferramentas apresentadas permitem a criação de ambientes rodoviários adequados à simulação de condução de forma rápida e eficiente, como pôde ser comprovado pelas aplicações já efectuadas.

Palavras chave *Simulação de condução, Modelação 3D, Ambientes rodoviários, Nível de detalhe, Simulação Visual, Simplificação de Superfícies.*

1- INTRODUÇÃO

O elevado número de acidentes rodoviários é cada vez mais um factor de preocupação, não só pelos danos materiais, como também pelos danos físicos, agravados muitas vezes pela perda de vidas humanas. Para além das campanhas de sensibilização, maior fiscalização e melhoramento das infra-estruturas viárias, é necessário estudar as verdadeiras causas desses acidentes. Estes estudos podem ser desenvolvidos mediante determinadas condições de teste, por vezes com muitos requisitos. Quando se trata de condições de experimentação em situações críticas de segurança, esses estudos não podem ser efectuados em condições reais, quer devido ao risco potencial que envolvem quer devido ao elevado número de variáveis que seria necessário controlar e monitorizar.

Uma alternativa à realização de experiências de condução em ambiente real é a simulação de condução. Para além de um evidente aumento da segurança que um simulador oferece, permite o controlo e monitorização que seria inatingível em condições de tráfego real.

Os simuladores de condução são cada vez mais uma ferramenta de estudo muito importante, em áreas muito diversas, nomeadamente, na psicologia, ergonomia e na engenharia rodoviária. Em psicologia, os simuladores são importantes para realização de estudos relacionados com a avaliação do comportamento dos condutores, como por exemplo, no estudo da influência da complexidade do ambiente rodoviário na percepção de movimento. Por outro lado, permitem avaliar a interferência da realização de tarefas secundárias, como o uso de telemóvel e a utilização de sistemas de informação de tráfego, na tarefa de condução. Os simuladores são também utilizados em ergonomia, para estudos de sistemas de interacção com o condutor, como por exemplo sistemas de ajuda à navegação (GPS) e sistemas de informação de tráfego. Em engenharia rodoviária, os simuladores de condução possibilitam a realização de estudos de traçado, não só em fase de projecto, permitindo detectar eventuais incongruências do traçado através de experiências realizadas com condutores reais, mas também os existentes. Nas estradas já construídas, o simulador de

condução potencia a realização de estudos de segurança rodoviária, quer no que diz respeito ao tipo de sinalização e respectiva colocação, quer no que concerne ao estudo de outras medidas de baixo custo propiciadoras de melhoria de segurança rodoviária. Por outro lado, os simuladores de condução possibilitam a análise de situações de risco, impossíveis de estudar em ambiente real, e permitem o estudo isolado de um elevado número de variáveis que possam influenciar o comportamento dos condutores, garantindo-se sempre as mesmas condições de realização dos estudos experimentais.

Independentemente do objectivo do estudo, a realização de experiências num simulador de condução exige a prévia preparação dos modelos dos ambientes rodoviários, podendo estes atingir facilmente várias dezenas de quilómetros. Estas grandes dimensões e os elevados requisitos de realismo, tornam a criação destes ambientes rodoviários um processo muito complexo e dispendioso de recursos, caso não se possuam ferramentas adequadas [Campos06].

2- ESTADO DA ARTE

Um modelo de um ambiente virtual com alguma complexidade pode facilmente atingir um número de polígonos que torna impraticável qualquer tentativa de o especificar de forma manual. Para isso, usam-se normalmente ferramentas de modelação que, apesar de permitirem uma redução drástica do esforço necessário, não impedem que o processo de modelação seja considerado como trabalhoso. Um simulador de condução requer a preparação de bases de dados com a descrição de cenas de regiões geograficamente extensas, com estradas correctamente modeladas em função das normas e tradições do país que se pretende simular. Uma vez que as normas de construção viária variam em função do país ou até mesmo da região, cada simulador tenta reproduzir com maior exactidão possível o ambiente de simulação de acordo com a região onde se encontra. Esta especificidade de ambientes dificulta o aproveitamento de desenvolvimentos realizados noutros países, mesmo quando os problemas de compatibilidade técnica se apresentem superáveis.

No simulador de condução LADS, o ambiente rodoviário é criado utilizando o *software* de modelação *MultiGen Creator 2.3* com a opção *RoadTools*, [LADS05]. Pessoal especializado ligado ao simulador utiliza este *software* para a criação do ambiente rodoviário incluindo redes lógicas de estradas (*Logical Road Network(LRN)*). A LRN permite obter dados relativos à condução (i.e posição na estrada, distância percorrida), e controlo de veículos autónomos pertencentes ao ambiente rodoviário.

O simulador de condução VTI possui um sistema proprietário para definir a estrada, a envolvente à estrada e a visualização [VTI06]. O sistema de visualização é baseado em OpenGL e foi implementado pela VTI em C++. A definição das estradas é realizada fornecendo os segmentos de recta, os raios das curvas e os comprimentos dos arcos, permitindo obter a definição do eixo da via. O modelo da estrada e do ambiente envolvente é construído utilizando a trajectória num

sistema de coordenadas referente ao centro da estrada. Todos os objectos no ambiente são criados no *3D Studio Max* e exportados para um ficheiro com a extensão *3ds*. Os objectos são colocados no ambiente dando a distância ao longo da estrada, distância lateral referida ao centro da via e a altura. Considerando que se colocam todos os objectos num sistema de coordenadas em função do eixo da via, é possível mudar a topologia da estrada e ainda manter os objectos colocados na posição certa ao longo da estrada, tornando fácil a criação de qualquer tipo de estrada, nomeadamente urbana. No entanto, este tipo de definição não é bom para criação de cenas em cidade, onde é permitido conduzir livremente, pois obriga a criação integral do ambiente rodoviário; para estes casos é melhor criar a cena num programa tipo *3D Studio* ou outro programa de modelação 3D.

3- GERAÇÃO DE AMBIENTES RODOVIÁRIOS

A metodologia estabelecida para a geração automatizada de ambientes rodoviários de grandes dimensões tenta mapear as tarefas envolvidas nos processos construtivos reais e envolve essencialmente duas tarefas distintas mas interligadas: a alteração do terreno que é realizada pela ferramenta ATC e a construção da estrada que é realizada pela ferramenta ARC2. Para ambas as tarefas, é utilizada, como entrada fundamental, a definição da estrada. Tal como acontece nos projectos reais, esta definição é conseguida através da especificação do eixo da via e do perfil transversal.

3.1- Definição do eixo da via

Em engenharia rodoviária utiliza-se a directriz, definida habitualmente por uma lista de coordenadas e constituída por uma sucessão de alinhamentos rectos e curvos (curvas circulares e clotóides), para definir o traçado em planta (2D). Após a especificação da directriz, define-se o traçado em altimetria, o qual é designado por rasante. A especificação do eixo da via no espaço tridimensional é obtida agrupando a definição de directriz que é definida no plano 2D e da rasante que representa a cota Z. Neste trabalho, os eixos das vias são tratados como polilinhas, representadas por listas ordenadas de segmentos. Em termos de concepção, um segmento de estrada pode ser recto ou curvo, no entanto, na implementação actual, admitem-se apenas segmentos rectos, existindo portanto a necessidade de decompor os arcos de circunferência e as clotóides em sequências de vários segmentos de recta. Desta forma, a polilinha pode ser representada apenas pelas coordenadas dos nós de ligação entre os segmentos adjacentes, como se pode ver na figura 1.



Figura 1. Polilinha

Esta especificação permite obter facilmente uma base de dados que contém informação vectorial da via. Este tipo de informação é fundamental para consulta durante a simulação de condução. Na visualização, em caso de

rectas com elevadas extensões, estas podem ser definidas apenas por dois pontos; nesse sentido implementou-se um filtro que elimina pontos segundo um critério de erro, sem perda de qualidade do modelo.

3.2- Perfil transversal

A especificação do perfil transversal permite definir com pormenor o modelo de estrada. Em engenharia rodoviária esta especificação é realizada ao longo da via, definindo perfis transversais com espaçamento de 25 metros. Na implementação actual considera-se que o perfil transversal é constante para uma via completa. Esta homogeneização não limita a liberdade do projectista na concepção da via, uma vez que é sempre possível dividir uma via que se pretende não homogénea em partes homogéneas. Uma estrada urbana normalmente é composta por uma faixa de rodagem única com duas vias, bermas e passeios laterais. A especificação do perfil transversal faz-se portanto pela indicação das larguras de cada um destes componentes e ainda pela definição do tipo de pavimento. Associada ao tipo de pavimento é seleccionada a textura a mapear ao longo da via. Para cada via o utilizador especifica a imagem de textura a aplicar ao modelo poligonal e a sua dimensão.

3.3- Construção da estrada

A metodologia proposta para a construção da estrada implica percorrer todos os nós da polilinha que define o eixo da estrada e já descrita numa secção 3.1. Para cada nó, são determinados todos os vértices dos polígonos que compõem a estrada através da aplicação das distâncias definidas pelo perfil transversal segundo a direcção normal ao eixo da via nesse ponto.

Na figura 2, ilustra-se o cálculo dos vértices dos polígonos que compõem a via. Como aí se observa, o vector resultante da soma do vector v_1 com o vector v_2 , permite obter a direcção normal. Segundo esta direcção encontram-se os vértices P_1 e P_2 .

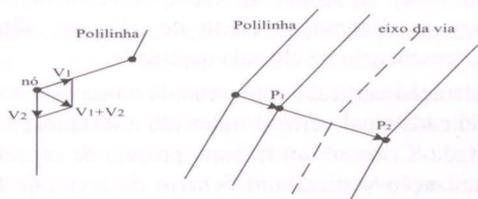


Figura 2. Cálculo dos Vértices

A determinação destes vértices pode introduzir uma inclinação lateral do pavimento da via, tendo em conta os dados de sobre-elevação especificados no projecto.

Com a informação do ângulo de sobre-elevação calculam-se as cotas dos vértices dos polígonos que compõem a via. O valor da cota Z do vértice é dado pela seguinte função:

$$Z_{\text{vertice}} = Z_{\text{eixodavia}} + L_{\text{arguradavia}} * \text{sen}(\alpha) \quad (1)$$

Os vértices obtidos são depois utilizados para criar a malha triangular que representa a superfície da estrada, como se ilustra na figura 3.

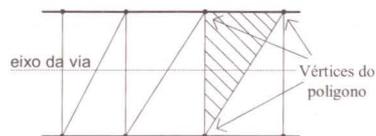


Figura 3. Malha triangular

Estas tarefas podem ser realizadas de forma automatizada através da aplicação ARC2, desenvolvida especialmente para a criação de ambientes rodoviários para simuladores de condução.

3.3.1- Ferramenta ARC2

A ferramenta ARC2 (Auto-Road Constructor 2) permite obter um modelo de estrada a partir de um conjunto de dados de entrada, baseando-se essencialmente na definição de eixo da via e de perfil transversal [Campos03]. A estrutura dos dados de entrada é compatível com a informação disponível quer num projecto de estradas, quer em levantamentos topográficos, quer ainda da que resulta da recolha com veículo instrumentado ou de qualquer outra especificação. A informação apresentada pode ser facilmente tratada com ferramentas disponíveis de forma a compatibilizar com o formato de entrada da ferramenta. Desta forma, o preparador de uma experiência pode facilmente especificar ou editar o perfil da estrada interactivamente, visualizando de imediato o resultado à saída da ferramenta ARC2. Por outro lado, a ferramenta ARC2 foi desenvolvida considerando uma frequente utilização por utilizadores não especializados em sistemas informáticos. A metodologia de especificação adoptada possibilita uma aprendizagem rápida e intuitiva pelo utilizador, sendo fácil compreender a sintaxe de especificação e ficar familiarizado com os termos utilizados. Muitas vezes o modelo é sujeito a inúmeras alterações, resultantes do processo de especificação de projecto, podendo-se verificar de imediato os resultados da alteração.

Para efectuar a gravação do modelo para ficheiro apenas é necessário activar o parâmetro de gravação ao iniciar a aplicação, sendo o modelo gravado automaticamente. A aplicação grava o modelo para um ficheiro do tipo *.pfb, sendo um formato suportado pelo OpenGL Performer [Performer06].

Para criar o modelo da estrada é necessária a definição do eixo da via e o perfil transversal; com essa informação gera-se o modelo 3D da via, como se pode observar na figura 4.

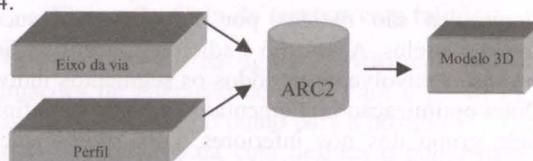


Figura 4. Arquitectura ARC2

O ambiente de simulação é especificado num ficheiro de texto com a extensão wdf (World Description File). Com um vulgar editor de ficheiro de texto é possível criar ou editar um modelo de ambiente rodoviário. De forma a agilizar o processo de especificação e facilitar a organização de modelos de estradas, a informação do ambiente rodoviário encontra-se toda reunida num único

ficheiro. Desta forma, para uma determinada estrada, no ficheiro de definição de ambiente rodoviário, pode-se encontrar informação sobre perfil transversal, sinalização horizontal, sinalização vertical, muros e outros objectos. Esta organização permite facilmente identificar e estruturar todo o perfil de um ambiente rodoviário de forma fácil e amigável.

A malha poligonal que representa o eixo da via é implementada através de estruturas de dados OpenGL Performer, com primitivas do tipo *PFGS_TRISTRIPS*.

Em situações de recta não é necessário ter uma elevada concentração de polígonos para visualizar a via. Nesse sentido, utiliza-se passo adaptativo para a visualização do modelo de estrada. Como acontece com outros sistemas, em recta, o número de polígonos gerados é inferior relativamente a situações de curva [Bayarri98]. Após obter o modelo poligonal da via, a etapa seguinte consiste em mapear uma textura sobre os polígonos, de modo a obter uma visualização da estrada mais realista, como se pode observar na figura 5.



Figura 5. Modelo da via

O processo de mapeamento consiste na especificação das coordenadas 2D de textura para cada vértice. O *OpenGL Performer* possui, na sua base de bibliotecas, estruturas de dados específicas para a representação de modelos construídos a partir de cadeias de polígonos. Os dados calculados anteriormente são guardados em estruturas do tipo *pfGeode*.

Para acelerar o processo de geração de imagem em tempo real, foi considerada a variação do nível de detalhe e a hierarquização espacial. Assim, o modelo da via é construído considerando a espacialização do modelo e a representação por variação de nível de detalhe. A hierarquia do modelo da estrada consiste em sectionar o modelo global da estrada em segmentos mais pequenos. À medida que os segmentos vão sendo construídos, estes vão sendo agrupados entre si, que por sua vez agrupa conjuntos de segmentos, construindo uma árvore hierárquica do modelo da via. Nos nós inferiores da árvore encontram-se os modelos de todos os segmentos de estrada considerados. Os nós superiores da árvore hierárquica são obtidos por agrupamentos sucessivos destes modelos. A cada nó é adicionada informação sobre o volume envolvente de todos os segmentos individuais. Outra optimização implementada consiste na definição de cada grupo dos nós inferiores, com representações de detalhe distintos. O nível de detalhe mais elementar consiste na visualização da via. O nível seguinte considera a visualização da via e a visualização da sinalização horizontal. No último nível de detalhe considera-se todo o ambiente rodoviário. A função de avaliação implementada baseia-se sempre na distância ao observador.

3.3.2- Sinalização

A sinalização horizontal, constituída por marcas rodoviárias, pode ser definida por uma linha de guia, linha lateral que delimita a faixa de rodagem, ou por uma linha axial, que faz a separação entre as diferentes vias, podendo ser de vários tipos: contínua, descontínua ou mista. A sintaxe de especificação de uma linha engloba a definição de tipo de linha, largura, início e fim de representação, cor, e no caso de linhas descontínuas a relação espaço/traço. Para que a especificação da sinalização horizontal seja uma tarefa simples, desenvolveu-se um formato próprio, que permite ao utilizador introduzir de forma fácil todos os dados relativos às marcas rodoviárias. A sinalização horizontal é especificada numa lista ordenada de separadores associados à estrada. Desta forma, é simples editar a sinalização sem que para isso seja necessário redefinir todo o ambiente. A ferramenta para geração do modelo das linhas cria uma base de dados ordenada da sinalização horizontal de forma a permitir a consulta em tempo real. A consulta pode ser efectuada por agentes autónomos para ajuda de tomada de decisão ou para a produção de relatórios.

A visualização da sinalização horizontal prevê a construção de polígonos ao longo da estrada. Para obter os polígonos da linha aplica-se um procedimento semelhante ao usado na construção da via, que consiste em percorrer a polilinha e, em cada nó, calcular os vértices dos polígonos que formam a linha. Na sinalização horizontal apenas se utilizam polígonos com cor, não sendo realizada a tarefa de texturização. Desta forma, obtêm-se um modelo igualmente realista com menos peso computacional na simulação em tempo real. De forma a facilitar a detecção de visibilidade, para a representação das linhas de sinalização horizontal juntamente com a hierarquização espacial da via, é utilizada uma técnica de representação hierárquica em camadas, designada por *layers*. Ao definir que a camada da sinalização horizontal se sobrepõe ao modelo da via, consegue-se diminuir o efeito de *aliasing*, obtendo-se uma representação de elevada qualidade.

A sinalização vertical é representada numa lista ordenada, estando cada sinal vertical indexado à distância à origem da estrada. Criou-se um formato próprio de especificação da sinalização vertical, em ficheiro de texto, de forma a tornar a tarefa de especificação mais simples e amigável para o utilizador. Os sinais verticais estão referenciados à distância à origem, medida no sentido longitudinal e segundo o eixo (localização longitudinal), assim como à distância perpendicular ao eixo da via (localização transversal). Os modelos 3D dos sinais verticais podem ser facilmente obtidos com qualquer *software* de modelação. Por outro lado, existem bases de dados com modelos de sinalização previamente modelados. Para além da especificação da posição longitudinal ao longo da via e da posição transversal, é possível efectuar uma rotação do modelo em torno de si mesmo (eixo dos ZZ) e uma elevação no eixo dos ZZ. Esta aplicação permite orientar a superfície visual do sinal de forma a aumentar a sua visibilidade por parte do condutor. O ângulo zero

corresponde à posição original do modelo, afectado apenas pela orientação do segmento da estrada.

O ambiente rodoviário é composto por inúmeros objectos envolventes, tais como, árvores, casas, arbustos, postes de iluminação e sinalização informativa. Desenvolveram-se funcionalidades para a criação do ambiente rodoviário, considerando-se a colocação também de objectos envolventes. A especificação de objectos é simples, pois foi desenvolvido um formato próprio e idêntico ao da sinalização vertical. Muitas vezes, a especificação de objectos é referente a um objecto que se repete ao longo da estrada com espaçamento constante, como é o caso dos postes de iluminação. Para simplificar a especificação de conjuntos de objectos deste tipo, desenvolveu-se uma sintaxe própria para objectos repetitivos com espaçamento constante. A colocação da sinalização vertical assim como a colocação dos objectos tem em consideração o modelo de terreno. Ao colocar o sinal ou objecto, este é posicionado tendo em consideração a cota do terreno.

Para além da colocação de objectos envolventes ao ambiente rodoviário, é comum encontrar zonas do percurso em que existe a presença de muros laterais. Desenvolveu-se uma funcionalidade que permite a criação de uma parede texturada ou não ao longo da estrada, de um ou ambos os lados. O processo de geração do modelo de muro é equivalente ao da geração do modelo da estrada. A polilinha é percorrida e, para cada ponto, são calculados os vértices dos polígonos que formam o muro. Após a criação dos polígonos do muro é mapeada a respectiva textura.

Adicionalmente desenvolveram-se ferramentas de edição de definições de eixos da via (polilinhas), que efectuem colagens e deslocamentos no espaço, permitem, de forma fácil, a criação de uma rede viária de grandes dimensões. As redes viárias criadas podem ser para visualização em tempo real ou para consulta vectorial por agentes autónomos do ambiente rodoviário [Leitão00]. A ferramenta *TransRoad* foi desenvolvida para efectuar transformações geométricas no espaço de polilinhas. Esta ferramenta permite efectuar deslocamentos no espaço de um modelo integral de uma polilinha segundo um vector, rotação em torno da sua origem e offset de uma determinada distância. A funcionalidade de *offset* é utilizada para obter uma polilinha paralela à original, normalmente utilizada em ambiente rodoviário com veículos autónomos. A ferramenta *GlueRoad* foi desenvolvida para efectuar colagem entre polilinhas, formando uma polilinha com dimensões superiores, utilizando as funcionalidades da ferramenta *TransRoad*. A ferramenta *GlueRoad* determina automaticamente a rotação e o deslocamento que deve efectuar, para garantir que os segmentos de união das duas polilinhas fiquem perfeitamente alinhados.

3.4- Edição do terreno

Para adaptar um terreno à passagem de uma estrada, é necessário dispor da definição original do terreno e da especificação da estrada que se pretende implementar.

A metodologia utilizada consiste em percorrer todos os vértices da malha poligonal que define o terreno e, para cada vértice, é efectuada a verificação sobre a necessidade de alteração da cota do terreno.

Para isso, para cada ponto do terreno, calcula-se a distância mínima à estrada e, em função dessa distância, determina-se a necessidade de alterar a cota do ponto de terreno. Se a distância do ponto ao eixo da via (D_p) for menor ou igual à largura da via (D_v), considerando a especificação de sobrelevação a cota do ponto é determinada pela seguinte equação:

$$Z_{\text{ponto}} = Z_{\text{eixodavia}} + D_p * \tan(\alpha) \quad (2)$$

Como se pode ver, no exemplo da figura 6, o ângulo de sobrelevação (α) da via é positivo e a distância do ponto do terreno ao eixo da via (D_p) é menor que a largura da via (D_v). Neste caso, o ponto do terreno inicialmente com posição em P_o , é deslocado para a posição P_f .

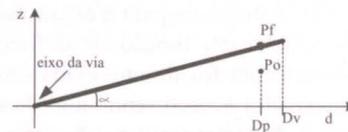


Figura 6. Cota do terreno

Como se pode ver na imagem da figura 6, após esta alteração, a cota do terreno fica igual à cota da via, na zona da plataforma da via. Na prática, a via pode ser colocada ligeiramente acima da cota do terreno para evitar problemas na detecção de visibilidade. Quando a distância do ponto do terreno ao eixo da via é superior à largura da via, são consideradas as definições de talude de escavação e de talude de aterro. Para a especificação destes tipos de taludes é comum utilizar diferentes inclinações, variáveis com o tipo de terreno: mais acentuadas em terrenos rochosos e menos íngremes em solos incoerentes. Os valores padrão de declive para este tipo de construções são dados por $\tan \beta = 1/1,5$.

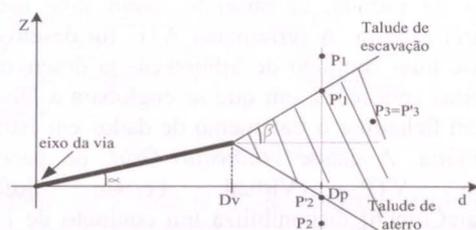


Figura 7. Cota do terreno com taludes

Como se pode observar na figura 7, estão representadas duas situações de alteração de cota. Para o ponto P_1 , a alteração da cota desloca o ponto para a posição P'_1 . Para o ponto P_2 , a alteração da cota desloca o ponto para a posição P_2 . Para o ponto P_3 , este mantém-se na sua posição original, uma vez que se encontra entre as definições dos taludes. Para determinar se a cota deve ser alterada são calculados dois valores possíveis para a cota do ponto do terreno, um para o caso do talude de escavação e outro para o caso do talude de aterro. A cota do ponto do terreno para o caso do talude de escavação é dada pela seguinte equação:

$$Z_{escavação} = Z_{eixodavia} + D_v * Tan(\alpha) + Tan(\beta) * (D_p - D_v) \quad (3)$$

Se a cota actual do ponto do terreno for superior ao valor calculado para o talude de escavação, então, a cota é actualizada com o valor calculado para o talude de escavação.

A cota do ponto do terreno para o caso do talude de aterro é dada pela seguinte equação:

$$Z_{aterro} = Z_{eixodavia} + D_v * Tan(\alpha) - Tan(\beta) * (D_p - D_v) \quad (4)$$

Se a cota actual do ponto do terreno for inferior ao valor calculado para o talude de aterro, então a cota é corrigida para o valor da cota de talude. A cota do ponto do terreno não é alterada se estiver posicionada entre as definições dos taludes, o que corresponde à área assinalada a vermelho na figura 7.

3.4.1 Ferramenta ATC

A ferramenta ATC é utilizada para a alteração automática do modelo do terreno em função da definição de uma estrada. Esta ferramenta foi desenvolvida em linguagem orientada a objectos C++, recorrendo a bibliotecas DriS e VTP. A finalidade da ferramenta é a de gerar um modelo de terreno condicionado pela passagem de uma rede de estradas. Para tal o módulo ATC terá duas entradas, uma para o modelo de terreno original e outra para a especificação da estrada, como se pode observar na figura 8.

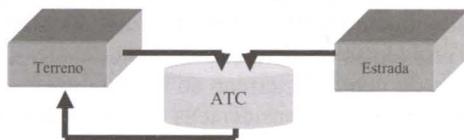


Figura 8. Arquitectura ATC

Como também se pode observar na figura 8, a saída da ferramenta ATC é igualmente um modelo de terreno. Desta forma, é possível utilizar esta ferramenta para alterar várias vezes o mesmo modelo com diferentes modelos de estrada, construindo assim uma estrutura rodoviária extensa. A ferramenta ATC foi desenvolvida com base num conjunto de bibliotecas já desenvolvidas para outras aplicações, em que se englobam a leitura de dados em ficheiro e o tratamento de dados em estruturas de memória. A classe *vtElevationGrid*, do pacote de software VTP (Virtual Terrain Software) [VTerrainCom06] disponibiliza um conjunto de leitores de ficheiros de modelos de terreno em diversos formatos, assim como uma estrutura de dados em memória para carregar dados relativos a modelos de terrenos. A inclusão deste módulo de software permite dotar a ferramenta ATC de um amplo conjunto de leitores de terrenos. No futuro, actualizações a esta biblioteca, reflectir-se-ão directamente na ferramenta ATC. Tipicamente, os dados importados de sistemas de projecto de estradas estão no formato Ascii XYZ, como tal desenvolveu-se um conversor do formato XYZ para o formato BT, designado *Xyz2bt*. O formato de ficheiro BT é frequentemente utilizado por outras ferramentas, nomeadamente no VTP (Virtual Terrain Project). A

escolha do formato BT deve-se também ao facto de ser específico para modelos de terreno em grelha regular.

Na figura 9 apresentam-se duas imagens, que foram obtidas na visualização de um modelo de terreno modificado pela ferramenta ATC e onde se podem ver os taludes de escavação.



Figura 9. Talude de escavação

Na figura 10 apresentam-se duas imagens, onde se visualizam os taludes de aterro, implantados pela ferramenta ATC.



Figura 10. Talude de aterro

O processo de percorrer todos os pontos do terreno garante que cada ponto só é alterado uma única vez. Mediante a definição de estrada e terreno utilizada, este método é o mais indicado, pois tem uma implementação simples e que não gera redundância na alteração da cota de pontos de terreno. Uma forma de otimizar o processo de cálculo para todos os pontos, é utilizar uma hierarquia do terreno, que possibilita eliminar zonas do terreno que não são afectadas pela passagem da estrada. A ferramenta ATC, para além de alterar o modelo de terreno relativamente à passagem de uma estrada, guarda informação associada ao modelo de terreno, que possibilita alterar a cor das zonas onde existiu edição do valor da cota. À medida que os pontos vão sendo alterados devido à passagem da estrada, é associada uma etiqueta, que mais tarde serve para efectuar a alteração de cor. A estrutura de dados criada para a alteração de cor é gravada para um ficheiro de atributos em modo binário e com formatação própria, após a aplicação terminar a alteração do modelo de terreno. O ficheiro de atributos contém um cabeçalho de 256 bytes para guardar informação opcional relativa ao terreno, seguido de um vector de valores correspondentes às etiquetas de cor de cada ponto do modelo de terreno. Na geração do modelo visual do terreno o ficheiro de atributos relativo a esse terreno é consultado e são seleccionados os pontos que possuem uma etiqueta correspondente à alteração da cor, sendo-lhes atribuída uma cor diferente.

3.5- Optimização do terreno

A visualização de terrenos de grandes dimensões pode sobrecarregar até os sistemas de síntese de imagem mais poderosos. É portanto necessário otimizar o modelo do terreno de forma a não comprometer as taxas de refrescamento da imagem. Uma forma de optimização consiste em simplificar o modelo de terreno, eliminando

polígonos que se considerem de pouca importância. A simplificação do modelo de terreno aumenta as prestações da aplicação, uma vez que permite uma diminuição do número total de polígonos tratados na visualização.

Uma técnica de optimização muito utilizada consiste em obter mais do que uma definição do mesmo modelo do terreno através de simplificações sucessivas. O modelo do terreno original permite uma visualização com o máximo detalhe disponível e cada modelo simplificado corresponde a um nível de detalhe diferente. Na visualização, estes modelos associados a técnicas de variação automática permitem obter óptimos resultados. Para o caso de terrenos definidos por mapa de elevação em grelha regular, como se utilizam neste caso, o critério de simplificação não se baseia numa medida de erro mas numa simplificação uniforme da malha de pontos, obtendo-se sempre uma grelha regular [Garland95]. O processo de simplificação passa por obter diversas definições da superfície com diferentes níveis de detalhe. A simplificação permite reduzir o número de pontos do mapa de elevação, mantendo sempre uma grelha uniforme [Heckbert94]. No exemplo da figura 11, para o nível zero [PfASD06], que corresponde ao modelo do terreno com mínimo detalhe, seleccionam-se os vértices 1, 3, 7 e 9 e para o nível seguinte, com mais detalhe, são seleccionados os vértices de 1 a 9. Após se ter seleccionado os vértices para cada nível de detalhe, determinam-se as faces respectivas. Estas faces são determinadas começando pelo nível com menos detalhe e resultam dos vértices anteriormente seleccionados. Para o nível zero, as faces respectivas são determinadas pelos vértices: 1, 7, 3 e 3, 7, 9, como se exemplifica na figura 11.

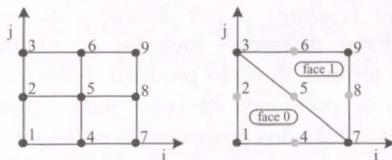


Figura 11. Selecção de vértices e faces

O número de estruturas de dados para guardar os diversos modelos é determinado em função do modelo de terreno entrada. Para isso, calcula-se quantos submodelos vão ser gerados [Lindstrom01] [Lindstrom96]. Cada um desses modelos que é gerado em pré-processamento, refere-se a uma definição do terreno com um determinado nível de detalhe. A constituição da estrutura de submodelos permite optimizar o desempenho de selecção rápida e também a pesquisa espacial. Os modelos com nível de detalhe vizinhos partilham vértices entre si, com o objectivo de evitar falhas na visualização do terreno. Uma das maiores vantagens deste método é a de permitir, em tempo real, a construção da malha para visualização do modelo de terreno, seleccionando os vértices do nível apropriado [Larsen03]. Para zonas distantes do observador devem-se seleccionar os vértices de níveis de detalhe baixos e para zonas mais acentuadas ou próximas do observador devem ser seleccionados os vértices de níveis de detalhe altos. As normais para todos os vértices

são calculadas para o nível com máximo detalhe, que corresponde a todos os vértices serem utilizados. A normal de um vértice resulta da média das normais calculadas para cada um dos polígonos adjacentes. O processo de selecção automática dos vértices é realizado encadeando 3 ciclos: o primeiro ciclo percorre cada nível de detalhe gerado, o segundo e o terceiro permitem varrer todas as colunas e as linhas do mapa de elevação, como se exemplifica a seguir:

```
Para cada nível de detalhe (n = 0, n < (nº níveis-1), n++);
  Para cada coluna (i = 0, i < nº colunas, i += 2(nº níveis-1-n));
    Para cada linha (j = 0, j < nº linhas, j += 2(nº níveis-1-n));
      Selecciona-se o vértice (i, j);
```

As faces para cada nível determinam-se percorrendo todas as linhas e colunas, menos uma, como se exemplifica a seguir:

```
k=0;
Para cada nível de detalhe (n = 0, n < nº níveis - 1, n++)
  Para cada coluna (i = 0, i < nº colunas - 1, i++)
    Para cada linha (j = 0, j < nº linhas (n), j++) {
      face (k) = [(i, j), (i+1, j), (i, j+1)]; k++;
      face (k) = [(i, j+1), (i+1, j), (i+1, j+1)]; k++;
```

Estas faces são depois guardadas em estruturas de memória *pfASDFace*, disponibilizada pela biblioteca *pfASD* do *OpenGL Performer*. Para cada nível de detalhe é criada uma estrutura de dados *pfASDLODRRange*. Em cada uma destas estruturas são especificados dois valores: a distância a partir da qual o modelo é visível (*Sw*) e a distância durante a qual ocorre o ajuste automático do modelo (*morphing*). Para determinar os valores de *Sw* para todos os níveis, apenas é necessário especificar a distância para o nível com máximo detalhe Sw_{base} , sendo os restantes calculados automaticamente pela seguinte equação:

$$Sw(k) = Sw_{Base} * 2^k, \quad k=0,1,2,3,\dots \quad (5)$$

O valor de distância de *morphing* (*M*) para cada nível de detalhe é determinado em função da distância de comutação respectiva (*Sw*), utilizando a seguinte expressão:

$$M(k) = 0,5 * Sw(k) \quad (6)$$

Por último, para cada nível de detalhe é mapeada uma textura, que normalmente é do tipo relva. A biblioteca *pfASD* foi especialmente desenvolvida para a visualização de superfícies de grandes dimensões, onde se enquadra a visualização de terrenos. Para isso é necessário gerar as estruturas de dados adequadas à visualização por bibliotecas *pfASD*, disponibilizadas pelo *OpenGL Performer*. Todas as estruturas de dados associadas à visualização do modelo do terreno pela biblioteca *pfASD* são criadas em pré-processamento. A estrutura de dados *pfASD*, criada no processo de optimização do modelo de terreno, é por fim adicionada à árvore de objectos *OpenGL Performer*, para permitir a sua visualização. Durante a simulação, algoritmos de decisão baseados em funções de avaliação seleccionam o detalhe adequado para cada secção do terreno e

constroem o modelo a visualizar. O modelo 3D do terreno gerado é adequado ao simulador de condução DriS, e pode também ser lido por qualquer outra aplicação de visualização compatível com este formato.

4- RESULTADOS

4.1- Geração de ambientes rodoviários

Para avaliar o desempenho das ferramentas ARC2 e ATC, foram realizados vários ensaios, com ambientes rodoviários de diferentes dimensões e utilizando duas metodologias para a sua criação. A primeira metodologia consiste em criar o ambiente rodoviário utilizando um modelador tradicional interactivo, o *Multigene Creator*. Os valores da tabela 1 para esta metodologia foram obtidos consultando um especialista na criação de ambientes rodoviários para o simulador de condução VTI, em que utilizou o *Multigene Creator*. A segunda metodologia consiste em utilizar as ferramentas ARC2 e ATC para a criação do ambiente rodoviário. Os valores da tabela 1 para esta metodologia foram medidos em testes reais de criação dos ambientes rodoviários. Com estas diversas dimensões do ambiente rodoviário e utilizando as duas metodologias descritas, obtêm-se os tempos indicativos apresentados na tabela 1.

Estrada	Tempo de Modelação	
	Modelador Tradicional	ATC e ARC2
5km	4 horas	1 hora
9km	7 horas	1 hora 20 min
80km	42 horas	2 horas

Tabela 1. Tempo de preparação

Os tempos foram medidos a partir do momento em que é conhecida a topologia do ambiente rodoviário. Utilizando a metodologia de modelação integral, após conhecer a topologia do ambiente rodoviário, segue-se a sua criação. Com a utilização das ferramentas automáticas é necessário gerar as definições dos eixos das vias das estradas e os ficheiros de perfis transversais; a construção realiza-se automaticamente com recurso às ferramentas ARC2 e ATC. Como se pode observar, utilizando a modelação tradicional, o tempo de criação depende da dimensão do ambiente rodoviário. Isto deve-se ao facto de o utilizador ter de modelar na totalidade o ambiente rodoviário. Utilizando as ferramentas de construção automática, o tempo de criação do ambiente rodoviário é significativamente inferior, comparativamente com a modelação integral e para a mesma dimensão de ambiente rodoviário. Uma grande parte do processo de criação do ambiente rodoviário é realizada automaticamente pelas ferramentas ARC2 e ATC, o que leva a que o tempo de criação do ambiente rodoviário seja muito inferior comparativamente com a modelação tradicional. À medida que a dimensão do ambiente rodoviário vai crescendo, a diferença temporal entre a modelação tradicional e as ferramentas automáticas é mais significativa, o que releva a eficácia das ferramentas automáticas na criação de ambientes rodoviários extensos.

4.2- Optimização do terreno

A optimização do modelo de terreno permite uma visualização de modelos de ambientes rodoviários com elevadas dimensões. A optimização realizada reflecte-se essencialmente na redução do número de polígonos visualizados, o que aumenta a eficácia da simulação. A metodologia utilizada permite efectuar a variação automática do nível de detalhe e uma visualização do modelo do terreno sem falhas. De forma a avaliar os benefícios da optimização implementada utilizaram-se diferentes metodologias de organização dos modelos de terreno. A primeira metodologia (1) consiste em agrupar todos os polígonos do terreno em apenas um único grupo. O modelo de terreno é carregado para uma estrutura do tipo *pfGeode* e inserido na árvore de objectos OpenGL Performer. A segunda metodologia (2) consiste na divisão do terreno em pequenas áreas quadrangulares, com um nó *pfGeode* para cada área. A terceira metodologia (3) consiste em definir pequenas áreas quadrangulares do terreno, em que cada quadrado é representado com diferentes níveis de detalhe. Na árvore de objectos OpenGL Performer vão existir vários nós *pfLOD*, um por cada área quadrangular. Esta metodologia requer a especificação de uma distância de comutação para cada estrutura *pfLOD*, que corresponde à distância a partir da qual o modelo é visível, permitindo a selecção automática do nível de detalhe. A quarta metodologia (4) corresponde à optimização descrita anteriormente e permite a variação automática do nível de detalhe, utilizando estruturas *fpASD*, disponibilizadas pelo OpenGL Performer.

Durante a visualização, os modelos do terreno serão sujeitos a um processo de corte do número de polígonos enviados para a placa gráfica, por pirâmide de visualização (*culling*) e por distância de visualização (*clipping*). Estes diferentes métodos de organização do modelo do terreno, deverão produzir diferentes reduções do número de polígonos enviados para a placa gráfica, durante a execução dos processos de *culling* e *clipping*. Na tabela 2, apresentam-se os valores obtidos para o número de polígonos visualizados utilizando diferentes modelos de terrenos e as diferentes metodologias descritas.

Modelo (m ²)	N.º de polígonos	N.º de polígonos visualizados (% de polígonos visualizados)			
		Um pfGeode (1)	Grupo de pfGeodes (2)	Seleção aut. de detalhe (3)	Varição aut. de detalhe (4)
16384	32768	32512 (99.2 %)	17472 (53.3 %)	17472 (53.3 %)	32646 (99.6 %)
262144	524288	523264 (99.8 %)	225288 (42.9 %)	222264 (42.4 %)	107235 (20.5 %)
1048576	2097152	2095104 (99.9 %)	830790 (39.6 %)	769606 (36.7 %)	289950 (13.8 %)

Tabela 2. Polígonos visualizados

Na tabela 2 encontram-se os diferentes modelos de terreno, o número total de polígonos correspondente a cada modelo e o número de polígonos visualizados para as diferentes metodologias. Os valores para cada uma das metodologias foram obtidos no mesmo ponto de observação, segundo a mesma orientação e com o mesmo

campo visual. Analisando a tabela 2, constata-se que a metodologia (1) não permite uma redução do número de polígonos a visualizar muito significativa. Com esta metodologia obtêm-se um número de polígonos visualizados, sempre na ordem de 100% e para qualquer modelo de terreno utilizado. Apenas o processo de *clipping* permite reduzir o número de polígonos enviados para a placa gráfica. Como só existe um nó *pfGeode* na árvore de objectos, o processo de *culling* não permite eliminar grupos de polígonos. A pequena diferença do número de polígonos eliminados entre os terrenos analisados deve-se ao processo de *clipping*, que elimina polígonos que ficam atrás do ponto de observação. A percentagem de redução é superior em terrenos de menores dimensões. Entre as metodologias (2) e (3) as diferenças não são significativas. Apenas se observa uma pequena redução no número de polígonos visualizados na metodologia (3) para o terreno de maiores dimensões comparativamente com a metodologia (2). Isto deve-se ao facto de a parameterização da estrutura *pfLOD* possibilitar uma redução do número de polígonos a partir de determinada distância, comutando para um modelo com menor detalhe. Em ambas as metodologias, (2) e (3), o processo de *culling* permite reduzir o número de polígonos, uma vez que elimina hierarquicamente o tratamento de alguns nós da árvore de objectos. Também se verifica, em ambas as metodologias, que o processo de *clipping* permite reduzir o número de polígonos. Para a metodologia 4, apenas o processo de *clipping* efectua uma redução do número de polígonos visualizados. O processo de *culling* não permite eliminar grupos de polígonos, porque apenas existe um nó *pfASD* na árvore de objectos. Observa-se que, para terrenos de pequenas dimensões, a diminuição do número de polígonos não é muito significativa. A pequena diferença que existe entre a metodologia (1) e a metodologia (4) deve-se a uma afectação diferente pelo processo de *clipping*. No entanto, à medida que a dimensão do terreno aumenta, a optimização torna-se mais acentuada. A implementação da metodologia (4) é a mais elaborada de entre as metodologias aqui analisadas, mas como se pode constatar é a que produz melhores resultados, sendo mais significativos em terrenos de grandes dimensões. A implementação da metodologia (4) obriga a definir dois valores de distâncias: a distância a partir da qual o modelo é visível e a distância durante a qual ocorre o ajuste dinâmico da geometria do terreno (*morph*). Os ensaios foram realizados com a especificação destes parâmetros de modo a obter os melhores resultados sem perda da qualidade da imagem.

De forma a avaliar a qualidade da visualização, para cada uma das metodologias de optimização, foi feita uma análise do erro entre a imagem visualizada e uma imagem de referência. Foi tomada como referência a imagem obtida pela metodologia (1), em que a qualidade da imagem é máxima, uma vez que são visualizados praticamente 100% dos polígonos.

Efectuando a diferença entre a imagem da metodologia (2) e a imagem de referência, correspondente à metodologia (1), obtêm-se uma imagem de erro. Como a diferença entre as imagens é muito reduzida, obteve-se uma imagem praticamente toda preta, à excepção de uma

pequena área, cerca de 0.75%, correspondente a uma encosta no horizonte. Para facilitar a análise inverteram-se as cores e obteve-se a imagem da figura 12. Uma imagem de erro do mesmo tipo foi obtida pela análise realizada para a metodologia (3). Pode-se concluir que em termos de qualidade de imagem não existe diferença significativa entre a metodologia (2) e a metodologia (3). Efectuando a mesma análise para a metodologia (4) concluiu-se que não existe diferença significativa entre a imagem obtida para a metodologia (4) e a imagem de referência.

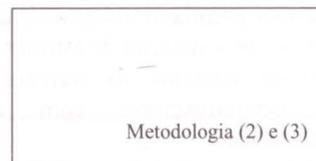


Figura 12. Diferença de imagens invertida

As metodologias (2) e (3), possibilitam uma redução de cerca de 60% do número total de polígonos do modelo de terreno, mas conduzem a uma qualidade de imagem inferior, relativamente à metodologia (1) e (4). Pela análise do número de polígonos visualizados, verifica-se que a implementação da metodologia (4) produz melhores resultados que as restantes metodologias estudadas. A redução de cerca de 80% do número total de polígonos do modelo de terreno com maiores dimensões não compromete a qualidade de imagem, como ficou comprovado pelo estudo da qualidade de imagem realizado. Pode-se concluir que a metodologia (4) é a que produz melhores resultados, tendo em consideração a simplificação do número de polígonos no processo de síntese de imagem e a qualidade da visualização.

5- CONCLUSÕES

As ferramentas apresentadas neste documento permitem a criação de ambientes rodoviários realistas e de excelente qualidade, com um formato simples e eficaz. Estes ambientes possuem características que permitem a realização de experiências destinadas à elaboração de estudos científicos em diversas áreas, tais como, psicologia, ergonomia e engenharia rodoviária e de tráfego. A qualidade dos modelos obtidos possibilita a realização de estudos científicos recorrendo à simulação de condução, com a implementação dos acontecimentos de tráfego cujos efeitos e consequências importa conhecer e estudar. Os modelos obtidos por estas ferramentas são optimizados para simulação visual em tempo real e adequados à integração em simuladores de condução. Estas ferramentas permitem obter modelos de excelente qualidade e reduzir drasticamente o custo e o trabalho de preparação de experiências de simulação de condução, assim como facilitar a especificação de ambientes rodoviários de elevadas dimensões e com elevados requisitos de realismo. As técnicas de optimização utilizadas em ambas as ferramentas levaram à obtenção de resultados que satisfazem plenamente os objectivos do trabalho e os requisitos da implementação. As metodologias de optimização adoptadas permitem eliminar uma percentagem significativa de polígonos a ser tratados no processo de síntese de imagem, não

resultando em perda da qualidade de imagem. O ganho é significativo ao utilizar uma hierarquia na visualização do modelo de estrada, pois permite eliminar zonas extensas da estrada, que não são visíveis pelo observador. A utilização de diferentes níveis de detalhe permite obter melhores taxas de refrescamento, sem perda de qualidade da imagem. O uso de *layers* para a sinalização horizontal facilita a detecção de visibilidade, traduzindo-se numa qualidade da visualização superior. O método de simplificação e visualização do modelo do terreno permite obter elevadas prestações do sistema gráfico. Os dados apresentados permitem comprovar que existe um ganho significativo na utilização de estruturas *pfASD* para a visualização de modelos de terrenos de grandes dimensões, comparativamente com as restantes metodologias estudadas.

As ferramentas desenvolvidas para edição de polilinhas demonstraram ser de excelente utilidade para a especificação de ambientes rodoviários extensos e complexos [Campos06]. São também úteis para a especificação de acontecimentos de tráfego precisos e realistas, utilizando agentes autónomos [Leitão00].

6- TRABALHO FUTURO

Apesar do actual estado de desenvolvimento das ferramentas apresentadas existem sempre funcionalidades que podem ser melhoradas e novas funcionalidades que poderão ser implementadas, estando estas ferramentas sempre em constante desenvolvimento. Com a utilização frequente e continuada destas ferramentas é possível que sejam identificadas novas funcionalidades que ainda não foram equacionadas. Uma das funcionalidades a implementar na ferramenta de criação do modelo de estrada seria a possibilidade de obter um modelo de estrada com perfil transversal em recta a duas águas. Esta implementação obriga a uma especificação da sobrelevação à direita e à esquerda do eixo da via, assim como a uma reformulação do módulo de cálculo do modelo poligonal da via. No entanto, pode-se afirmar que grande parte do trabalho de investigação se encontra concluído. O processo de alteração da cota do terreno relativamente a uma estrada pode ser optimizado se for considerada uma definição hierárquica do terreno, por exemplo através de uma árvore hierárquica de volumes envolventes. O uso de hierarquia do modelo do terreno permite, no processo de alteração da cota dos pontos do terreno, eliminar o tratamento de zonas distantes que não são afectadas pela passagem da estrada. A possibilidade de realizar a especificação para uma rede de estradas na ferramenta de alteração do modelo do terreno, em lugar da actual especificação para uma estrada, será também uma funcionalidade a considerar.

7- BIBLIOGRAFIA

- [Bayarri98] S. Bayarri, I. Pareja, I. Coma e M. Fernández; Modelação de Carreteras para la Simulación de Conducción; 8º Encontro Português de Computação Gráfica, 1998.
- [Campos03] C. Campos, V. Cunha e J. Leitão, Geração de Ambientes Rodoviários para Simulação de Condução, 12º Encontro Português de Computação Gráfica, p. 143-147, Outubro de 2003.
- [Campos06] C. Campos, Geração de Ambientes Rodoviários para Simulação de Condução, tese para obtenção do grau de mestre, pelo Instituto Superior Técnico, em Novembro de 2006.
- [Garland95] M. Garland, P. Heckbert, Fast Polygonal Approximation of Terrains and Height Fields, Setembro de 1995.
<http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/user/garland/www/scape/scape.pdf>
- [Heckbert94] P. Heckbert, M. Garland, Multiresolution Modeling for Fast Rendering, Proceedings Graphics Interface 94, p. 43 - 50, Maio de 1994.
<http://www.cs.cmu.edu/~ph>
- [LADS05] University of Leeds. Leeds Advanced Driving Simulator - Technical Overview. Documento disponível na Internet em
<http://www.its.leeds.ac.uk/facilities/lads/index.html>, Janeiro de 2005.
- [Larsen03] B. Larsen, N. Christensen, Real-Time Terrain Rendering using Smooth Hardware Optimized Level of Detail, Technical University of Denmark, 2003.
http://wscg.zcu.cz/wscg2003/Papers_2003/C05.pdf
- [Leitão00] J. Leitão, Agentes Autónomos Controláveis em Simuladores de Condução, tese para obtenção do grau de Doutor, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em Setembro de 2000.
- [Lindstrom96] P. Lindstrom, L. Hodges, D. Koller, N. Faust, W. Ribarsky, G. Turner, Real-Time, Continuous Level of Detail Rendering of Height Fields, Proceedings of ACM SIGGRAPH 96, p. 109 - 118, August de 2005.
<http://www.cc.gatech.edu/gvu/people/peter.lindstrom/papers/siggraph96/siggraph96.pdf>
- [Lindstrom01] P. Lindstrom, V. Pascucci, Visualization of Large Terrain Made Easy, Proceedings of IEEE Visualization 2001, California, Outubro de 2005.
<http://www.cc.gatech.edu/~lindstro/papers/vi2001a/paper.pdf>
- [Performer06] OpenGLPerformer-Overview. Documento disponível na Internet em
<http://www.sgi.com/products/software/performer/overview.html>, Janeiro de 2006.
- [PfASD06] Descrição da classe pfASD, documento disponível na Internet em
<http://www.avango.org/documentation/doxygen/ext-Performer.inc/html/classpfASD.html>, Janeiro de 2006.
- [VTerrainCom06] Ferramentas de terrenos e pacotes de software comercial, documento disponível na Internet em
<http://www.vterrain.org/Packages/Com/index.html>, Janeiro de 2006.
- [VTI06] Swedish National Road and Transport Research Institute - Technical Equipment. Documento disponível na Internet em:
http://www.vti.se/templates/Page___3257.aspx, Janeiro de 2005.