

# Geração Procedimental de Traçados Rodoviários para Simulação de Condução

Carlos Campos  
ISEP/FEUP  
Porto, Portugal  
crc@isep.ipp.pt

João Miguel Leitão  
ISEP  
Porto, Portugal  
jml@isep.ipp.pt

António Fernando Coelho  
FEUP  
Porto, Portugal  
acoelho@fe.up.pt

---

## Resumo

*Os ambientes virtuais para simulação de condução para fins científicos requerem modelos tridimensionais de estradas realistas. A geração de modelos de estradas com este nível de qualidade requer a prévia definição dos traçados rodoviários. Dependendo dos requisitos da experiência, o traçado rodoviário de uma estrada pode ser obtido recorrendo a especialistas da área de projeto de vias comunicação. A conceção do traçado de uma via pode tornar-se uma tarefa morosa e dispendiosa, mesmo recorrendo a ferramentas CAD.*

*Na preparação de experiências científicas em simulador, o processo de obtenção de um traçado pode ser otimizado recorrendo a métodos de geração automática. Este artigo apresenta um método que permite gerar de forma automática traçados rodoviários adequados para implementação de experiências de simulação de condução em diversas áreas científicas, como ergonomia, psicologia e engenharia de tráfego. O processo de geração de traçados foi inspirado nos métodos utilizados em engenharia de vias, produzindo traçados segundo as normas e estradas semelhantes às encontradas no mundo real. Os traçados rodoviários gerados proceduralmente são adequados para realização de experiências de simulação de condução para fins científicos.*

*Com a implementação deste método é reduzido significativamente o recurso a especialistas de vias de comunicação para elaboração do traçado rodoviário adequando para a realização de experiências científicas em simulador de condução.*

## Palavras-Chave

*Modelação Procedimental, Traçado Rodoviário, Projeto de vias, Simulação de Condução.*

---

## 1. INTRODUÇÃO

A modelação procedimental de ambientes rodoviários realistas é uma área de investigação de grande interesse, que se dedica à criação de modelos não só para o entretenimento mas também para aplicações científicas. Neste artigo apresenta-se o estado atual da implementação de um método para a criação automática de traçados rodoviários para simulação de condução para fins científicos.

As experiências de simulação de condução para fins científicos requerem a criação de traçados rodoviários extensos e com características específicas. Uma forma de obter traçados realistas, é recorrer a especialistas da área de projeto de vias para produzirem traçados rodoviários que cumpram os elevados requisitos de realismo exigidos pela especificação da experiência. A conceção do projeto de uma via que cumpra os requisitos exigidos pode tornar-se uma tarefa morosa e dispendiosa, mesmo possuindo ferramentas de auxílio como o civil3D<sup>1</sup>. Após obter os dados de projeto de um traçado rodoviário, é ainda necessário que o preparador da experiência despenda recursos para proceder à geração do modelo visual. Uma forma de oti-

mizar o processo de geração do modelo da estrada a partir do traçado é utilizar ferramentas de modelação automática que facilitem essa tarefa, como as apresentadas em [Campos07]. Adicionalmente ainda é necessário proceder à edição do modelo de terreno em função do traçado da estrada.

Para além dos elevados requisitos de realismo do traçado rodoviário, a simulação de condução requer também uma descrição semântica de todo o ambiente virtual gerado, como também referido em [Thomas00]. Esta descrição é fundamental em sistemas de simulação para colocação de atores (e.g. peões, outros veículos), monitorização de toda a simulação e produção de relatórios. Uma característica particular da simulação de condução para fins científicos é a produção de relatórios. Estes relatórios são fundamentais para uma posterior análise e tratamento de dados relativos ao ensaio experimental.

### 1.1 Organização do artigo

O restante artigo está organizado da seguinte forma: na secção 2, é apresentado o estado da arte na conceção de vias de comunicação e são apresentados os trabalhos relacionados mais significativos. O método concebido é apresentado na secção 3, e na secção 4 é descrita a im-

---

<sup>1</sup> Autocad civil3D – [www.autodesk.pt](http://www.autodesk.pt)

plementação de um protótipo funcional. Os resultados obtidos são apresentados na secção 5, e na secção 6, são apresentadas as principais conclusões e trabalho futuro.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Conceção de vias de comunicação

Como descrito em [Campos12], uma rede rodoviária pode ser definida por um conjunto de nós e ligações que os interligam. As redes rodoviárias são planeadas para ligar pontos de interesse, permitindo a deslocação de veículos entre os diversos pontos.

A conceção de uma via parte inicialmente de uma decisão estratégica de interligar dois pontos na rede rodoviária existente. Essencialmente, esta decisão é tomada tendo em consideração parâmetros como: crescimento demográfico, nível de serviço, estudos de tráfego e custo estimado de construção. Em engenharia de vias, um projeto de uma estrada desenvolve-se de acordo com as seguintes fases: programa preliminar, estudo prévio e projeto de execução [França11]. O programa preliminar é basicamente um caderno de encargos, constituído por disposições gerais, com pouca pormenorização, onde figuram as características gerais pretendidas e que condicionaram logo à partida a escolha do traçado. O estudo prévio não tem como função fornecer os elementos definitivos, nem a pormenorização necessária à execução da obra. O objetivo principal é o de apontar uma ou várias soluções alternativas para o traçado. Finalizado e aprovado o estudo prévio em alinhamentos retos, segue-se o projeto de execução. O traçado está aproximadamente definido e o trabalho consiste agora no detalhe do estudo. O projeto de execução deve conter a pormenorização necessária à implantação da via rodoviária. No traçado geométrico da via, começa-se por especificar a diretriz (traçado em planta), com a introdução de curvas compostas. Segue-se o traçado em perfil longitudinal (altimetria), onde são definidas as concordâncias verticais. Por último é especificado o perfil transversal da via. A definição do traçado deverá obedecer aos critérios estabelecidos nas normas aplicáveis. Em Portugal essas normas são definidas pela entidade Estradas de Portugal, que é responsável pela tutela da rede rodoviária [EP94].

### 2.2 Trabalhos relacionados

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para criação de ambientes rodoviários de cidade, focando-se essencialmente em traçados urbanos [Parish01] [Chen08] [Teoh08] [Coelho07]. Os resultados obtidos por estas metodologias são de boa qualidade, no entanto o problema destas abordagens é que a obtenção de modelos realistas implica um controlo demasiado elevado por parte do utilizador. Experiências de simulação de condução tipicamente requerem ambientes rodoviários mistos, com estradas corretamente modeladas e que combinem traçado em meio urbano e traçado em meio rural.

Uma proposta para a modelação procedimental de um ambiente virtual e adequado para simulação em tempo real é apresentada por Smelik et al. em 2008 [Smelik08]. O autor descreve um processo em que o ambiente virtual

é criado de forma hierárquica em camadas, a partir de um esboço inicial, incluindo o tratamento da rede rodoviária. Na base do modelo hierárquico encontra-se a definição do modelo do terreno, seguindo-se o modelo hidrográfico, o modelo da vegetação, o mapa rodoviário e por último o modelo urbano (edifícios). Uma vantagem desta hierarquização é que cada camada pode ser tratada individualmente. No processo de geração do modelo final é tida em consideração a adequação do modelo de terreno às restantes instanciações de objetos 3D, como abordado em [Latham06]. Na proposta apresentada por Smelik et al. não se percebe qual a metodologia utilizada para geração do traçado rodoviário. Smelik et al. em 2011 apresentam uma abordagem de modelação de um ambiente virtual, recorrendo a um modelador interativo [Smelik11]. A geração do ambiente virtual obriga a um controlo demasiado elevado por parte do utilizador, fazendo com que o processo deixe de ser totalmente automático. Para a geração do modelo geométrico rodoviário são exploradas as técnicas de modelação procedimental de redes urbanas apresentadas por Kelly et al. em 2008 [Kelly08].

Galin et al. apresentam uma metodologia de geração procedimental de traçados de estradas [Galin10]. A geração do traçado é realizada recorrendo a um algoritmo complexo, sobre um terreno definido em mapa de elevação. Em cada etapa do processo de geração do traçado da estrada sobre o modelo do terreno, a direção a seguir é determinada em função da avaliação local do custo de cada alternativa. O custo de cada alternativa é determinado recorrendo a uma função que avalia vários indicadores, como a relação com o terreno e a relação com as condicionantes. O facto do uso de uma avaliação local impede a correta avaliação e otimização global da solução final. O uso de uma abordagem que analise o custo por níveis de forma global conduz a uma melhor otimização dos traçados finais, produzindo modelos de qualidade. Dependendo do modelo de terreno e do tipo de estrada a gerar, determinar o número de alternativas a estudar pode-se tornar num problema demasiado complexo. Pela descrição do autor não se conclui que esta metodologia produza traçados rodoviários semelhantes aos encontrados em estradas reais, não sendo apresentada uma avaliação relativa ao realismo dos modelos obtidos. Uma metodologia de geração de uma rede rodoviária que integra diferentes tipologias de estradas (autoestradas, estradas principais e estradas secundárias) é apresentada por Galin et al. em [Galin11]. Cada tipologia de estradas é criada de forma independente e no final é realizada a sobreposição dos diferentes tipos de estradas numa única rede rodoviária. A forma como é tratado este problema resulta em que o traçado das estradas tenha que ser recalculado. Na geração do modelo visual são instanciados modelos 3D, como pontes, túneis e cruzamento.

Thomas et al. apresentam uma cidade virtual em que é possível encontrar diferentes atores, como: peões, veículos a circular nos diferentes sentidos, transportes públicos e veículos conduzidos por outros condutores, num complexo ambiente rodoviário urbano [Thomas00]. O ambi-

ente urbano é criado recorrendo ao modelador interativo VUEMS sobre uma definição do terreno em mapa de elevação [Donikian97]. O uso de um modelador interativo não é adequado à geração de um ambiente rodoviário extenso de forma automática e eficiente.

Nos trabalhos apresentados por Bayarri et al., são descritas metodologias para a geração de ambientes rodoviários adequados para simulação de condução a partir de dados de projeto [Bayarri96] [Pareja99]. Cada vez que se pretenda obter um modelo de uma via exige a prévia interação com a área de engenharia de vias, ou outras fontes, para obter a definição do traçado da via. Algumas destas metodologias já foram exploradas em trabalhos anteriores [Campos07].

Para a implementação de experiências de simulação de condução, além da geração do traçado rodoviário e modelação do ambiente virtual, deverá ser criada a correspondente definição semântica. Como referido em [Thomas00], a definição semântica é uma descrição de alto nível, de caracterização do ambiente rodoviário, que permite suportar o modelo dinâmico do ambiente virtual. A criação de uma descrição semântica de acordo com o mapa rodoviário é também abordada em outros trabalhos relacionados [Campos07] [Bayarri96] [Pareja99].

O projeto OpenDRIVE desenvolveu um *standard* para a completa descrição de uma rede viária, de modo a ser compatível com diversos sistemas de simulação. É referido que o *standard* proposto permite a parametrização das principais características de estradas reais. Um modelador interativo que usa este *standard* é o Road Designer [OpenDrive10]. Este modelador além de gerar o modelo visual gera uma descrição do ambiente rodoviário neste formato. No entanto não são conhecidas ferramentas de geração automática de modelos neste formato.

A criação de modelos de estradas realistas para simulação de condução passa muitas vezes por processos manuais, trabalhosos e morosos, mesmo quando são disponibilizadas ferramentas interativas. Sempre que se pretende criar um ambiente de traçado realista para tarefas de condução para fins científicos é necessário um elevado nível de interação com o preparador do modelo, que muitas vezes passa por recorrer a especialistas na área de projeto de vias para obtenção do traçado. Uma alternativa a este problema passa por conceber um método de geração automática de traçados rodoviários.

### 3. GERAÇÃO DE ESTRADAS

O processo concebido para a geração de um traçado tem como base um modelo hierárquico em níveis. Partindo da definição de uma ligação entre dois pontos, começa-se por gerar um conjunto de soluções de alto nível, com pouca pormenorização. A escolha da melhor hipótese em cada etapa do processo é realizada recorrendo a uma função de custo que avalia os vários parâmetros, como relação com o relevo do terreno e respetivas condicionantes. À medida que o processo de geração de uma estrada avança, o traçado rodoviário vai sendo refinado, até se obter uma definição com nível de detalhe adequado em

alinhamentos retos. A partir da definição em alinhamentos retos é desenvolvido o traçado em planta, com a introdução de curvas compostas. Após se obter o traçado em planta, segue-se o traçado em altimetria com a introdução de concordâncias verticais.

#### 3.1 Geração de traçados rodoviários

O problema da geração do traçado rodoviário pode ser formulado da seguinte forma: Um traçado rodoviário  $T$  é constituído por um conjunto ordenado de vértices  $V$  e segmentos de traçado  $S$  (4).

$$T = (V, S) \quad (4)$$

Um segmento de traçado  $S_i$  é constituído por um conjunto de retas, arcos e clotoides (5).

$$S_i = \{(\text{reta}, \text{arco}, \text{clotóide})\} \quad (5)$$

Considerando uma área  $A$  e dois pontos designado por  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ ,  $P$  é o conjunto de soluções de traçado  $T$  em  $A$  que interligam os pontos  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$  (6).

$$P = \{T\} \quad (6)$$

O objetivo consiste em determinar um traçado  $T'$  entre os pontos  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$  que minimize a função de custo  $fc(I)$ , que avalia a influência dos diferentes custos  $I$ , como a relação com o relevo do terreno e com as condicionantes. A função  $fc(I)$  permite determinar o custo de um traçado  $C(T)$  (7).

$$C(T') = \min C(T), \text{ em que } T \in P \quad (7)$$

Para a geração de um traçado rodoviário, a partir da definição de uma ligação entre dois pontos, são geradas definições de traçado com um nível de detalhe crescente. Em cada nível de detalhe são geradas várias alternativas de traçado, e em função da avaliação feita é selecionada uma, avançando-se para o nível de detalhe seguinte (figura 1).

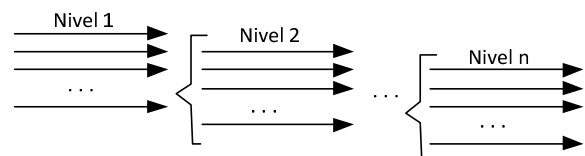


Figura 1. Geração de traçado por níveis de detalhe

A utilização do nível de detalhe adequado permite gerar e estudar um qualquer número de propostas sem prejudicar o processo em termos de peso computacional. O uso de muitos níveis de detalhe dificulta que a solução escolhida seja a ideal, porque em cada nível a avaliação com o relevo do terreno e respetivas condicionantes é feita com pouco detalhe, sendo que as decisões tomadas nos níveis anteriores condicionam as escolhas nos níveis seguintes. A partir do momento em que a localização de um vértice do traçado é determinada, esta não volta a ser processada. Por outro lado, poucos níveis implicam maior peso computacional a processar a relação com o relevo do terreno e condicionantes, ao analisar com maior detalhe cada alternativa de traçado. A estratégia da geração do traçado por níveis de detalhe corresponde ao método utilizado em engenharia de vias para conceção de um traçado rodoviário (secção 2.1), o que facilita a parametrização do número de níveis adequado.

Uma característica inovadora deste método é o facto de a obtenção do traçado final de uma estrada ser realizado de forma hierárquica em níveis, permitindo a partir da definição de uma ligação entre dois pontos, caminhar no sentido de obter a solução ótima de traçado, considerando a definição do modelo do terreno e respetivas condicionantes. A definição de traçado resultante contém a pormenorização necessária à geração do modelo virtual.

### 3.2 Avaliação de traçado

Na geração procedimental de um traçado rodoviário são realizadas avaliações em diferentes níveis. Ao nível da escolha do vértice do corredor é analisado a sua localização (ver secção 4.2), de forma a posteriormente garantir o desenvolvimento do traçado em planta, com a implantação de curvas que cumpram as normas de projeto. Ao nível do corredor, a escolha da melhor alternativa é realizada recorrendo a uma função de custo que avalia os diversos parâmetros considerados. Após obter o traçado em planta é realizada uma avaliação às características de sinuosidade da estrada.

#### 3.2.1 Avaliação de alternativas de traçado

Os custos utilizados nesta abordagem para a avaliação de alternativas de traçado de uma estrada refletem a influência do relevo do terreno e respetivas condicionantes. Para avaliar as diferentes alternativas de traçado, calcula-se o custo total de uma alternativa de traçado, como sendo o soma pesada de todos os custos parciais. Os custos parciais considerados na avaliação de um traçado são: zona classificada, construção em ponte, construção em túnel, movimento de terras, construção da via e custo de utilização. Uma zona classificada é definida como uma área geográfica em planta que representa uma determinada condicionante, como por exemplo água, floresta ou edificações. Para determinar o impacto do traçado de uma via sobre uma zona classificada é necessário proceder ao cálculo da área da zona classificada afetada pela passagem da estrada. Para determinar se uma porção de extensão da estrada é construída em ponte ou túnel é feita uma análise à diferença entre a cota do terreno e a cota da estrada. Ao longo do traçado da via é considerada construção em ponte se a diferença entre a cota da estrada e a cota do terreno for superior ao valor de referência. Também é considerada construção em ponte sempre que a estrada atravessa água, por exemplo: rio ou lago. É considerada construção em túnel sempre que a altura entre a cota do terreno e a cota da estrada for superior aos valores de referência, na combinação entre altura e extensão. A extensão da via considerada em construção diretamente sobre o terreno é obtida retirando à extensão total, a extensão de construção em ponte e em túnel. Para efetuar o cálculo do volume de terras é necessário analisar a diferença ( $h$ ) entre a cota do terreno e a cota da estrada. O volume de aterro é calculado quando se verificam simultaneamente as seguintes condições:  $0 < |h| < h_{\text{refill}}$  e a estrada não atravessa água ( $h_{\text{refill}}$  corresponde à altura ( $h$ ) de referência para aterro). O volume de escavação é calculado quando se verificam simultaneamente as seguintes condições:  $0 < |h| < h_{\text{refexc}}$  ( $h_{\text{refexc}}$  corresponde à altura

( $h$ ) de referência para escavação). Nas extensões de estrada ocupadas por ponte ou túnel não é calculado movimento de terras, pois têm custos específicos. Na avaliação de traçados é calculado um custo, designado por custo de utilização, que está relacionado com a variação em altimetria do traçado da via ( $\Delta z$ ) e com o índice de utilização. Considerando que cada ligação a tratar não tem nós de interligação, o índice de utilização ( $U$ ) é calculado em função da extensão total da via e da população dos nós extremos (8).

$$U = PA * PB / L^2 \quad (8)$$

O índice de utilização ( $U$ ) reflete a circulação de veículos (pessoas), nos dois sentidos, entre os dois nós (cidades). Os valores de referência para os custos analisados no estudo de alternativas de traçado foram determinados recorrendo a especialistas da área de projeto de vias de comunicação.

#### 3.2.2 Avaliação das características de traçado

Os traçados rodoviários gerados pelo método proposto devem apresentar características geométricas semelhantes às encontradas em estradas reais. De forma a validar o método de geração de traçados recorreu-se aos seguintes indicadores: índice de sinuosidade em planta ( $I_s$ ), análise no domínio da curvatura recorrendo à transformada discreta de Fourier (Discret Fourier Transform, DFT) e índice de curvatura ( $I_c$ ). O índice de sinuosidade em planta é calculado através da divisão do valor acumulando de todas as variações de direção ( $\alpha_i$ ) da estrada pela extensão total sobre o eixo da via  $L$  (9).

$$I_s = \sum \alpha_i / L \quad (9)$$

Os valores apresentados na tabela 1, foram determinados analisando traçados reais do tipo autoestrada (A25).

**Tabela 1. Valores de referência de indicadores**

Indicador	Valor de referência	Desv. padrão( $\sigma$ )
Índice de sinuosidade	737,40	72,02
Índice de curvatura	0,96	0,4

A transformada discreta de Fourier permite analisar a sinuosidade de uma estrada pela decomposição do traçado em séries sinusoidais. A transformada discreta de Fourier, quando aplicada a um conjunto de amostras no domínio dos tempos, resulta num conjunto de amplitudes de componentes sinusoidais no domínio das frequências [Mitra05] [Ingle12]. Neste caso quando aplicada a amostras no domínio do comprimento ( $m$ ), resulta numa série de coeficientes no domínio da curvatura ( $m^{-1}$ ). A transformada rápida de Fourier é amplamente usada em diferentes áreas científicas como por exemplo: engenharia, ciências e matemática. Do trabalho de investigação realizado anteriormente, conclui-se que os coeficientes da transformada discreta de Fourier para traçados do tipo autoestrada deixam de ter significado a partir do elemento 10. O índice de curvatura ( $I_c$ ) é determinado pela relação entre a extensão da estrada em curva e a sua extensão total (10).

$$I_c = \text{Extensão em curva} / \text{Extensão da via} \quad (10)$$

Este indicador permite aferir qual porção do traçado da via que é descrito em curva face à extensão total. Tipica-



mente em traçados do tipo autoestrada, este índice tende a ter um valor próximo da unidade.

#### 4. IMPLEMENTAÇÃO

Na implementação do protótipo, começou-se por desenvolver o traçado em planta, desde a escolha dos vértices

Tabela 2. Parâmetros utilizados para definição dos corredores (km)

Nível	$L_{min} >$	$L_{max} \leq$	Corredor inicial (largura)	$L_{paragem} <$	Corredor gerado (largura)
1	$0,02 * V_b (i)$	10	5	$0,02 * V_b (i)$	1
2	10	50	20	10	5
3	50	200	100	50	20
4	200	1000	500	200	100
5	1000	5000	2000	1000	500

(i)  $V_b$ , velocidade base de projeto em km/h. Por exemplo,  $V_b=120$  km/h,  $L_{paragem} = L_{min} = 2400$  m.

##### 4.1 Geração de corredores

O processo de geração de um traçado é realizado hierarquicamente em níveis, aumentando o detalhe à medida que o processo avança para os níveis seguintes. Em cada nível são geradas diferentes alternativas de traçado. Cada alternativa representa um corredor com uma determinada largura. O nível em que o processo se inicia depende da extensão inicial da ligação entre os dois pontos. Segundo a tabela 2, é possível determinar em que nível o processo se inicia e quantas iterações serão realizadas até obter o traçado rodoviário em alinhamentos retos. Em engenharia de vias, a geração de um traçado rodoviário em alinhamentos retos também é realizada em níveis. A construção da tabela 2 foi inspirada nos métodos utilizados em engenharia de vias para conceção de um projeto de traçado rodoviário. Na tabela 2 os parâmetros  $L_{min}$  e  $L_{max}$  correspondem aos limites mínimos e máximos da extensão inicial entre dois pontos, que permitem determinar em que nível se inicia o processo de geração de corredores. A geração de um novo corredor, com largura definida pelo parâmetro *Corredor gerado*, é realizada dentro de um corredor com largura definida pelo parâmetro *Corredor inicial*. Essa geração termina quando já não existir alinhamentos com extensão superior à condição de paragem definida pelo parâmetro  $L_{paragem}$ . Como exemplo: uma ligação inicial entre dois pontos com extensão de 150km, pela tabela 2, o processo de geração do traçado inicia-se no nível 3 ( $50 < 150 \leq 200$ ). A partir de um corredor inicial com 100 km de largura é gerado um novo corredor com 20 km de largura.

##### 4.2 Geração de vértices do corredor

O processo de geração de um novo corredor consiste na divisão binária sucessiva da ligação inicial entre dois pontos, adicionando-se novos vértices à definição do traçado. A figura 2 exemplifica a obtenção de um novo vértice, na geração de corredores.

Entre os vértices A e B da figura 2, é determinado o ponto médio (m), obtendo-se o vetor  $\overrightarrow{Am}$ . É introduzida uma perturbação no módulo do vetor  $\overrightarrow{Am}$  de forma a que os novos alinhamentos gerados tenham diferentes extensões. Do resultado dessa perturbação obtém-se o vetor  $\overrightarrow{AP}$ . De seguida calcula-se o vetor tensor  $\overrightarrow{PP'}$ , que é perpendicular

do corredor até à obtenção do traçado em alinhamentos retos. Para a escolha de corredores desenvolveu-se o módulo de avaliação de alternativas. De seguida passou-se ao desenvolvimento do traçado em altimetria com a introdução de concordâncias verticais.

ao vetor  $\overrightarrow{Am}$ , permitindo deslocar o novo vértice para o ponto P'. No cálculo do novo vértice P' é considerada a largura do corredor, para que o novo vértice não se desloque para além dos limites do corredor.

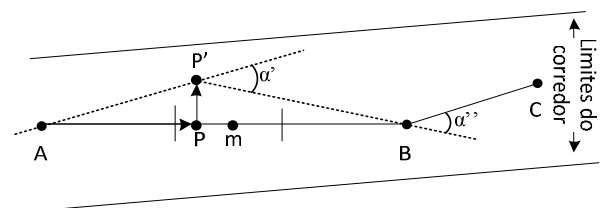


Figura 2. Vértice do corredor

Na determinação do novo vértice P' também é considerado o ângulo formado pelos alinhamentos adjacentes,  $\alpha'$  e  $\alpha''$  da figura 2, impondo um limite máximo de deslocamento para o vértice P'. Dependendo do valor do ângulo dos alinhamentos adjacentes, este limite pode ser inferior aos limites do corredor. Esta consideração permite garantir que posteriormente é possível desenvolver o traçado em planta de acordo com as normas, cumprindo as curvaturas mínimas de traçado [EP94].

A cota dos novos vértices é determinada depois de conhecida a suas localizações em planta. Considerando que a cota dos pontos extremos foi previamente definida pelo preparador do traçado ou por instâncias superiores no processo de geração de corredores, estas não são alteradas. No cálculo da cota do vértice é tida em consideração a inclinação dos segmentos, de forma que esta inclinação se enquadre nos limites impostos pelas normas para o tipo de via em estudo.

##### 4.3 Desenvolvimento do traçado em planta

O traçado em planta tem como principal objetivo a introdução de curvas entre os alinhamentos retos, resultantes do processo iterativo de geração de traçado. É nesta fase que se define o traçado final da via rodoviária, com o pormenor necessário à geração do modelo visual. O traçado em planta vai definir o eixo da via de uma estrada por uma sequência de retas, arcos e clotoides. Uma clotóide, também conhecida por curva de cornú, tem como função manter a continuidade da 1.ª derivada no traçado de uma via rodoviária, de forma a permitir a transição gradual da variação da aceleração centrífuga entre o troço reto e a curva circular. Esta sequência em termos geomé-

tricos resulta numa curva composta, como se ilustra na figura 3.

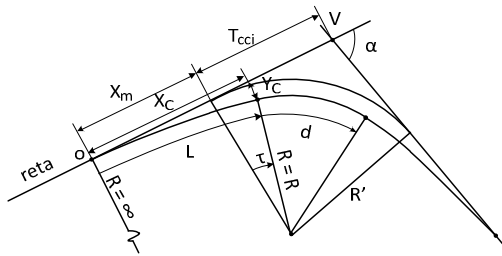


Figura 3. Curva composta simétrica

Dependo do tipo de via, existem parâmetros a nível geométrico que constam das normas de traçado que devem ser respeitados, como por exemplo: parâmetro da clotoide e raio mínimo em planta. Os valores mínimos admissíveis para estes parâmetros estão relacionados com a velocidade base do projeto da via. Conhecido o raio (R) do arco da curva circular, o parâmetro (A) da clotoide e o ângulo ( $\alpha$ ) entre os dois alinhamentos retos é possível determinar os restantes elementos. Os elementos em falta são: a extensão (L) de desenvolvimento da clotoide, o ângulo da tangente no ponto final da clotoide (tau), o valor do desvio do raio devido à introdução da clotoide, e o ponto de osculação (O) situado no fim do alinhamento reto e início da clotoide. Para determinar o ponto de osculação ainda é necessário determinar os parâmetros Tcci e  $X_m$  da figura 3. A distância Tcci é calculada pela seguinte equação:

$$Tcci = (R + \Delta R) * \tan(\alpha/2) \quad (11)$$

onde, R é o raio da curva circular,  $\Delta R$  variação do raio com a introdução de clotoide e  $\alpha$  o ângulo entre os dois alinhamentos. O parâmetro  $X_m$  é calculado pela equação (12) e o parâmetro  $X_c$  é calculado pela equação (13).

$$X_m = X_c - R * \sin(\tau_{Max}) \quad (12)$$

onde,  $\tau_{Max}$  corresponde ao ângulo da tangente no ponto final da clotoide.

$$X_c = L - (L^5/40 A^4) + (L^9 / 3456 * A^8) \quad (13)$$

onde, L corresponde desenvolvimento da clotoide, e A ao parâmetro da clotoide.

#### 4.4 Desenvolvimento do traçado em altimetria

O traçado em perfil longitudinal (tendo em consideração a altimetria) tem como objetivo adequar a cota da via ao relevo do terreno. O perfil longitudinal deve aproximar-se o mais possível da cota do terreno, minimizando desta forma o volume de movimentos de terras e outro tipo de construções como pontes e túneis, diminuindo os custos totais de construção. Para traçar o perfil longitudinal é necessário fazer um levantamento com espaçamento regular da cota do terreno sobre o eixo da via da estrada. Após conhecer a relação entre a definição do terreno e o traçado da estrada, procede-se à definição dos traneis,  $t_1$  e  $t_2$ , e dos vértices em altimetria ( $v_1, v_2, v_3$ ) como se exemplifica na figura 4. Os traneis  $t_1$  e  $t_2$  correspondem aos alinhamentos retos em altimetria.

No método proposto, na escolha da localização dos vértices no traçado em planta é estudada a relação com o terreno, que posteriormente também é estudada em perfil longitudinal na escolha dos vértices dos traneis. Por

aproximação, nesta abordagem, os vértices dos traneis em perfil longitudinal são os mesmos vértices do traçado em planta, afetados pela introdução da curva composta. Conhecida a inclinação  $i_1$  e  $i_2$  dos traneis  $t_1$  e  $t_2$ , formados pelos vértices  $v_1, v_2$  e  $v_3$  da figura 5, e o raio de concordância vertical, estão definidos todos os elementos necessários para traçar a concordância vertical, definida matematicamente por uma parábola.

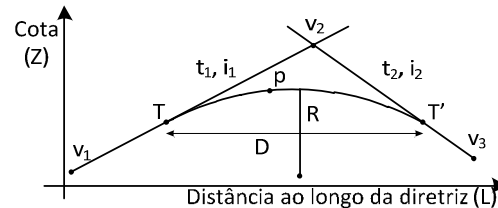


Figura 4. Concordância em perfil longitudinal

Como se pode ver na figura 4, a concordância é implementada entre os pontos T e T', com uma extensão (D) de desenvolvimento. A extensão (D) de desenvolvimento da concordância é obtida em função da inclinação ( $i_n$ ) dos traneis e do raio (R) (14).

$$D = R * (i_1 - i_2) \quad (14)$$

O ponto T é determinado conhecendo a extensão do tranel  $t_1$ , e o desenvolvimento (D) da concordância (15).

$$T = t_1 - D/2 \quad (15)$$

A cota do ponto T é determinada em função da cota do ponto inicial do tranel ( $C_1$ ), a inclinação do tranel ( $i_1$ ) e a extensão ( $t_1$ ) do tranel (16).

$$CT = C_1 + i_1 * (t_1 - D/2) \quad (16)$$

A cota de um ponto p na concordância é calculada em função da cota do ponto T, da inclinação do tranel e da distância percorrida ao longo da concordância (17).

$$C_p = CT + (i_1 * d - d^2/2 * R) \quad (17)$$

Ao longo do traçado é determinada a cota dos pontos com o mesmo intervalo, que é utilizada no traçado em planta. Assim pode-se facilmente fazer a correspondência entre os pontos do traçado em planta e os pontos do perfil longitudinal, como se exemplifica na tabela 3.

Tabela 3. Piquetagem em perfil longitudinal

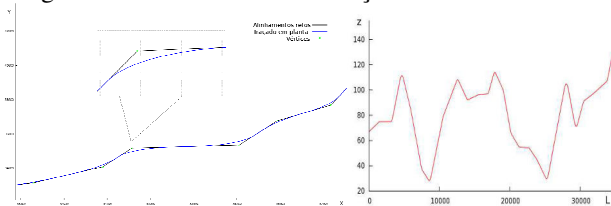
Km	M	P	Km	Cota
0+000	0	0	0+000	101,321
0+025	20	15	0+025	101,329
0+050	40	30	0+050	101,336

## 5. RESULTADOS

Para avaliação do método proposto e para efetuar uma análise crítica dos resultados obtidos, foi elaborado o seguinte caso de estudo: Pretende-se obter o traçado rodoviário para uma ligação do tipo autoestrada, sem nós de interligação, entre a cidade do Porto e a cidade de Braga. Considerou-se a população do Porto de 273584 habitantes e a população de Braga de 93587 habitantes. Esta ligação terá uma faixa com duas vias em cada sentido correspondendo no total a uma largura de referência de 40m. A velocidade base de projeto é de 120 km/h. Para o

problema apresentado foram gerados procedimentalmente 8 traçados rodoviários do tipo autoestrada, utilizando o protótipo implementado e descrito na secção 4.

O modelo de terreno real em mapa de elevação no formato GEOTIFF afeto à ligação, foi obtido do repositório United States Geological Survey (earthexplorer.usgs.gov). As condicionantes foram definidas para uma área geográfica afetada pelo traçado da via. Nesta implementação, as áreas que representam condicionante são definidas num ficheiro de imagem no formato tiff [Libtiff14]. No processo de geração do traçado, obtém-se diferentes representações do eixo da via. Na figura 5, apresenta-se na imagem da esquerda o traçado em alinhamentos retos (preto) e o traçado em planta (azul), na imagem da direita o traçado em altimetria.



**Figura 5. Traçado em alinhamentos**

Na figura 6, apresenta-se um ambiente 3D gerado a partir de uma definição de traçado obtida procedimentalmente.



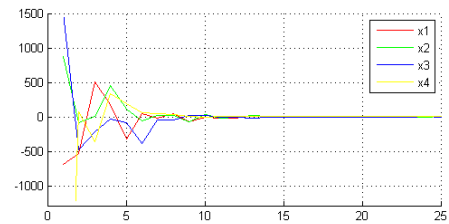
**Figura 6. Ambiente rodoviário (autoestrada)**

Para o traçado final gerado, fez-se uma análise de custos. Considerando os vários parâmetros, zona floresta, construção da via, em ponte e túnel, movimento de terras e custo de utilização, obteve-se um custo total de 314,00 M€, o que corresponde a um valor de 6,70 M€ por quilómetro. Este valor enquadra-se dentro dos valores expectáveis para a construção de vias do tipo autoestrada.

O índice de sinuosidade em planta ( $I_s$ ) é um dos indicadores a usar para analisar a sinuosidade de traçados rodoviários gerados pela abordagem apresentada, com estradas reais. Para cada um dos 8 traçados gerados procedimentalmente, calculou-se o índice de sinuosidade, obtendo-se o valor médio de 728,75. O valor de sinuosidade em planta calculado para os traçados gerados enquadra-se na gama de valores admissíveis (valor de referência  $\pm 1\sigma$ ), tendo como base o valor de referência da tabela 1. Pelo valor médio obtido para o índice de sinuosidade em planta, pode-se concluir que os traçados gerados pelo método proposto são semelhantes a traçados reais do tipo autoestrada.

Para se poder calcular a transformada discreta de Fourier é necessário efetuar uma discretização do traçado, sendo este amostrado com uma frequência de uma amostra por

metro ( $f_s = 1 \text{ m}^{-1}$ ). Nesta análise apenas forma considerados 4 dos traçados rodoviários gerados procedimentalmente, calculando-se as respetivas transformadas rápidas de Fourier, obtendo-se as representações apresentadas na figura 7.



**Figura 7. Análise de curvatura (autoestrada)**

Como se pode ver pela figura 7, as respetivas transformadas apresentam um valor eficaz próximo de zero a partir do elemento 10. Em estudos realizados no âmbito deste trabalho conclui-se que traçados reais do tipo autoestrada apresentam curvas com valor eficaz próximo de zero a partir do elemento 10. A análise efetuada no domínio da curvatura permite concluir que os traçados do tipo autoestrada gerados apresentam características de sinuosidade em planta semelhantes aos traçados reais.

Calculou-se o índice de curvatura (10) para os traçados gerados procedimentalmente, obtendo-se o valor médio de  $I_c = 0,93$ . Fazendo uma análise comparativa entre o valor médio obtido para os traçados gerados procedimentalmente com o valor de referência para este indicador, conclui-se que os valores de  $I_c$  são da mesma ordem de grandeza e enquadrados nos limites de variância admissível (valor de referência  $\pm 1\sigma$ ). Com a análise efetuada ao índice de curvatura, pode-se afirmar que os traçados obtidos procedimentalmente do tipo autoestrada são semelhantes aos traçados reais, em termos de índice de curvatura.

Efetuada uma análise em termos de tempo, conclui-se que o método proposto comparado com metodologias mais recentes apresentadas por Galin et al. em 2010, permite reduzir significativamente o tempo necessário para a obtenção de traçados (15%), mantendo os padrões de realismo exigidos. Esta redução de tempo é mais significativa em traçados de grandes dimensões ( $> 50 \text{ km}$ ), independentemente da dimensão da grelha do terreno.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Experiências realistas de simulação de condução requerem a prévia preparação de modelos de ambientes rodoviários corretamente modelados, com características semelhantes às encontradas em traçado real. O método apresentado neste artigo permite gerar de forma automática qualquer tipo de traçado rodoviário, de grandes dimensões, adequado para simulação de condução para fins científicos.

O processo de geração de traçados rodoviários concebido foi inspirado nos métodos utilizados em engenharia de vias, produzindo estradas segundo as normas e com traçados semelhantes aos encontrados em terreno real. A introdução de curvas compostas em planta e concordâncias verticais em altimetria são dois fatores de relevo que contribuem para o realismo dos traçados obtidos. Os tra-

çados gerados possuem características geométricas segundo as práticas comuns em projeto de vias.

O problema da geração de um traçado entre dois pontos é analisado de forma global, sendo tratado em diferentes níveis de detalhe. A solução final de traçado, gerada em cada nível de detalhe, é determinada recorrendo ao cálculo de diferentes custos, que avaliam a relação com o relevo do terreno e respetivas condicionantes, custo de construção e custo de utilização (secção 3.2.1). Ao longo do processo de geração automática, o traçado rodoviário vai sendo refinado, produzindo no final definições de estradas com a pormenorização necessária à geração de modelos visuais de qualidade.

O método proposto permite obter uma grande diversidade de traçados rodoviários, reduzindo drasticamente o trabalho e os custos envolvidos na sua conceção, uma vez que reduz significativamente o recurso a especialistas da área de projeto de vias de comunicação para obtenção de dados de projeto de estradas. A realização deste trabalho traduz-se num contributo inovador na geração automática de traçados rodoviários realistas. Uma das principais vertentes de aplicação desta abordagem será a geração de traçados rodoviários adequados à simulação de condução, permitindo a realização de estudos científicos nas mais diversas áreas.

Num futuro próximo, será possível apresentar modelos de estradas de diferentes tipos (rural, autoestrada) e os resultados da avaliação experimental em simulador com especialista da área de projeto.

## 7. AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de investigação contou com o contributo especial do diretor do laboratório de análise de tráfego, onde se encontra instalado o simulador de condução DriS, Prof. Dr. Carlos Rodrigues do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, e do Prof. Ângelo Jacob do Departamento de Engenharia Civil do ISEP.

O projeto MAT (Media Arts and Technologies - NORTE-07-0124-FEDER-000061), é financiado pelo Programa Operacional Regional do Norte (ON.2 – O Novo Norte), através do Quadro de Referência Estratégico Nacional 2007/2013, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (Feder) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

## 8. REFERENCIAS

- [Bayarri96] Bayarri, S; Fernandez, M; Perez, M; Virtual Reality for driving simulation-Bayarri, Vol. 39, n.º 5, Communications of the ACM, 1996.
- [Campos07] Campos, C.; Leitão, J.; Rodrigues, C.; Modelação de Ambientes Rodoviários de Grandes Dimensões, 15.º Encontro Português de Computação Gráfica, Outubro de 2007.
- [Campos12] Campos, C., Leitão, J., Coelho, A.; Modelação Procedimental de Ambientes Rodoviários para Simulação de Condução, 20.º Encontro Português de Computação Gráfica, Outubro de 2012.
- [Coelho07] Coelho, A.; Bessa, M.; Sousa, A.; Ferreira, N.; Expendious modeling of virtual urban environments with geospatial L-systems; Computer Graphics Forum, Vol. 26, N. 4, pp. 769–782, 2007.
- [EP94] Normas de traçado, Junta Autónoma das Estradas, Atual Estradas de Portugal (EP), ISBN-96379-6-2.
- [França11] França, A.; Apontamentos de vias de comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 2011.
- [Galin10] Galin, E.; Peytavie, A.; Maréchal, N.; Guérin, E.; Procedural Generation of Roads, EUROGRAPHICS, Volume 29, 2010.
- [Galin11] Galin, E.; Peytavie, A.; Guérin, E.; Benes, B.; Authoring Hierarchical Road Networks, Pacific Graphics, Volume 30, 2011.
- [Ingle12] Ingle, V., Proakis, J.; Digital Signal Processing Using MatLab, Third Edition, cap. 3, Gengage Learning, 2012.
- [Kelly08] Kelly, G.; McCabe, H.; Citygen: An Interactive System for Procedural City Generation. GDTW, UK, 2008.
- [Latham06] Latham, R.; Burns, D.: Dynamic Terrain Modification Using a Correction Algorithm, IMAGE 2006 Conference Scottsdale, Arizona, Julho de 2006.
- [Libtiff14] TIFF Library and Utilities, informação disponível em: <http://www.libtiff.org/>, Abril de 2014.
- [Mitra05] Mitra, S.; Digital Signal Processing, A Computed-Based Approach, third Edition, cap. 3, McGraw-Hill, 2005
- [OpenDrive10] OpenDRIVE, Format Specification REV 1.3, documento disponível em: <http://www.opendrive.org/docs/OpenDRIVEFormatSpecRev1.3D.pdf>, Agosto de 2010.
- [Pareja99] Pareja, I.; Bayarri, S.; Rueda, S.; Modelado de calidad para la visualización interactiva de carreteras, IX Congreso de Ingeniería Informática, 1999.
- [Parish01] Parish, Y.; Muller, P.; Procedural Modeling of Cities; ACM Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'2001), pp. 301-308, 2001.
- [Smelik08] Smelik R. M.; Tutenel T.; Kraker K.J.; Bidarra R.; A Proposal for a Procedural Terrain Modelling Framework, EGVE Symposium, 2008.
- [Smelik11] Smelik, R., Tutenel, T., Kraker, J., Bidarra, R.; A declarative approach to procedural modeling of virtual worlds, Computer & Graphics Journal, Elsevier, 2011.
- [Teoh08] Teoh, S.; Algorithms for the Automatic Generation of Urban Streets and Buildings, Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Virtual Reality (CGVR'08), Julho 2008.
- [Thomas00] Thomas, G. and Donikian, S.; Modelling Virtual Cities Dedicated to Behavioural Animation. EUROGRAPHICS 2000, vol. 19(3), 2000.