Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Pós-Graduação em Ciência da Computação

Um Modelo de Iluminação Probabilístico para Renderização de Pelagem Animal sob Influência de Água

Hemir da Cunha Santiago

Dissertação de Mestrado

Recife
03 de Março de 2009

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Hemir da Cunha Santiago

Um Modelo de Iluminação Probabilístico para Renderização de Pelagem Animal sob Influência de Água

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: *Prof. Dr. Marcelo Walter*

Recife
03 de Março de 2009

A vida do homem não é nada mais do que um simples piscar de olhos, um curto momento... Nesse pouco tempo, as pessoas nascem, riem, choram, lutam, são feridas, sentem alegria, tristeza, odeiam alguém, amam alguém... Tudo em um só momento.

Agradecimentos

Agradeço a todos os amigos e colegas que me ajudaram na realização deste trabalho e também aos que me incentivaram e me apoiaram durante o curso de Mestrado.

Em especial, agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Walter, meu orientador, pela sua dedicação, pela sua orientação, pela sua paciência e por tudo o que eu pude aprender com ele na área de Computação Gráfica e na vida acadêmica.

Faço um agradecimento especial também aos meus pais, Dalva e Hemir, que sempre acreditaram em mim, pelo incentivo ao estudo e à formação profissional.

E por fim, agradeço à minha noiva Cristina pelo apoio, pela paciência e por ser extremamente solidária nos momentos mais importantes para que eu conseguisse cumprir os prazos regimentais do curso.

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.
—ISAAC NEWTON

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo de iluminação probabilístico implementado em GPU (*Graphics Processing Unit*) para renderização de pelagem rala de mamíferos sob influência do ambiente, particularmente água. Nós estendemos a técnica conhecida como *Fakefur* incluindo um método que captura as características principais do pêlo no estado de molhado. Uma função de umidade é usada para controlar o nível de umidade do pêlo por variação de alguns parâmetros-chave de renderização. Algumas fotos de cães secos e molhados foram usadas para calibrar os parâmetros do sistema. O sistema descrito neste trabalho tem uma complexidade computacional muito menor do que os métodos de renderização de pêlos tradicionais, devido não apenas à sua natureza probabilística, mas também por sua implementação em GPU, que possibilita renderização de pelagem animal seca e molhada em tempo-real.

Palavras-chave: Renderização de pêlo seco e molhado, Renderização em tempo-real, Programação em GPU.

Abstract

This work presents a GPU based probabilistic lighting model for rendering of thin fur of mammals under environmental influence, particularly water. We have extended the technique known as Fakefur by adding a method for capturing the key characteristics of fur influenced by water. A wetness function is used to control the wetness level of the fur by variation of some key rendering parameters. Real-world pictures of dry and wet dogs were used to calibrate the system's parameters. The system described in this work has a much lower computational cost than typical resolvable fur methods, due not only to its probabilistic nature, but also to its GPU implementation, that provides realtime renderings of furry animals dry and wet.

Keywords: Wet and dry fur rendering, Realtime rendering, GPU programming.

Sumário

1 INTRODUÇÃO **1**
1.1 Objetivos 3
1.2 Organização da Dissertação 4

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **5**
2.1 Renderização de Pêlos 5
2.1.1 Texturas Tridimensionais 6
2.1.2 *Pixel Blending* 8
2.1.3 Modelagem Interativa de Pêlo 10
2.1.4 *Fake Fur* 11
2.1.5 Pêlo em Tempo-Real 12
2.2 Renderização de Mudança de Estado 14
2.2.1 Pátinas Metálicas 15
2.2.2 Pedras sob a Ação do Tempo 16
2.2.3 Materiais Molhados 18
2.2.4 Geração de Pêlo Molhado 19
2.2.5 Simulação de Cabelo Molhado 21
2.3 Discussão 22

3 MODELO **24**
3.1 *Fake Fur Rendering* 24
3.1.1 Função de Iluminação 25
3.1.2 Função de Opacidade 27
3.1.3 Usando a Função de Opacidade no Modelo 29
3.1.4 Mapa de Tangente Dinâmica 30
3.2 Modelando o Efeito da Água 31
3.2.1 Função de Umidade 32
3.2.2 Mapa de Umidade 33
3.3 Unidade de processamento gráfico - GPU 35

4 RESULTADOS **37**
4.1 Dados Reais para Pêlo Seco e Molhado 37
4.2 Estudo de Caso 40
4.3 Outras Simulações 43

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS **49**
5.1 Conclusões 49
5.2 Trabalhos Futuros 50

Lista de Figuras

1.1 Exemplo de resultado obtido com o modelo *Fake Fur Rendering* [Gol97] 2
1.2 Fotos de cão da raça *Dachshund*. 3

2.1 Evolução das técnicas de renderização de cabelo e pêlo. 6
2.2 Resultado obtido por Kajiya [KK89]. 7
2.3 Geometria de iluminação do fio de cabelo [LTT91]. 9
2.4 Resultado obtido por Gelder e demais autores [GW97] mostra um mesmo modelo 3D em posições diversas. 10
2.5 Resultado obtido por Goldman [Gol97]. 12
2.6 Pré-processamento da geometria. Entrada: malha e campo de vetor, Saída: *patches*. [LPFH01] 13
2.7 Resultados obtidos por Lengyel et al [LPFH01]. 13
2.8 Evolução das técnicas de renderização de mudança de estado. 14
2.9 Uma superfície de pátina como uma pilha de camadas. (a) Micro-fotografia de uma superfície de cobre mostrando as camadas. (b) Abstração utilizada na técnica para estrutura em camadas. [DH96] 15
2.10 Resultado obtido por [DH96] 16
2.11 Resultado obtido por [DEL$^+$99] 17
2.12 Uma camada de água acima da superfície reflete menos luz devido à reflexão interna na interface água-ar. [JLD99] 18
2.13 Depois de muitos eventos de espalhamento, o caminho mais curto que um fóton pode tomar para deixar a superfície (a) com ângulo de 90 graus de espalhamento médio e (b) com ângulo de 30 graus de espalhamento médio. [JLD99] 18
2.14 Rocha e areia da praia com diferentes funções de umidade. (a) seco, (b) misturado seco e molhado, (c) água cobrindo a rocha e (d) completamente molhado [JLD99]. 19
2.15 Clump-percentagem e taxa [Bru99]. 20
2.16 Três *frames* de uma sequência animada de *clumping* de área estática [Bru99]. A primeira cabeça da esquerda para a direita mostra a aparência do pêlo quando seco, a segunda ilustra uma aparência intermediária (parcialmente molhado) e a última mostra o pêlo complemente molhado. 21
2.17 Cabelo molhado à esquerdo e seco à direita. Resultado obtido por [WGL04]. 22

3.1 Geometria do pêlo-referência 24
3.2 Tipos de iluminação baseados na posição dos vetores em relação ao fio de pêlo. [Gol97] 26

3.3 O mesmo modelo 3D com o observador (câmera) em direções diferentes (a), em (b) são as fontes de luz (duas) que mudam de direção. 27
3.4 Modelo 3D de Dachshund com textura de pêlo de Dálmata. $\rho_{reflect}$ e $\rho_{transmit}$ são iguais a 0,5. 28
3.5 Modelo 3D de Dachshund com diferentes valores para $\rho_{reflect}$ e $\rho_{transmit}$. 28
3.6 Textura de pêlo de dálmata usada como Mapa de Tangente Dinâmica e o efeito visualizado no modelo 3D. 30
3.7 Mapa de Tangente Dinâmica e o efeito visualizado no modelo 3D. 31
3.8 Mapa de Tangente Dinâmica e o efeito visualizado no modelo 3D. 31
3.9 Parâmetros *Fake Fur Rendering* X Função de Umidade 34
3.10 Mapas utilizados na simulação do pêlo mudando do estado seco para molhado e vice-versa, ao longo do tempo. 35
3.11 *Pipeline* gráfico das GPUs 36
3.12 *Pipeline* gráfico simplificado 36

4.1 Cão da raça Dachshund com pêlo marrom. 38
4.2 Cão da raça Dachshund com pêlo preto. 39
4.3 Diferenças entre as Medianas e entre as Médias para o canal $CIEL*$ em amostras distintas. 40
4.4 Resultados para Basset e Dachshund marrom com pêlo seco e molhado, também a imagem de diferença entre eles. 41
4.5 Um Dachshund preto real com pêlo molhado e um modelo gerado pelo modelo *Dry and Wet Fake Fur*, para este modelo: K_s = 0,4 e f_u = 100%. Os demais parâmetros são iguais aos das tabelas 4.1 e 4.2. 42
4.6 Um Dachshund real com pêlo seco na cor amarelo queimado e modelos 3D com valores diferentes para a Função de Umidade (F.U.). 43
4.7 Variação de seco para molhado em dois tipos de pêlo no modelo 3D do Dachshund. No caso do pêlo marrom, à direita estão as imagens de diferença em relação ao pêlo totalmente seco (Função de Umidade = 0%). No caso do pêlo de Dálmata, à direita estão as imagens de diferença em relação ao valor anterior da Função de Umidade. 44
4.8 Um mesmo modelo 3D renderizado com as diversas texturas usadas nas simulações. 45
4.9 Outro modelo 3D de cachorro com variação da Função de Umidade, à direita são mostradas as imagens de diferença em relação à primeira imagem do cachorro com pêlo seco. 46
4.10 Modelo 3D de um tigre com variação da Função de Umidade, à direita são mostradas as imagens de diferença em relação à primeira imagem do tigre com pêlo seco. 47
4.11 Modelos 3D dos outros animais utilizados nas simulações e seus respectivos Mapas de Textura e Umidade. 48

Lista de Tabelas

3.1 Variação da Função de Umidade. 35

4.1 Parâmetros fixos do *Fake Fur Rendering*. 40
4.2 Parâmetros para pêlo seco e molhado usados nos modelos da figura 4.4. 42
4.3 Modelo 3D e respectivo coeficiente especular (K_s). 44

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A obtenção de imagens digitais que representem objetos e cenários de forma cada vez mais visualmente fiel é um dos desafios da Computação Gráfica. Dada uma descrição em alto nível da cena (os objetos que a compõem e suas propriedades materiais, as fontes de iluminação, etc), a renderização é o processo genérico que sintetiza a imagem. Este processo aplica-se essencialmente em programas de modelagem e animação, como forma de visualizar a imagem final da cena.

Para renderizar uma cena são necessários três elementos: objetos, fontes de luz e câmera. Os objetos têm uma representação geométrica acrescida das propriedades do material, por exemplo: se o objeto é transparente ou se reflete luz especularmente ou não. Quanto às fontes de luz, é necessário definir seus níveis de intensidade e suas posições na cena. Lembrando que é a iluminação da cena que nos permite visualizar as cores dos objetos renderizados. Por fim, temos a posição da câmera (ou observador virtual), que vai determinar como o usuário visualizará a cena. Dependendo da posição da câmera, a interação entre objetos e iluminação poderá ser percebida de várias formas diferentes. Devido à grande quantidade de informação necessária para renderizarmos uma cena por completo, é possível perceber porque o ato de renderizar exige grande capacidade computacional, modelos mais fiéis à realidade de interação da energia luminosa com a matéria são exemplos de renderizações que demandam uma grande quantidade de informação.

A renderização de pêlos e cabelos é um problema complexo da Computação Gráfica, principalmente pela forma que interagem com a luz. Ambos são compostos dos mesmos materiais, células mortas produzidas por folículos na pele dos mamíferos. Geralmente, chamamos de pêlos se cobrem a maior parte do corpo e são relativamente curtos. Chamamos de cabelo se é limitado a algumas regiões do corpo, como a cabeça, por exemplo. O pêlo vem a ser mais desafiador do que o cabelo porque se apresenta em dois ou três diferentes tipos no mesmo animal e pode variar bastante de cor em diferentes partes do corpo, ou mesmo em um único fio.

Modelagem e animação de animais é um problema complexo e difícil, sendo a simulação de suas pelagens um aspecto desafiador do problema, visto que o pêlo consiste de milhares de fios individuais curvos que podem se mover independentemente e interagem de uma forma complexa com a luz. Entretanto, o pêlo é essencial se o objetivo é criar animais virtuais com boa qualidade visual [GW97].

Atualmente, em muitos casos, a renderização de pêlos é tipicamente realizada por uma modelagem força-bruta, ou seja, milhares de primitivas geométricas que simulam os fios individuais, com um alto custo computacional. Para alguns casos, entretanto, a escala dos fios é menor do que um *pixel*, tornando a abordagem força-bruta ainda mais ineficiente.

A aparência do pêlo de mamíferos é bem diferente de outros materiais, por esta razão muitas

técnicas têm utilizado métodos que renderizam os fios individualmente para atingir um nível satisfatório de realismo, alguns resultados são mostrados no próximo capítulo. Contudo, os animais do mundo-real têm milhares de fios compondo seus pêlos, e as técnicas mencionadas mantêm a mesma complexidade computacional independente do tamanho da imagem em relação à câmera [Gol97].

Um dos modelos mais antigos para renderização de pêlos é o chamado *Real Fur* [KK89]. Contudo devido ao seu alto custo computacional, em que a geometria de cada fio de pêlo é calculada para simulação do efeito de pelagem rala, novos métodos foram propostos para tentar solucionar o problema da complexidade computacional de forma eficiente, dentre eles o *Fake Fur Rendering* [Gol97], que realiza a renderização de pelagens ralas utilizando um modelo de iluminação estatístico como alternativa para reduzir o custo computacional. A figura 1.1 é um exemplo de simulação deste método.

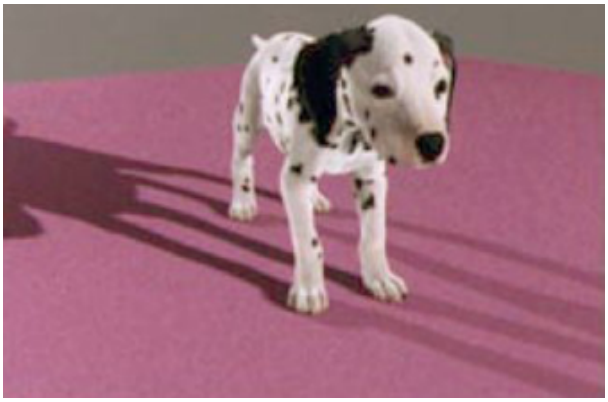
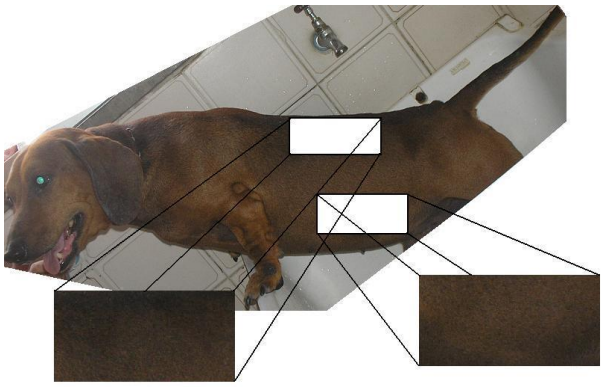


Figura 1.1 Exemplo de resultado obtido com o modelo *Fake Fur Rendering* [Gol97]

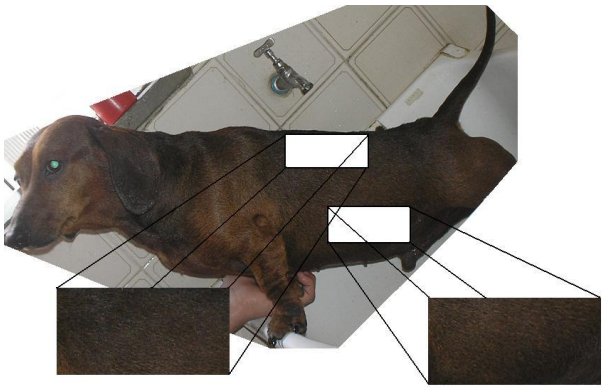
Grande parte das técnicas de renderização se concentra nas características do pêlo no estado seco. Entretanto, animais interagem com água diariamente no mundo real, e não é apenas a aparência do pêlo que muda drasticamente quando ele é molhado [1], algumas mudanças físicas também são resultado da mudança do estado seco para o molhado. Quando o pêlo absorve água, ele se torna mais pesado, mais escuro e apresenta mais brilho em algumas regiões devido à influência da água [TBM86]. Se o objetivo é aumentar o realismo visual das simulações por meio da computação gráfica, as alterações visuais e físicas entre os estados seco e molhado do pêlo devem ser consideradas. A figura 1.2 ilustra a diferença na aparência entre os estados seco e molhado do pêlo em um cão real.

Este trabalho descreve um sistema que identifica essas modificações físicas e ajusta estas propriedades dinamica e gradativamente à medida que o pêlo passa do estado seco para o molhado. É importante ressaltar que as simulações 'close-up' de imagens e de pêlos com fios longos não são o foco deste trabalho, visto que já são bem resolvidas pelas diversas técnicas de modelagem já existentes [KK89] [LTT91] [GW97] [LPFH01] [Pap02] [BW06]. O sistema descrito lida com casos onde a geometria dos fios individuais não é perceptível, mas as características visuais (brilho, opacidade, sombras de pêlo-sobre-pele, etc) são identificadas e

[1] Sempre que for usada a palavra 'molhado' está implícito que o líquido em questão é a água.



(a) Pêlo seco



(b) Pêlo molhado

Figura 1.2 Fotos de cão da raça *Dachshund*.

simuladas. Embora o pêlo não seja renderizado diretamente, ele é utilizado como modelo subjacente para as propriedades de iluminação de superfícies cobertas por pêlos. A forma como o pêlo se modifica à medida que se torna molhado foi alvo de estudos e análises, como resultado o modelo *Fake Fur Rendering* introduzido por [Gol97] foi estendido. Com esta extensão do método *Fake Fur Rendering*, é proposta uma solução para dois problemas da Computação Gráfica: a simulação de pêlos com baixo custo computacional e a simulação de pêlos em mudança de estado seco para molhado e vice-versa.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é a simulação da transição natural do estado seco para molhado, e vice-versa, em mamíferos de pêlo curto como: cães (raças Dachshund, Dálmata, Basset, etc), cavalos, bois, entre outros.

A partir desta idéia foi desenvolvido um método e, consequentemente, uma ferramenta que reproduz modelos 3D sofrendo variações para representar adequadamente as alterações visuais percebidas quando o pêlo é molhado. Estas variações podem ser gradativas ou instantâneas, dependendo da aplicação. Isto será explicado no capítulo 3, que descreve e detalha o modelo

implementado.

O modelo apresentado nesta dissertação fundamenta-se nas idéias apresentadas em [Gol97], onde é proposta uma alternativa de simular pelagem animal rala, e nos conceitos apresentados em [WGL04], onde são descritas as alterações na aparência do pêlo quando este fica molhado, ambos são relatados no capítulo 3. A idéia principal do modelo é estender a técnica de [Gol97], após estudo e análise dos conceitos apresentados em [WGL04], e otimizá-la por meio de implementação em GPU.

1.2 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma: no capítulo 2 são apresentados alguns trabalhos relacionados e a contextualização do trabalho no estado da arte da renderização de pêlos e mudança de estados; no capítulo 3 será exposta nossa técnica otimizada para renderização de pêlos curtos sob a influência da água; no capítulo 4 são apresentados as simulações e os diversos resultados obtidos com a técnica apresentada neste trabalho; e, por fim, faremos uma discussão final sobre o trabalho, os resultados e os trabalhos futuros no capítulo 5.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maioria das tentativas para renderizar pêlos tem usado métodos de 'força-bruta', representando os pêlos com um grande número de polígonos ou partículas. Os problemas primários desses tipos de métodos são o efeito indesejável de *aliasing* e/ou o custo computacional que, em alguns algoritmos, aumentam à medida que o objeto renderizado diminui em tamanho na tela onde é visualizado.

Muitos modelos de iluminação para superfícies complexas utilizam uma abordagem probabilística para micro-estruturas [CT82], [TS67]. O trabalho de [WAT92] estendeu este paradigma para superfícies de geometria mais complexas através da descrição de um método genérico para estimação da função de distribuição de reflexão bidirecional (BRDF) via Monte Carlo por amostragem e parametrização usando *spherical harmonics*. Este método é bem aplicado a superfícies complexas mas uniformemente padronizadas [Gol97].

Este capítulo está dividido em três seções: Renderização de Pêlos, onde apresentamos a evolução das técnicas de renderização de pelagem animal, e respectivos modelos de iluminação, até os dias atuais. Renderização de Mudança de Estado, onde apresentamos a evolução das técnicas de renderização de mudança de estado até os mais recentes métodos de renderização de pêlos sob influência de água. As técnicas que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho são contextualizadas em ambas as seções. Ao final do capítulo, a seção Discussão explica como o trabalho desta dissertacão se relaciona (ou explora) com os trabalhos anteriores.

2.1 Renderização de Pêlos

Desde o começo da utilização de simulação de cabelos e pêlos em Computação Gráfica, diversas técnicas foram apresentadas para solucionar o problema da complexidade computacional envolvida no processo. Uma das primeiras idéias para resolver o problema foi introduzir uma hierarquia de escala, e a cada nível da escala ter um nível correspondente de detalhamento na hierarquia de modelos geométricos. Desta forma, objetos pequenos e complexos (como fios de cabelo ou pêlo) poderiam ter uma hierarquia de representações progressivamente simplificadas geometricamente [KK89]. Recentemente, muitas técnicas visando melhorar a qualidade visual e a performance da renderização de pêlos têm sido apresentadas, estas técnicas se concentram na abordagem força-bruta em que a geometria de cada fio indivualmente é considerada nos cálculos. Entretanto, existem casos em que a geometria do fio é muito menor do que um *pixel*, para estes casos foi apresentada uma técnica que usa um modelo de iluminação probabilístico para simular o pêlo [Gol97], esta dissertação foi desenvolvida com base neste modelo.

Para mostrar a evolução das técnicas de simulação de pêlos, apresentamos na figura 2.1 uma

linha do tempo com os principais trabalhos publicados nos últimos anos. Os trabalhos mais relevantes para esta dissertação são apresentados nas sub-seções a seguir em ordem cronológica.

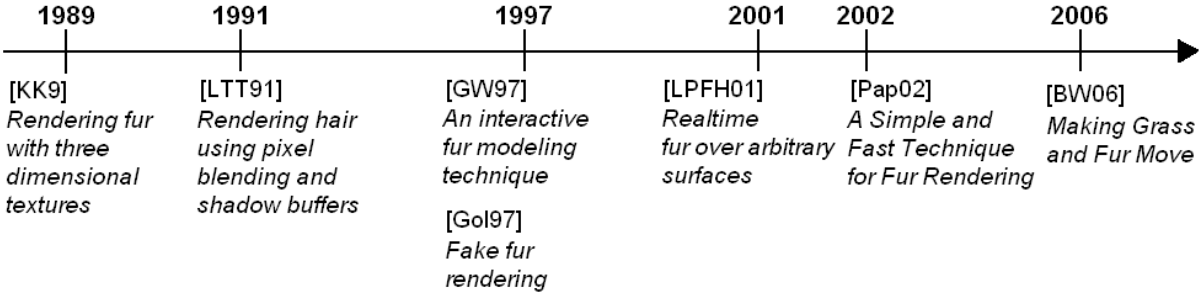


Figura 2.1 Evolução das técnicas de renderização de cabelo e pêlo.

2.1.1 Texturas Tridimensionais

Até o final da década de 80 um grave problema impedia a inclusão de superfícies com pêlos em imagens sintéticas: o problema até então 'intratável' de *aliasing*. Na época pensava-se que o problema de *aliasing* existia porque a geometria utilizada para definir superfícies estava em uma escala inapropriada. Uma possível solução encontrada foi tratar a geometria como textura e não como geometria. Esta nova abordagem foi inicialmente explorada por Kajiya [KK89] que apresentou um método para renderização de cenas com grande nível de detalhamento por meio de um novo tipo de elemento de textura chamado *texel*. Um *texel* é uma textura tridimensional em que uma amostra da superfície e os parâmetros do modelo de iluminação são distribuídos livremente ao longo do volume representado. Um *texel* não é ligado à geometria de nenhuma superfície em particular, na verdade ele representa uma coleção altamente complexa de superfícies contidas dentro de um determinado volume.

Na prática, um *texel* é um *array* tridimensional de parâmetros aproximando as propriedades visuais de uma coleção de microsuperfícies. Se *texels* são usados para substituir a geometria - como árvores em uma montanha, por exemplo - então as micro-superfícies de folhas e galhos serão armazenadas no array de volume. Em cada ponto do espaço, alguns itens devem ser armazenados. Primeiro, a densidade das microsuperfícies, que em certos momentos é vazia no espaço, mas em outros apresenta um conjunto denso de folhas. O segundo item distribuído ao longo do espaço é um modelo de iluminação. Em um *texel*, cada folha não é armazenada como um polígono, em vez disso a coleção de folhas é representada por uma função de espalhamento que modela como a luz é espalhada da coleção agregada de superfícies contidas em uma célula de volume. Esta função de espalhamento é representada por duas quantidades, a primeira é uma amostra, que é uma orientação representativa de uma micro-superfície dentro da célula e a segunda é a função de reflexão.

Os *texels* pretendem simular uma célula de volume que contém pedaços de superfícies. Então o primeiro componente de um *texel* é uma densidade escalar p que representa não o volume relativo, mas uma aproximação para a área projetada relativa da micro-superfície contida dentro da célula de volume. O segundo componente é um grupo de amostras B, que é o local de

orientação da micro-superfície dentro de uma célula de volume. O terceiro componente é um campo de modelos de iluminação ψ, que determina como a luz é espalhada neste pedaço de superfície.

O *texel* é definido matematicamente como um trio p, B, ψ que consiste de uma densidade escalar $p(x,y,z)$, um grupo de amostras $B = [n(x,y,z), t(x,y,z), b(x,y,z)]$ e um campo de funções de reflexão de luz bidirecional:

$$\Psi(x,y,z,\theta,\phi,\psi)$$

A densidade escalar p mede quanto a unidade de área projetada de uma célula de volume é coberta por microsuperfícies. O feixe de *frames* B indica a orientação local das superfícies dentro do *texel*. Ele é um campo de vetores de coordenadas base n,t,b que são chamadas de normal, tangente e binormal, respectivamente. A função de reflexão de luz bidirecional Ψ indica o tipo de superfície contida dentro de B. É possível combinar B e Ψ em um único modelo de iluminação anisotrópica, mas Kajiya [KK89] decidiu separá-los porque um sendo um único componente pode ser considerado uma constante ao longo do volume enquando os demais componentes variam.

Esta técnica conseguiu resolver um problema antigo na síntese de imagem: superfícies com pêlos que podem ser renderizadas utilizando um pequeno número de *texels* (a quantidade depende das dimensões da superfície). Apesar do resultado visual extremamente satisfatório (ver a figura 2.2), o custo computacional desta solução ainda é alto se comparado ao de outras técnicas mais recentes, o que dificulta seu uso em aplicações em tempo-real.

Figura 2.2 Resultado obtido por Kajiya [KK89].

Depois do trabalho revolucionário de Kajiya, outros métodos de renderização de pêlos e cabelos humanos foram apresentados [LTT91] [GW97] [Gol97] [LPFH01] [Pap02] [BW06]. Mas a renderização de cenas naturais complexas ainda permanecia como um importante desafio da pesquisa sobre síntese de imagens. No campo da animação humana, o cabelo era o problema de renderização mais desafiador, entretanto continuava sendo o aspecto de pior qualidade

de renderização em imagens de seres humanos. A dificuldade para renderizar cabelo e pêlo é relativa a quatro pontos-chave: o grande número de fios, a geometria detalhada de cada um, a complexa interação entre luz e sombra, e a escala extremamente pequena em comparação com a imagem renderizada como um todo.

2.1.2 *Pixel Blending*

No início da década de 90, foi sugerida uma técnica para incremento de realismo de cabelo que utilizou um modelo para cada fio: um cilindro tridimensional curvo. Esta técnica utiliza *pixel blending* combinado com a informação de *buffer* da sombra a partir da cena para renderizar uma imagem final sem o efeito indesejável de *aliasing* nas bordas das sombras [LTT91]. Embora tenha sido desenvolvida para renderização de cabelo humano, esta técnica também pode ser utilizada para renderizar qualquer modelo consistente de longos filamentos e do tamanho de um sub-*pixel* (pêlos e grama, por exemplo).

LeBlanc et al [LTT91] utilizam uma técnica de renderização onde fios de cabelo do tamanho de um sub-*pixel* são misturados em cada *pixel* para criar uma imagem sem *aliasing*, esta abordagem foi considerada a mais promissora até então para obtenção de uma aparência natural do cabelo. Como o cabelo não é restrito a um volume de superfície específico, um controle explícito sobre o comprimento, curvatura e orientação do fio é necessário.

Os autores apresentam um modelo geométrico em que cada fio é representado como um longo cilindro curvo com espessura constante. Ele pode ser representado de forma satisfatória como um segmento tridimensional curvo com um raio definido. A curva do cilindro é representada como uma sequência de linhas variando em tamanho dependendo da tendência de curvatura do fio. A estrutura de dados completa, de estilo de cabelo, consiste de um número muito grande (mais de um milhão) de segmentos de linhas tridimensionais, junto com um valor escalar de espessura.

O modelo de iluminação utilizado é específico para cabelo, ele se baseia na natureza cilíndrica do fio. A figura 2.3 mostra um segmento de cabelo e os vetores usados pelo modelo. O vetor tangente, t, representa a direção do eixo x do fio. O vetor de iluminação, l, aponta a direção da fonte de luz. O vetor de reflexão, r, aponta a direção da luz refletida e é a direção da reflexão especular máxima. O vetor de câmera, e, indica a direção do observador. Os ângulos θ e ϕ são os ângulos do vetor tangente para o vetor de iluminação e para o vetor de câmera, respectivamente.

O componente difuso de reflexão é obtido através da função:

$$\text{Reflexão Difusa} = K_D sen(\theta)$$

onde K_D é o coeficiente difuso de reflexão. Aqui não é considerada a sombra do fio sobre o próprio fio, isto é, a parte de baixo do fio que está sob a sombra da parte de cima. Para um cilindro opaco, o componente difuso irá variar com o que é visível e está na sombra, isto depende da direção do vetor da câmera, e. Contudo, o cabelo humano é bastante translúcido então a área na sombra transmite difusamente uma quantidade de luz comparável à quantidade refletida difusamente na parte sem sombra.

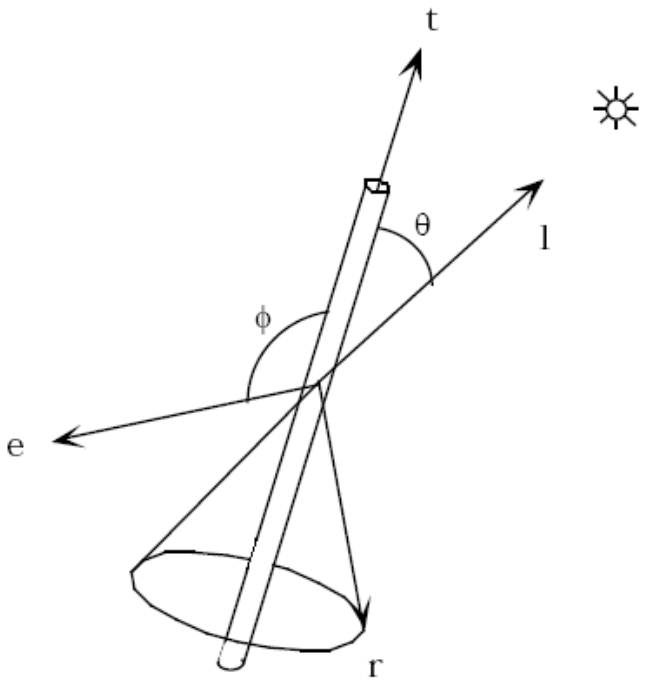


Figura 2.3 Geometria de iluminação do fio de cabelo [LTT91].

O componente especular é derivado da distribuição especular de Phong [SWND05] que é rotacionada no eixo de coordenadas do cabelo. Em qualquer parte ao longo do comprimento do fio, existem vetores normais apontando em todas as direções perpendiculares ao vetor tangente, t. Entretanto, a superfície semi-circular (180 graus) do cabelo que não está na área de sombra irá refletir diretamente a luz em um padrão em forma de cone com um padrão radial de 360 graus formado pela rotação do vetor r no eixo de coordenadas do fio. Este cone representa os ângulos de máxima reflexão especular. O componente especular cilíndrico de Phong é calculado usando o ângulo entre este cone e o vetor de câmera, e, que é igual a $\phi + \theta$ - π, e usando este valor como o ângulo para a equação padrão de Phong:

$$\text{Reflexão Especular} = K_S cos^n(\phi + \theta - \pi)$$

onde K_S é o coeficiente especular de reflexão. Os componentes difuso e especular, juntos com um componente ambiente, resultam em uma equação de intensidade de iluminação do cabelo:

$$\text{H} = L_A K_A + \sum L_i(K_D sen(\theta) + K_S cos^n(\phi + \theta - \pi))$$

onde H é a intensidade de iluminação do cabelo por área de unidade projetada, L_i é a intensidade da luz que incide no cabelo e tem origem na fonte i, K_A é o coeficiente de reflexão do ambiente e L_A é a intensidade da luz ambiente por unidade de área.

Estabelecido o modelo de iluminação, é feita a renderização dos fios individualmente de forma que o efeito de *aliasing* seja evitado. Isto é alcançado utilizando uma técnica de *pixel blending* que é similar ao método desenvolvido para a renderização do sistema de partículas [LTT91].

Apesar de tratar exclusivamente de renderização de cabelo, a relevância desta técnica em nossa dissertação diz respeito ao modelo de iluminação por ele apresentado que introduz conceitos importantes como Reflexão Especular e Difusa interferindo na simulação de cabelo. Estes conceitos são explorados no modelo implementado e descrito neste trabalho, contudo a renderização de pêlo é o nosso foco.

2.1.3 Modelagem Interativa de Pêlo

Ao longo da década de 90, as pesquisas sobre renderização de cabelo e pêlos continuaram, pois apesar dos resultados relativamente satisfatórios até então eles ainda estavam longe de representar a realidade de forma ideal. Em 1997 foram apresentadas algumas técnicas que obtiveram resultados bastante promissores, dentre elas uma técnica de modelagem interativa de pêlos que permite ao usuário atribuir valores a uma variedade de parâmetros para obter uma melhor aparência para os animais sendo renderizados. Estes parâmetros podem ser, por exemplo, a densidade do pêlo, comprimento, rigidez e cor. A densidade do pêlo é automaticamente ajustada para visualização à distância para compensar o limite de resolução por fio individual. Os efeitos gravitacionais são aproximados de forma satisfatória [GW97].

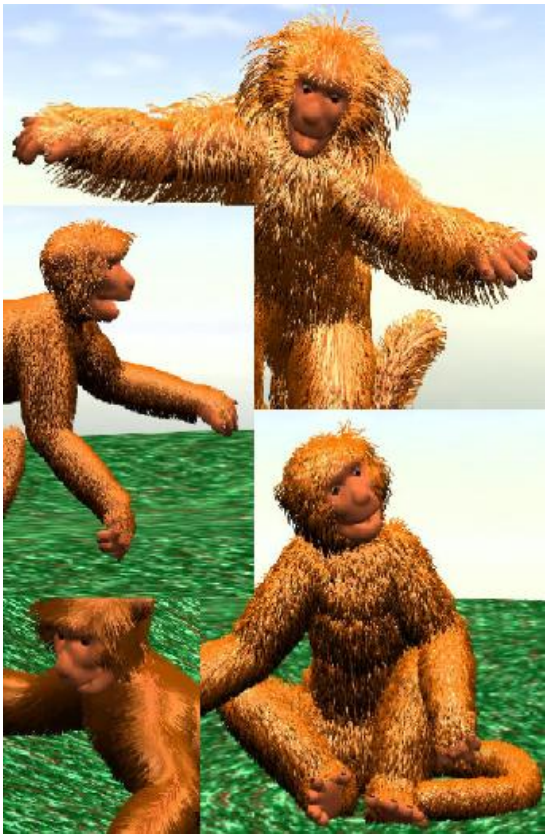


Figura 2.4 Resultado obtido por Gelder e demais autores [GW97] mostra um mesmo modelo 3D em posições diversas.

Alguns parâmetros de controle do usuário definem as propriedades do pêlo: o número de fios depende da densidade do pêlo e de suas raízes dispersas randomicamente sobre a superfície da pele. Um vetor de direção do peso controlado pelo usuário é usado para determinar a direção do pêlo em relação à sua raiz, a direção final ainda é influenciada pela gravidade, que é escalada pelo fator de rigidez. O comprimento do fio também é controlado pelo usuário; um comprimento é especificado para o fio cujo topo é mais distante da superfície da pele e um segundo comprimento é definido para o fio cujo topo é mais próximo da superfície, por exemplo. A quantidade de comprimentos dos diversos tipos de pêlos pode variar. Algumas características de material são atribuídas ao cabelo, estas características juntas com o modelo de iluminação geram a cor do fio. Fatores randômicos podem ser adicionados para orientação e sombreamento do fio, com o intuito de obter uma aparência menos 'regular' e estática do pêlo. No caso do pêlo, pode haver uma combinação de fios longos e curtos, que podem ter diferentes materiais. Alguns resultados obtidos podem ser observados na figura 2.4.

A principal inovação desta técnica é o controle, por parte do usuário, de vetores normais para o sombreamento ('normais de sombreamento'). Assumindo que o usuário não tem requisição de aleatoriedade para as normais de sombreamento, todas elas estarão localizadas no "plano do pêlo". Em cada ponto de controle a normal de sombreamento é perpendicular ao segmento de linha que termina naquele ponto. O primeiro ponto de controle é a raiz do pêlo, e sua normal de sombreamento é perpendicular à direção do primeiro segmento. A lógica por trás deste método é que o segmento de linha do pêlo é uma abstração de um cilindro muito fino. Todas as normais da superfície deste cilindro são perpendiculares ao eixo de coordenadas deste cilindro, que é o segmento de linha [GW97].

Assumindo que o usuário precisa de aleatoriedade para as normais de sombreamento, cada uma delas é rotacionada em um ângulo aleatório, com o segmento de linha como eixo de coordenadas. Embora ele continue perpendicular ao segmento de linha, ele é consistente com a normal de um cilindro muito fino. Esta aleatoriedade para as normais de sombreamento pretende capturar o efeito de pêlos sendo atingidos por raios de luz de forma diferente.

Esta técnica não define um novo modelo de iluminação; os modelos tradicionalmente usados em aplicações OpenGL (Phong ou Goraud) [SWND05] podem ser utilizados. Além dos vetores normais (cuja forma de obtenção é descrita nos parágrafos anteriores), os parâmetros de iluminação ambiente, difusa, especular e brilho do material devem ser definidos pelo usuário.

2.1.4 *Fake Fur*

Ainda em 1997, Goldman [Gol97] propôs um modelo de iluminação probabilístico para simulação de pelagem rala de animais. Os métodos anteriores tratavam a renderização de pêlos em nível de *pixel*. Contudo, uma enorme quantidade de casos do mundo real, onde fios de pêlo são muito menores do que o tamanho de um *pixel*, podem ser renderizados utilizando um modelo probabilístico para um valor esperado de luz refletida dentro de uma pequena área de superfície. Sob a premissa de que parâmetros de pêlo variam lentamente ao longo da pele, cálculos de iluminação são realizados em uma área do pêlo, tida como referência, com parâmetros específicos. As luzes refletidas de fios individuais e da pele sob o pêlo são misturadas assumindo que um raio de luz atinge a área-referência localizado na área onde o modelo está sendo aplicado. Aqui a opacidade da pelagem rala também é considerada. Aproximações para sombras

de pêlo-sobre-pêlo e pêlo-sobre-pele são calculadas usando o mesmo modelo de 'raio de luz atingindo o fio-referência' mencionado previamente. Esta técnica se mostra eficiente para renderização de pêlos curtos quando o modelo é visualizado à distância e a geometria do pêlo não é relevante. Ela será detalhada e melhor explicada no capítulo 3. A figura 2.5 é um exemplo de resultado obtido com esta técnica; mais resultados podem ser encontrados no capítulo 4.

Figura 2.5 Resultado obtido por Goldman [Gol97].

2.1.5 Pêlo em Tempo-Real

Lengyel e outros autores [LPFH01] apresentam um método para renderização em tempo-real de pêlo em superfícies de topologia arbitrária. Como pré-processamento, o pêlo virtual é simulado com um sistema de partículas e uma amostra deste pêlo é inserida em um volume de textura. A seguir, a textura é parametrizada sobre uma superfície de topologia arbitrária usando *lapped textures* - que é uma maneira de aplicar uma amostra da textura em uma superfície colando repetidamente esta amostra até cobrir a superfície por completo. O uso de *lapped textures* permite especificar um campo de direção global para o pêlo sobre a superfície. Em tempo de execução, *patches* de volumes de textura são renderizados como uma série de 'cascas concêntricas' de transparência média. Para melhorar a qualidade visual do pêlo, são usadas 'barbatanas' como vetores normais à superfície que são renderizadas usando mapas de textura 2D convencionais vindos das amostras de textura na direção do crescimento do pêlo. Este método gera imagens convincentes de pêlo com taxas interativas para modelos de complexidade moderada. Além disso, é permitida a modificação em tempo-real das condições de visualização e iluminação, assim como controle local sobre a cor do pêlo, comprimento e direção.

O sistema descrito recebe como entrada uma malha triangular representando a criatura e um modelo paramétrico de pêlo. Antes da execução, são realizadas duas operações: pré-processamento da geometria, onde são computados os *patches* das *lapped textures* parametrizando a superfície; e o pré-processamento de textura, onde um modelo geométrico é aumentado a partir de um *patch* do pêlo. Em tempo de execução são renderizadas uma série de cascas

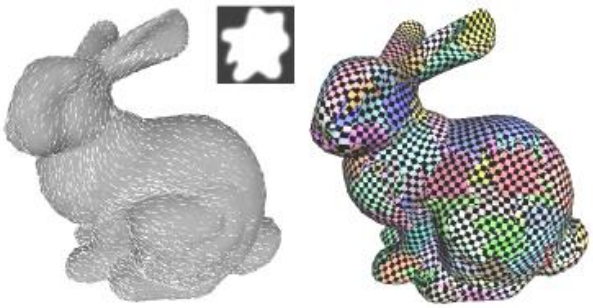


Figura 2.6 Pré-processamento da geometria. Entrada: malha e campo de vetor, Saída: *patches*. [LPFH01]

concêntricas a partir da superfície original, assim como algumas barbatanas perpendiculares à superfície.

Figura 2.7 Resultados obtidos por Lengyel et al [LPFH01].

Como mencionado anteriormente, esta técnica aumenta a quantidade de *patches* sobre localizações randômicas ainda descobertas na superfície e as parametriza no domínio da textura. A coleção de *patches* resultante cobre a superfície, como mostrado na figura 2.6. Os fios são gerados através da simulação de um sistema de partículas. Variando os parâmetros, é possível obter um fio que é liso, curvo, esparso, denso, etc. Na figura 2.7 são mostrados alguns resultados obtidos.

Este trabalho é eficiente para renderização de pêlos longos em superfícies arbitrárias, permitindo inclusive a alteração de parâmetros em tempo-real. Contudo, ainda apresenta complexidade computacional se comparada a técnicas que não renderizam os fios de pêlo individual-

mente.

Desde então, outros métodos têm se proposto a resolver o problema de renderização de pêlos de animais mamíferos [Pap02] [BW06], mas poucos deles continuaram explorando o uso de modelos probabilísticos para diminuir o custo computacional durante o processo de renderização.

2.2 Renderização de Mudança de Estado

A aplicação de efeitos ambientais sobre a superfície de objetos (mudanças de estado) tem sido explorada já há algum tempo em computação gráfica, simulando, por exemplo, degradação pela ação do tempo em pedras, metais, e, como assunto principal deste trabalho, simulação de superfícies úmidas.

Em meados dos anos 80, já ocorriam estudos no campo da ótica investigando as diferenças na aparência de superfícies que vão do estado seco para o molhado [TBM86]. Estes estudos têm um impacto direto em algoritmos de sensoriamento remoto. Algumas dessas idéias também apareceram no contexto de modificação de imagens para fazer regiões secas parecerem molhadas e vice-versa [ML95]. A aplicação de efeitos ambientais sobre a superfície de objetos (mudanças de estado) é um tema que tem sido pouco explorado na computação gráfica desde então. O objetivo é a simulação da degradação pela ação do tempo, por queima, por congelamento e pela ação da água em pedra, metal, madeira e outros materiais. Os primeiros trabalhos abordaram a degradação de metais por ações como oxidação e sulfidização [DH96], e a alteração da aparência da superfície de diversos materiais sob a influência da ação conjunta do tempo e de água corrente [DEL$^+$99]. O livro *Digital Modeling of Material Appearance* [DRS07] reúne os trabalhos apresentados por Dorsey e outros autores que apresentam técnicas para simulação de diversos materiais sob a ação do ambiente e do tempo.

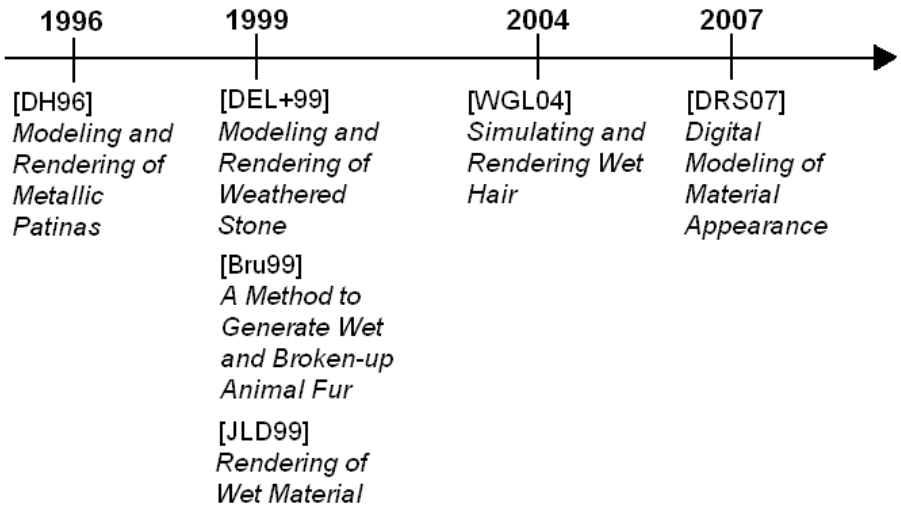


Figura 2.8 Evolução das técnicas de renderização de mudança de estado.

Este trabalho se baseou na técnica apresentada por Ward et al [WGL04], onde, a partir da

observação da interação diária do cabelo com a água no mundo real, os autores apresentam um método que simula a mudança drástica de aparência e comportamento do cabelo quando este se torna molhado. Quando isto acontece, uma fina camada de água é formada ao redor do cabelo, o que gera uma aparência mais especular (diferente do cabelo seco) devido ao aumento das reflexões especulares. Além disso, alguns raios de luz estão sob total reflexão interna dentro da fina camada de água, o que contribui para a aparência mais escura do cabelo molhado.

Para mostrar a evolução das técnicas de mudanças de estado, a figura 2.8 apresenta uma linha do tempo com os principais trabalhos publicados. Os trabalhos mais relevantes para esta dissertação são apresentados nas sub-seções a seguir em ordem cronológica.

2.2.1 Pátinas Metálicas

O trabalho de Dorsey e Hanrahan [DH96] apresenta uma técnica para modelagem e renderização de pátinas metálicas sob a ação do tempo. Uma pátina é um filme ou incrustação em uma superfície que é produzida pela remoção de material, adição de material ou alteração química de uma superfície. Oxidação, sulfidização e pintura são exemplos de fênomenos que produzem pátinas. A técnica descrita representa uma superfície como uma série de camadas. As pátinas são simuladas como uma coleção de operadores, como erosão, acúmulo de sedimentos e polimento, que são aplicados à estrutura em camadas, como pode ser visto na figura 2.9. O desenvolvimento de pátinas é modulado de acordo com a geometria de um objeto e fatores locais de ambiente. Também é apresentada uma técnica para modelar a reflexão e transmissão da luz através da estrutura em camadas usando um modelo que simula muitos aspectos da aparência do metal com modificações ao longo do tempo, como se o metal tivesse sido exposto à atmosfera ou tratado quimicamente.

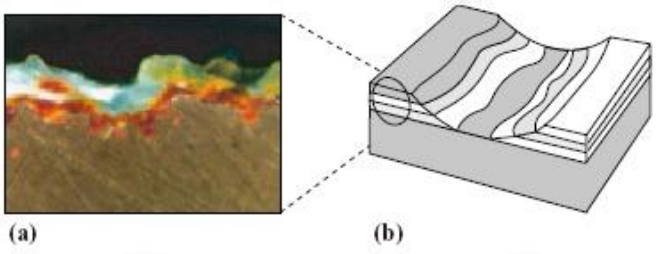


Figura 2.9 Uma superfície de pátina como uma pilha de camadas. (a) Micro-fotografia de uma superfície de cobre mostrando as camadas. (b) Abstração utilizada na técnica para estrutura em camadas. [DH96]

A aparência de uma estrutura em camadas é um resultado da interação da luz com a superfície e a sub-superfície (camadas abaixo da superfície). As superfícies surgem nas interfaces entre camadas. A luz é refletida a partir da superfície dependendo de sua rugosidade ou sua cor especular. A reflexão da superfície dá à camada uma aparência lustrosa. A luz é também refletida do interior, assim como é transmitida através do mesmo, dependendo da absorção e propriedades de espalhamento do material. A reflexão da sub-superfície dá à camada uma aparência fosca ou difusa. O fato de que a luz é também transmitida através da pilha de camadas causa a mistura de cores de diferentes camadas; isto também permite que materiais

subjcentes permaneçam parcialmente visíveis.

Figura 2.10 Resultado obtido por [DH96]

Para modelar a reflexão e a transmissão através de uma única camada é usado um modelo em que a cor de uma camada espessa de pintura consiste de diversos pigmentos e foi quantitativamente modelada. Dadas as concentrações relativas de alguns pigmentos, é possível prever a aparência final da pintura. Ele também é usado para estimar as concentrações de pigmentos necessárias para selecionar uma determinada cor. Na técnica apresentada, o modelo é usado para prever os efeitos de cor devido às variações na espessura da camada e também para prever a cor da pilha de camadas de diferentes pigmentos. O processo é detalhadamente descrito em [DH96], na figura 2.10 pode ser visto um exemplo do resultado obtido.

2.2.2 Pedras sob a Ação do Tempo

Em 1999, Dorsey e outros autores apresentaram uma técnica para a simulação da ação do tempo em pedras, descrita em [DEL$^+$99]. No trabalho, os autores introduzem técnicas para renderização e modelagem de mudanças na aparência deste tipo de objeto. Uma estrutura de dados é utilizada para representar a superfície em questão, e é manipulada para representar dissolução, recristalização e erosão do material. Os efeitos óticos de translucidez e coloração são simulados pela dispersão da luz dentro das pedras, utilizando técnicas de *Monte-Carlo Ray Tracing* [BDMV88].

A natureza 'porosa' da pedra permite que a água seja absorvida por pressão capilar durante um ciclo de umidade e então evaporada durante um ciclo de secagem. Estas condições de tempo externas são modeladas por um condição limite de pressão na superfície da pedra correspondente ao 'empurrão' da água nesta superfície.

Os ciclos de umidade e secagem são alternados pelo valor no parâmetro p de acordo com o mapa de umidade da superfície durante o ciclo de umidade e, portanto, $p = 0$ durante o ciclo de secagem. Mais genericamente, o parâmetro p na superfície pode ser uma função contínua como uma onda senoidal. A condição limite é sempre $p = 0$. Quanto mais a água penetra, mais o volume se torna enfraquecido e molhado. A velocidade com que a superfície é molhada varia

de acordo com a Lei de Darcy:

$$v = -\frac{K}{\eta}(\nabla p - \rho g)$$

onde a velocidade v é computada a partir da permeabilidade K, a viscosidade η, a pressão p, a densidade ρ e a aceleração da gravidade g. A Lei de Darcy define que a velocidade de absorção de água da superfície é proporcional à pressão negativa do gradiente. Assim, por exemplo, a água penetra mais em arenito do que em granito. Isto é valorado pelo termo de permeabilidade K.

A localização da região da superfície a ser infiltrada pela água é calculada pela evolução da pressão da água ao longo do tempo, de acordo com a equação de difusão:

$$\frac{dp}{dt} = -\nabla.(\phi\nabla p) = -\phi\nabla^2 p - \nabla\phi.\nabla p$$

O termo ϕ é a propriedade espacial e dinâmica do material, indicando a porosidade. As seções molhadas correspondem a 'ligar' a pressão p na superfície; as seções secas correspondem a 'desligar' a pressão. Estas seções não devem ser binárias, elas podem variar continuamente. A técnica, essencialmente, consiste dos dois passos a seguir:

1. Dissolver $\frac{dp}{dt} = -\nabla.(\phi\nabla p)$ com a condição de pressão p imposta como condição limite na superfície.

2. Atualizar a Lei de Darcy: $v = -\frac{K}{\eta}(\nabla p - \rho g)$

A figura 2.11 mostra um exemplo de resultado alcançado com a aplicação desta técnica.

Figura 2.11 Resultado obtido por [DEL+99]

2.2.3 Materiais Molhados

A aparência de muitos materiais naturais é bastante influenciada pelo ambiente em que eles estão situados. A captura dos efeitos dos fatores de ambiente é essencial para produzir imagens sintéticas realísticas. Os materiais molhados parecem ser mais escuros, com mais brilho ou mais especulares dependendo do tipo de material e das condições de visualização. Estas diferenças na aparência são causadas pela combinação da presença de água na superfície e dentro do material. Para simular ambas as condições Jensen e colegas [JLD99] desenvolveram uma técnica que combina um modelo de reflexão para superfície molhada com espalhamento na sub-superfície.

A presença de água em uma superfície (uma poça de água em uma estrada, por exemplo) adiciona especularidade à superfície devido à interface ar-água. Uma camada fina de água em uma superfície pode também causar uma aparência mais escura na mesma. A principal causa para esta aparência mais escura é a possibilidade de reflexão interna total na fronteira água-ar. Alguns dos raios de luz refletidos da superfície serão refletidos de volta para a mesma superfície pela interface água-ar. Esta luz é então sujeita à outra rodada de absorção pela superfície (ver figura 2.12) antes de ser refletida novamente. Isto pode levar à uma seqüência de múltiplas absorções, resultando no escurecimento da superfície.

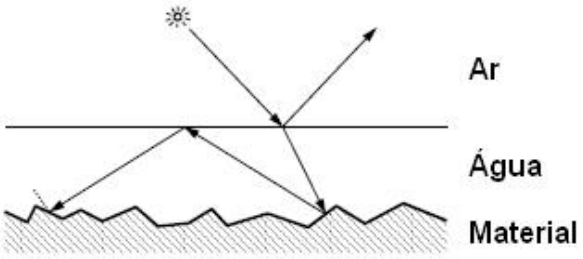


Figura 2.12 Uma camada de água acima da superfície reflete menos luz devido à reflexão interna na interface água-ar. [JLD99]

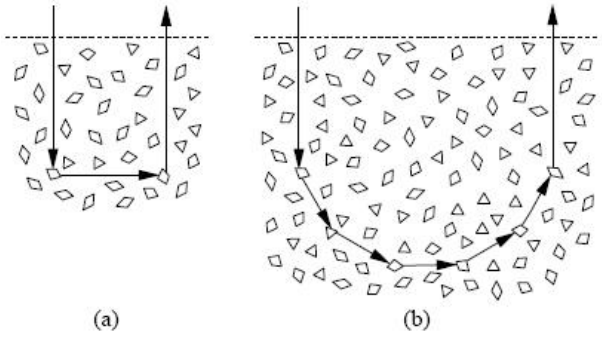


Figura 2.13 Depois de muitos eventos de espalhamento, o caminho mais curto que um fóton pode tomar para deixar a superfície (a) com ângulo de 90 graus de espalhamento médio e (b) com ângulo de 30 graus de espalhamento médio. [JLD99]

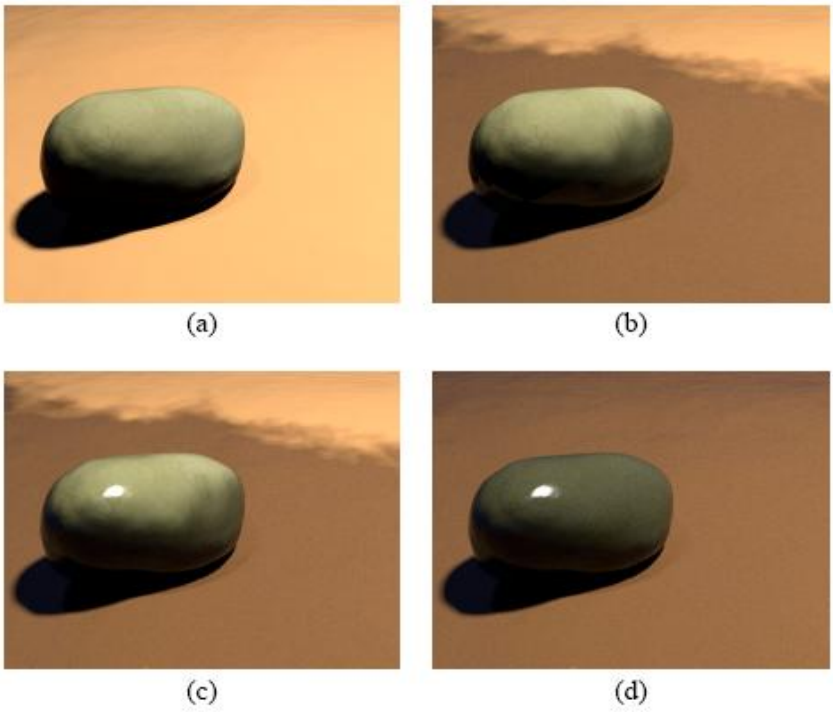


Figura 2.14 Rocha e areia da praia com diferentes funções de umidade. (a) seco, (b) misturado seco e molhado, (c) água cobrindo a rocha e (d) completamente molhado [JLD99].

A presença de água abaixo da superfície é outro fator importante que influencia a aparência de um material. Para materiais bruto ou em pó, como areia ou argila, a água pode usualmente entrar em regiões anteriormente preenchidas com ar. Isto modifica as propriedades de espalhamento do material. A principal razão disto é que o índice de refração da água é maior do que o do ar e mais frequentemente próximo do índice do material. Em larga escala, isto pode ser visto como uma mudança nas propriedades de espalhamento do material, onde o ângulo de espalhamento médio é reduzido, como ilustrado na figura 2.13. A influência desse ângulo de espalhamento reduzido em um raio de luz é que em média ele compromete um número maior de eventos de espalhamento antes de deixar a superfície. Isto aumenta a quantidade total de luz que é absorvida, e o efeito global é a redução da reflexão do material.

Esta técnica utiliza uma combinação de modelos de superfície e sub-superfície para capturar a aparência da umidade sobre e dentro do material. O modelo de superfície é usado para simular a interação da luz com uma fina camada de água ou outro líquido na superfície. O modelo de sub-superfície é usado para simular as propriedades de espalhamento do material e como elas são mudadas pela presença de umidade absorvida. Um exemplo do resultado obtido por Jensen e colegas pode ser visto na figura 2.14.

2.2.4 Geração de Pêlo Molhado

Ainda em 1999, o trabalho de Bruderlin [Bru99] implementa uma técnica com dois efeitos que visam aumentar o grau de realismo em pêlos renderizados no filme *Stuart Little*. O primeiro

efeito é a produção de pêlo molhado por uso de *clumping* (algo como junção/agrupamento) de fios individuais, o segundo efeito é a ‘quebra’ de pêlos arrepiados ao longo de ‘caminhos’ de pêlos sobre a pele.

O *clumping* de fios de pêlo quando o pêlo fica molhado ocorre devido à tensão da superfície ou coesão da água. Os topos dos fios de um conjunto-vizinhança tendem a se direcionar para o mesmo ponto por causa da gravidade, criando um tipo de "super-pêlo"em forma de cone. Duas técnicas de *clumping* foram implementadas: *clumping* em área estática e *clumping* em área animada. A primeira gera concentrações de pêlos em áreas fixas pré-definidas no modelo, a segunda permite que as áreas possam se mover no modelo. Em ambos os casos, são fornecidos parâmetros que podem ser animados para atingir vários graus de aparências seco-para-molhado para o pêlo.

Ainda falando da primeira técnica, o fio que fica no centro de cada conjunto-vizinhança é chamado de ‘pêlo central do grupo’ e todos os outros pêlos membros do conjunto, os que são atraídos para este pêlo central do grupo, de ‘pêlos do grupo’. Existem quatro parâmetros de *clumping* requeridos: clump-densidade, clump-tamanho, clump-percentagem e clump-taxa. Clump-densidade especifica quantos conjuntos-vizinhança devem ser gerados por área quadrada. O modelo de *clumping* desta técnica traduz esta densidade em um número atual de conjuntos, isto é, pêlos centrais dos grupos, dependendo do tamanho de cada região da superfície. Como resultado, alguns dos pêlos existentes são transformados em pêlos centrais dos grupos. Clump-tamanho define a área de um conjunto-vizinhança em um espaço.

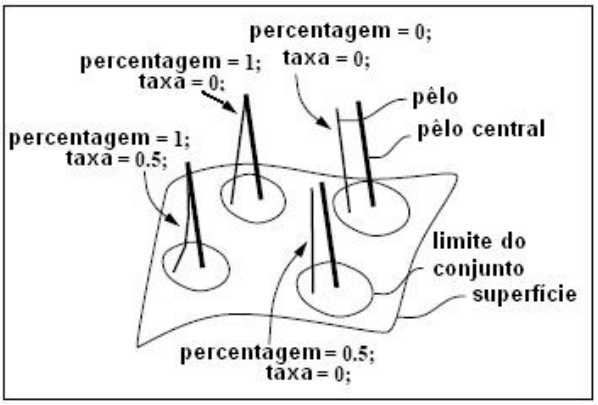


Figura 2.15 Clump-percentagem e taxa [Bru99].

Cada pêlo tem um valor de clump-percentagem e clump-taxa definidos (ver figura 2.15). Os valores para ambos variam entre [0,1]. O clump-percentagem especifica o grau de *clumping* para um pêlo do conjunto-vizinhança: o valor zero significa pêlo ‘seco’; o valor um significa que o pêlo está totalmente atraído para o pêlo central do grupo, isto é, o topo deste pêlo está na mesma localização do topo do pêlo central do grupo. O clump-taxa define o quanto um pêlo é unido com seu respectivo pêlo central do grupo. O valor zero significa que o pêlo está cada vez mais linearmente atraído para o seu pêlo central do grupo, da raiz ao topo; o valor próximo de um significa que os vértices de controle do pêlo mais próximos da raiz são proporcionalmente mais atraídos para os vértices de seu pêlo central do grupo correspondente do que aqueles

próximos do topo, o que resulta em conjuntos-vizinhança mais ‘apertados’. Ambos, clump-percentagem e clump-taxa também podem ser animados para fornecer um controle contínuo para aparências seco-para-molhado-para-seco do pêlo. Isto é exemplificado pela figura 2.16, que mostra três *frames* de uma seqüência animada de clump-percentagem e clump-taxa.

Figura 2.16 Três *frames* de uma sequência animada de *clumping* de área estática [Bru99]. A primeira cabeça da esquerda para a direita mostra a aparência do pêlo quando seco, a segunda ilustra uma aparência intermediária (parcialmente molhado) e a última mostra o pêlo complemente molhado.

O *clumping* em área animada é desejável se é necessário simular jatos de água ou gotas de chuva atingindo o pêlo e fazendo-o cada vez mais molhado. Para simular isto, áres de *clumping* animadas são definidas em um sistema de animação através de partículas atingindo a superfície. Estas partículas são originadas de um ou mais emissores, cujos atributos determinam a taxa e o espalhamento das partículas. Uma vez que uma partícula atinge uma região da superfície, uma área circular de *clumping* é criada na região daquela localização, com clump-percentagem, clump-taxa e raio determinados por uma ‘expressão de criação’. Expressões em tempo-de-execução então definem o clump-percentagem e o clump-taxa, para determinar quão rápido e o quanto o pêlo fica molhado.

Por fim, a quebra do pêlo, ou *clumping* do pêlo seco, ocorre porque o pêlo algumas vezes quebra ao longo de certas linhas (caminhos-de-pêlo) na pele. Neste modelo [Bru99], são identificados e implementados dois tipos de quebra: simétrico e frente-e-verso. Na quebra simétrico, pêlos em ambos os lados de um caminho-de-pêlo quebram na direção deste caminho, já na quebra frente-e-verso os pêlos de um lado do caminho quebram na direção inversa do caminho. Os caminhos-de-pêlo são especificados como curvas na superfície em um sistema de animação. Cada caminho tem um raio, um percentual e uma taxa de quebra para os dois tipos, sendo que há um vetor de quebra adicional para o tipo frente-e-verso.

2.2.5 Simulação de Cabelo Molhado

Uma das técnicas mais recentes encontradas na literatura simula a mudança drástica de aparência e comportamento do cabelo quando este se torna molhado [WGL04]. A técnica descrita é um sistema de modelagem de cabelo que baseia-se na configuração de um sistema ‘esqueleto-dual’ que consiste de um ‘esqueleto-global’ e um ‘esqueleto-local’, ambos provêem a habilidade de dissociar movimentos globais e locais do cabelo, permitindo a captura de movimentos

adicionais e vários estilos de cabelos. O ‘esqueleto-global’ é levado em conta para o movimento geral do cabelo: enquanto o ‘esqueleto-local’ é posicionado ao redor do ‘esqueleto-global’ para modelar um estilo de cabelo desejado, a geometria do cabelo renderizado é posicionada ao redor do ‘esqueleto-local’. Fios de cabelo muito próximos uns dos outros são agrupados para seguir o mesmo sistema ‘esqueleto-dual’, simulando o agrupamento natural dos fios encontrados na natureza. Seções cruzadas circulares são definidas em cada nó do ‘esqueleto-local’, determinando a espessura inicial daquela seção do cabelo. Os fios individuais são então colocados aleatoriamente dentro dos limites dessas seções cruzadas.

Figura 2.17 Cabelo molhado à esquerdo e seco à direita. Resultado obtido por [WGL04].

O trabalho de Ward et al descreve um novo método de detecção de colisão localizada que de forma eficiente identifica as interações entre o cabelo e o corpo, bem como entre os próprios fios, colocando *swept sphere bounding volumes* (SSVs) [LGLM99] ao redor do ‘esqueleto-local’ e geometria do cabelo renderizado. Este modelo [WGL04] é capaz de capturar as propriedades intrínsecas do cabelo seco e pode ser ajustado dinamicamente para mudar as propriedades físicas do cabelo à medida que o mesmo interage com a água.

Além das alterações nas propriedades físicas, quando o cabelo é molhado uma fina camada de água é formada ao redor do cabelo, o que gera uma aparência mais especular devido ao aumento das reflexões especulares. Além disso, alguns raios de luz estão sob total reflexão interna dentro da fina camada de água, o que contribui para a aparência mais escura do cabelo molhado. Na figura 2.17 pode ser visto um exemplo de resultado obtido por [WGL04].

2.3 Discussão

Conforme foi apresentado nesta revisão bibliográfica, as principais técnicas para renderização de pêlos se concentram na geometria do fio, o que caracteriza a abordagem força-bruta. O trabalho de Goldman [Gol97] foi o primeiro a explorar o uso da iluminação probabilística na tentativa de diminuir o custo computacional da renderização de pêlos de animais mamíferos.

Já nas simulações de mudanças de estado, a maioria das técnicas de renderização de cabelos e pêlos molhados realizam alterações na geometria do fio. Contudo, apenas as técnicas que pudessem interagir com o modelo *Fake Fur Rendering* [Gol97], modelo este que utiliza a geometria do fio apenas para cálculos de iluminação e sombreamento, poderiam ser utilizadas na implementação do modelo apresentado nesta dissertação.

Portanto, este trabalho de dissertação toma como ponto de partida o modelo de renderização de pêlos *Fake Fur Rendering* e propõe o uso da técnica apresentada por Ward et al [WGL04] para a mudança da aparência do pêlo em função da mudança de estado seco para molhado.

No trabalho de Ward et al [WGL04], apenas a parte que descreve as alterações nas propriedades de reflexão do cabelo foi adaptada e utilizada para a renderização de pêlos molhados. A técnica retirada do trabalho de Ward et al, e utilizada no modelo apresentado nesta dissertação, será detalhada e melhor explicada no capítulo 4.

CAPÍTULO 3

MODELO

Este capítulo descreve a técnica implementada nesta dissertação, ele é dividido em três seções: *Fake Fur Rendering*, onde a técnica de Goldman [Gol97] é detalhada; Modelando o Efeito da Água, que descreve a forma que a técnica de Goldman é alterada de modo que o pêlo, inicialmente no estado de seco, tenha sua aparência alterada para molhado; e, por fim, a seção Unidade de Processamento Gráfico - GPU, que explica como é feita a implementação da técnica em placa gráfica e ressalta a importância de fazê-lo desta forma.

3.1 *Fake Fur Rendering*

A idéia principal do modelo é utilizar uma geometria de pêlo-referência e implementar um modelo probabilístico baseado nesta geometria. O pêlo-referência em uma superfície é parametrizado pelo comprimento do pêlo, pela densidade, raios da base e do topo do pêlo, e vetores tangente na base e no topo do pêlo (ver figura 3.1). O nível de reflexão de um único fio de pêlo é parametrizado pelo componente de reflexão difusa, pelo componente de reflexão especular, pelo expoente especular e pelos fatores de direção para controle de reflexão e transmissão.

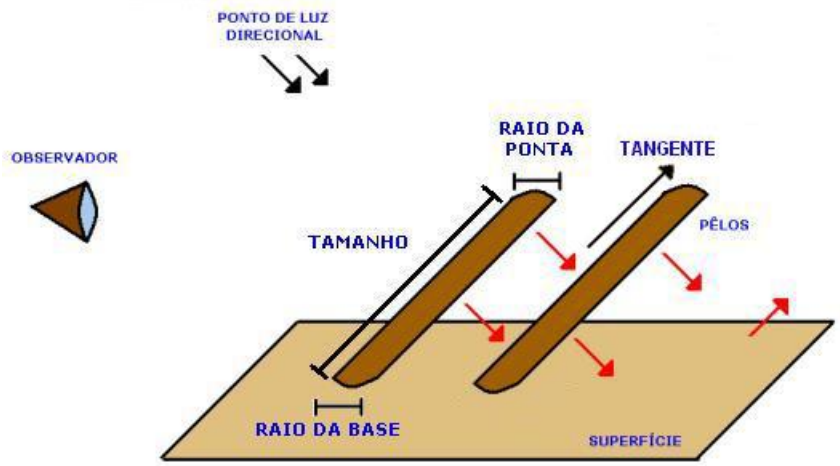


Figura 3.1 Geometria do pêlo-referência

Em uma visão em alto nível, o algoritmo para o processo de iluminação da técnica *Fake Fur Rendering* para uma região do modelo 3D é o seguinte:

1. Calcular a geometria média do pêlo dentro de uma região que serve como amostra. Esta

geometria representará o 'pêlo-referência' (equação 3.9).

2. Para cada fonte de luz:

   Calcular a reflexão da luz do pêlo-referência da região (equação 3.3);

   Usando a função de opacidade do *Fake Fur Rendering*, calcular o valor da visibilidade do pêlo em relação à pele (equação 3.15);

   Usando a função de opacidade do *Fake Fur Rendering*, calcular a atenuação de sombra de pêlo-sobre-pêlo (equação 3.18);

   Calcular a reflexão da luz da pele sob o pêlo (equação 3.16);

   Usando a função de opacidade do *Fake Fur Rendering*, calcular o fator de sombra de pêlo-sobre-pele (equação 3.17);

   Mesclar a reflexão da luz da pele e do pêlo usando o valor da visibilidade para obter a reflexão final da região (equação 3.19).

3. Somar as reflexões de todas as fontes de luz para obter a reflexão total de cada região do modelo 3D.

Na prática, após o cálculo da geometria do pêlo-referência, o *Fake Fur Rendering* é aplicado para cada *pixel* da região renderizada e seus parâmetros são controlados interativamente pelo usuário, se baseando na visualização do resultado.

3.1.1 Função de Iluminação

Para descrever a reflexão da luz em um único fio de pêlo [Gol97], são calculadas as seguintes equações:

$$\psi_{diffuse} = K_d sen(\overline{T}, \overline{L}) \tag{3.1}$$

$$\psi_{specular} = K_s[(\overline{T} \cdot \overline{L})(\overline{T} \cdot \overline{E}) + sen(\overline{T}, \overline{L}) sen(\overline{T}, \overline{E})]^p \tag{3.2}$$

$$\psi_{hair} = \psi_{diffuse} + \psi_{specular} \tag{3.3}$$

onde $\psi_{diffuse}$ e $\psi_{specular}$ expressam os componentes difuso e especular do pêlo, respectivamente, e o componente ψ_{hair} calcula a reflexão total. Os vetores $\overline{T}$, $\overline{L}$ e $\overline{E}$ representam o vetor tangente normalizado, o vetor de direção da luz normalizado e o vetor de direção do observador normalizado, respectivamente. Os resultados das três equações acima são os componentes de reflexão.

Uma limitação deste modelo é a sua falta de direcionalidade: pêlos são totalmente iluminados mesmo se $\overline{L}$ é oposto a $\overline{E}$. Para resolver a direcionalidade, são utilizados dois fatores de atenuação que podem ser usados para calcular a transmissão e a reflexão relativas de um fio de pêlo.

A direcionalidade relativa de um raio de luz incidente e a tangente de um fio de pêlo são calculados usando o cosseno do ângulo diedro entre os planos que contêm cada par:

$$K = \cos(\overline{T} \times \overline{L}, \overline{T} \times \overline{E}) = \frac{(\overline{T} \times \overline{L}) \cdot (\overline{T} \times \overline{E})}{\left|\overline{T} \times \overline{L}\right| \left|\overline{T} \times \overline{E}\right|} \tag{3.4}$$

Percebe-se que quando $\overline{L}$ e $\overline{E}$ atingem o mesmo lado do fio (iluminação frontal), $K > 0$ e quando $\overline{L}$ e $\overline{E}$ atingem lados opostos do fio (iluminação traseira), $K < 0$ (ver figuras 3.2 e 3.3).

(a) Iluminação frontal (b) Iluminação traseira

Figura 3.2 Tipos de iluminação baseados na posição dos vetores em relação ao fio de pêlo. [Gol97]

Os valores de espalhamento para frente e para trás do pêlo são definidos pelos parâmetros $\rho_{transmit}$ e $\rho_{reflect}$, que variam no intervalo [0,1]. Então o fator de atenuação direcional f_{dir} é calculado por:

$$f_{dir} = \frac{1+K}{2}\rho_{reflect} + \frac{1-K}{2}\rho_{transmit} \tag{3.5}$$

Os pêlos brancos ou cinzas são bem representados por coeficientes de reflexão e transmissão similares, como pode ser visto na figura 3.4. Os pêlos com mais pigmentos terão a reflexão muito maior do que a transmissão. Quando ambos $\rho_{reflect}$ e $\rho_{transmit}$ são iguais a 1, não ocorre nenhuma atenuação [Gol97]. Na figura 3.5 pode ser visto o mesmo modelo 3D com a aparência alterada pelos diferentes valores de $\rho_{reflect}$ e $\rho_{transmit}$.

Também é incluído um fator normal de superfície ($f_{surface}$) para ajuste do sombreamento. Visto que a camada de pêlo é geometricamente aproximada por uma superfície plana, é especificada uma variação gradativa partindo da iluminação completa até o sombreamento completo:

$$f_{surface} = 1 + \rho_{surface}(smoothstep(\overline{N} \cdot \overline{L}, w_{min}, w_{max}) - 1) \tag{3.6}$$

onde $\overline{N}$ é a normal da superfície normalizada e $smoothstep$ é a interpolação suave entre w_{min} e w_{max}:

$$smoothstep(x,a,b) = \begin{cases} 0, x < a \\ 1, x > b \\ -2(\frac{x-a}{b-a})^3 + 3(\frac{x-a}{b-a})^2, a < x < b \end{cases} \tag{3.7}$$

(a) Direção do Observador

(b) Direção das Fontes de Luz

Figura 3.3 O mesmo modelo 3D com o observador (câmera) em direções diferentes (a), em (b) são as fontes de luz (duas) que mudam de direção.

Quando $\rho_{surface}$ é 0, não ocorre nenhuma atenuação. w_{min} e w_{max} são os cossenos dos ângulos de início e fim da sombra e podem ser ajustados de acordo com imagens de referência [Gol97].

A equação que calcula o ψ_{hair} é então alterada, f_{dir} e $f_{surface}$ são incluídos:

$$\psi_{hair} = f_{dir} f_{surface} (\psi_{diffuse} + \psi_{specular}) \tag{3.8}$$

Se os pêlos são curvos ou se os parâmetros variam de outra maneira da raiz para o topo, múltiplas amostras ao longo do pêlo-referência podem ser calculadas para ψ_{hair} e uma média deve ser obtida [Gol97]. Considerando que os pêlos em questão são relativamente curtos e variam muito pouco, é descartada, neste trabalho, a possibilidade de pêlos com parâmetros muito distintos refletindo a luz na mesma região que serve de amostra.

3.1.2 Função de Opacidade

A função de opacidade [Gol97], denotada α_f, calcula a opacidade média de uma região de pêlo vista de um determinado ângulo. α_f é uma função que considera a geometria do pêlo, a distribuição dos pêlos e o ângulo do observador. Em geral, a geometria e a distribuição dos pêlos são representações complexas, então algumas pressuposições são feitas para calcular o parâmetro α_f:

- Os pêlos são cones truncados de raios r_b na base e r_t no topo, e comprimento l

- $l > r_b$
- $r_b \geq r_t$

Figura 3.4 Modelo 3D de Dachshund com textura de pêlo de Dálmata. $\rho_{reflect}$ e $\rho_{transmit}$ são iguais a 0,5.

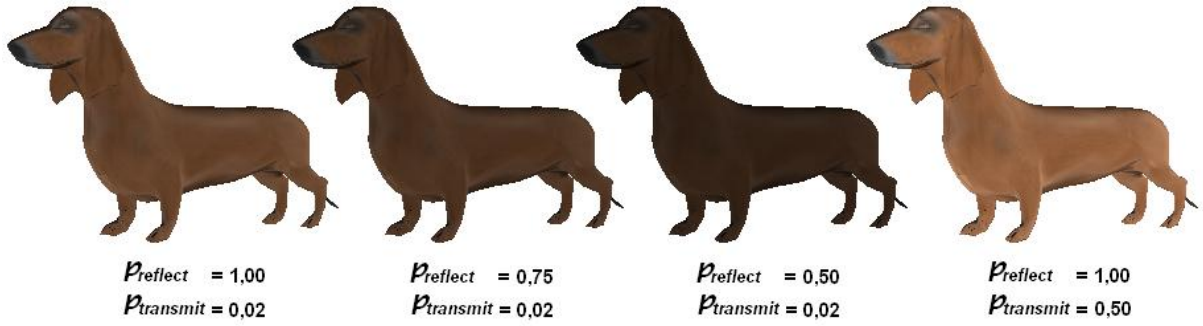


Figura 3.5 Modelo 3D de Dachshund com diferentes valores para $\rho_{reflect}$ e $\rho_{transmit}$.

Em geral, a projeção de um cone truncado em um plano de visualização é a união de duas elipses (a projeção da base e do topo) e um trapezóide (a projeção dos lados). A área de projeção da base e do topo são proporcionais a r^2, enquanto a área de projeção dos lados é proporcional a $l(r_b + r_t)$. Previamente foi dito que $l > r_b, r_t$ o que implica em um valor de r^2 infinitamente pequeno para a maioria das direções de visualização. Portanto, só é considerada a projeção dos lados no plano de visualização. A partir dessas pressuposições, a área de projeção de um pêlo em um plano de visualização é calculada por:

$$A_h = \frac{l(r_b + r_t)}{2} \tag{3.9}$$

e a projeção fica:

$$A'_h = A_h sen(\overline{E}, \overline{T}) \tag{3.10}$$

Mais algumas pressuposições são feitas por Goldman [Gol97] a respeito da distribuição dos pêlos:

- Todos os pêlos de uma região usada como amostra compartilham geometria e orientação idênticas.
- A distribuição dos pêlos em uma região pequena tem as seguintes características de Poisson: dentro de uma zona de densidade uniforme, uma amostra da metade do tamanho conterá a metade dos pêlos e os pêlos serão localizados independentemente uns dos outros.

A partir das pressuposições acima, a área média da pele coberta por n_i pêlos é calculada por:

$$A_s = \frac{n_i}{D} \tag{3.11}$$

onde n_i é uma constante definindo o número de pêlos em uma região tida como amostra e D é a densidade local dos pêlos, caso alguma destas constantes seja definida com valor próximo de zero a 'pele' do modelo 3D pode se tornar visível em algumas regiões. A projeção da área é:

$$A'_s = A_s(\overline{E} \cdot \overline{N}) \tag{3.12}$$

Deste modo, a cobertura de um único pêlo nesta área e a probabilidade de uma raio aleatório atingir este pêlo a partir da direção $\overline{E}$ é:

$$\alpha_h = \frac{A'_h}{A'_s} = \frac{A_h}{A_s}\frac{sen(\overline{E},\overline{T})}{\overline{E} \cdot \overline{N}} = \frac{A_h}{A_s} g(\overline{E},\overline{T},\overline{N}) \tag{3.13}$$

A parte dependente de projeção de α_h é isolada como a função de projeção do *Fake Fur Rendering*:

$$g(\overline{E},\overline{T},\overline{N}) = \frac{sen(\overline{E},\overline{T})}{\overline{E} \cdot \overline{N}} \tag{3.14}$$

A cobertura de toda a distribuição de pêlos, considerando suas independências, é calculada por:

$$\alpha_f = 1 - (1 - \alpha_h)^{n_i} = 1 - (1 - \frac{DA_h g(\overline{E},\overline{T},\overline{N})}{n_i})^{n_i} \tag{3.15}$$

onde $(1 - \alpha_h)$ é a probabilidade de um raio de luz aleatório não atingir um determinado pêlo na região que cobre a pele. Esta probabilidade elevada a n_i é subtraída do valor 1, o que gera como resultado a percentagem de visibilidade do pêlo atingido pela luz. Esta é a função de opacidade da técnica *Fake Fur Rendering* [Gol97].

3.1.3 Usando a Função de Opacidade no Modelo

No processo de iluminação, a função de opacidade é utilizada para três cálculos distintos: sombras de pêlo-sobre-pele, sombras pêlo-sobre-pêlo e visibilidade do pêlo-sobre-pele [Gol97].

Sombras de pêlo-sobre-pele são calculadas através da opacidade do pêlo como visto a partir da direção da luz e atenuando a intensidade da luz usando a equação de opacidade a seguir antes de iluminar a pele:

$$\psi_{skin} = K_{dskin} RGB \tag{3.16}$$

$$\lambda_{skin} = I[1 - \alpha_f(\overline{L})]\psi_{skin} \tag{3.17}$$

onde RGB é a cor da pele, K_{dskin} é o parâmetro que define o quão difusa é a pele, ψ_{skin} é a cor resultante da pele, I é a intensidade da luz e λ_{skin} é a reflexão da luz resultante na pele.

As sombras do pêlo-sobre-pêlo são simuladas pelo uso de algumas frações de sombras do pêlo-sobre-pele para de forma similar atenuar a iluminação do pêlo:

$$\lambda_{hair} = I[1 - s\alpha_f(\overline{L})]\psi_{hair} \tag{3.18}$$

onde s é a constante de densidade das sombras do pêlo-sobre-pêlo e $\overline{L}$ é o vetor de direção da luz normalizado. A constante s pode ser ajustada para incrementar ou decrementar a densidade das sombras de pêlo-sobre-pêlo, o valor de $s = 0,5$ foi usado por funcionar bem para pêlos em formato cilíndrico. Isto corresponde a uma pelagem em que, na média, metade de cada pêlo está sob sombra e a outra metade não está.

O cálculo da visibilidade do pêlo-sobre-pele é consideravelmente simples. A opacidade do pêlo visto a partir da direção da câmera é calculada ($\alpha_f(\overline{E})$) e este valor é usado para mesclar a iluminação da pele com a iluminação do pêlo:

$$\lambda = \alpha_f(\overline{E})\lambda_{hair} + [1 - \alpha_f(\overline{E})]\lambda_{skin} \tag{3.19}$$

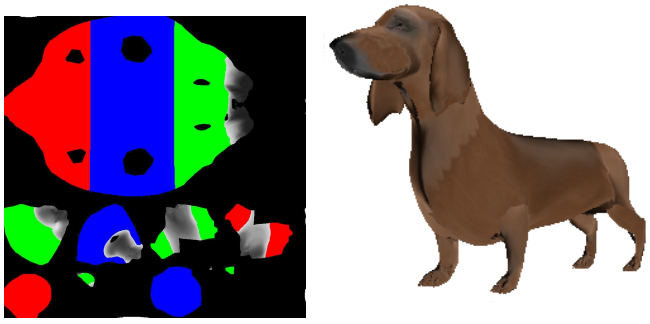
3.1.4 Mapa de Tangente Dinâmica

(a) Mapa de Tangente Dinâmica

(b) Modelo 3D

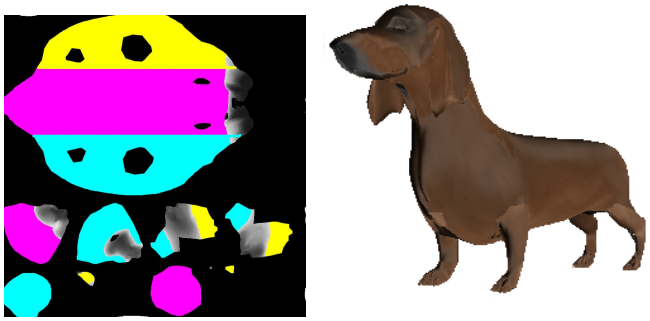
Figura 3.6 Textura de pêlo de dálmata usada como Mapa de Tangente Dinâmica e o efeito visualizado no modelo 3D.

Um Mapa de Tangente é utilizado como entrada para especificar o vetor tangente em toda a superfície. O vetor tangente $\overline{T}$ é o responsável pela direção de cada pêlo no eixo de coordenadas



(a) Mapa de Tangente Dinâmica (b) Modelo 3D

Figura 3.7 Mapa de Tangente Dinâmica e o efeito visualizado no modelo 3D.



(a) Mapa de Tangente Dinâmica (b) Modelo 3D

Figura 3.8 Mapa de Tangente Dinâmica e o efeito visualizado no modelo 3D.

XYZ que define a localização do objeto 3D no espaço, por isso é importante atribuir valores não-fixos (dinâmicos) para simular a aleatoriedade da direção dos pêlos em um animal do mundo real.

O Mapa de Tangente Dinâmica funciona da seguinte forma: primeiramente, ele é gerado pelo usuário a partir da edição dos Mapas de Textura usando o *Photoshop* [CS409] como ferramenta de edição de imagens. As diversas regiões do mapa têm suas cores também definidas pelo usuário, os valores RGB de cada *pixel*, convertidos para a escala de -1 –> 0 a 1 –> 255, são as coordenadas do vetor tangente do pêlo representado naquele *pixel*, onde: R = eixo X, G = eixo Y e B = eixo Z. Nas figuras 3.7, 3.8 e 3.6 são mostrados alguns mapas e respectivos efeitos causados pelas tangentes geradas a partir das cores usadas.

3.2 Modelando o Efeito da Água

Os pêlos da maioria dos mamíferos, incluindo os humanos, consistem principalmente da proteína material $\alpha - queratina$. A água age como um plastificante da estrutura bio-polimétrica da queratina e é capaz de modificar muitas das propriedades físicas das fibras $\alpha - queratina$.

Como um plastificante, a água muda a rigidez longitudinal das fibras enquanto é absorvida pelo fio de pêlo/cabelo. Os fios individuais podem absorver 30% de seu peso em água. Se o cabelo é danificado severamente (pela ação do vento, sujeira, etc) esta percentagem pode aumentar para 45%, causando o aumento do raio das fibras [WGL04]. Estas variações físicas serão mais detalhadas na subseção a seguir.

3.2.1 Função de Umidade

No trabalho de Ward e demais autores [WGL04], é descrito que a umidade pode fazer objetos parecerem mais escuros, com mais brilho e/ou mais especulares. As diferenças na aparência são causadas pela combinação da presença de líquido na superfície e dentro do material. Quando o pêlo se torna molhado, uma camada fina de água é formada ao redor das fibras. A interface bruta e em forma de telhas da fibra se torna uma interface água-ar suave e similar a um espelho. Obviamente, esta mudança dá ao pêlo uma aparência com mais brilho, devido às reflexões especulares, tipicamente modeladas por um expoente de *fall-off* crescente no modelo de iluminação e sombreamento de Phong.

Por causa da água absorvida ao redor das fibras de pêlo, o índice relativo de refração diminui. Então a absorção de luz dentro do pêlo aumenta devido a uma maior quantidade de reflexão interna total. O fênomeno causa uma aparência mais escura do pêlo molhado em comparação com o pêlo seco.

Além disso, esta relação implica em uma fração menor de luz, refletida pelo fio de pêlo, que atravessa o núcleo da fibra. As fibras de pêlo têm um núcleo pigmentado no centro do volume cilíndrico, a fonte de sua cor aparente. Entretanto, apenas a fração de raios de luz que atravessa o núcleo do pêlo é responsável pela cor que é visível. Consequentemente, com a umidade crescente, o pêlo irradia uma fração também crescente de luz incolor, originada nas reflexões da superfície ar-água. Este efeito contribui para a aparência com mais brilho do pêlo molhado em relação ao pêlo seco.

As interações entre a luz e o pêlo molhado são capturadas pelas alterações nos parâmetros de renderização do modelo *Fake Fur Rendering* original de acordo com a quantidade de água presente no pêlo. É definido um Fator de Umidade f_u para controlar a quantidade de umidade para o modelo, onde $f_u = 0$ é para um cão seco e $f_u = 1$ é para um cão completamente molhado.

Proporcionalmente à variação do Fator de Umidade entre 0% e 100%, alguns parâmetros variam diretamente, gerando uma aparência molhada para o pêlo. Mais especificamente, um vetor-parâmetro é controlado pelo usuário. Os valores de máximo e mínimo foram definidos a partir de dados obtidos por pesquisa, além disso informações sobre o comportamento do pêlo em geral quando sob influência da água foram geradas a partir de fotos de cães reais (esta etapa será explicada no capítulo 4). De acordo com o Instituto L'Oreal [L'O08], algumas características físicas são modificadas quando o cabelo é molhado. O fio, quando molhado, tem seu raio aumentado de 15% a 20% em relação ao valor original quando seco. O comprimento do fio também aumenta quando o cabelo é molhado, a variação pode chegar a 2% do comprimento original quando seco. Em nossa técnica, à medida que o Fator de Umidade aumenta, o raio da base de um fio individual também aumenta, proporcionalmente ao valor do raio original quando seco. Embora esses valores sejam especificamente para cabelo humano, eles são utilizados na técnica para simulação de pêlo molhado apresentada nesta dissertação.

Para o parâmetro alterado devido à presença de água, os valores de máximo e mínimo são definidos como $V_p^{molhado}$ e V_p^{seco}, respectivamente. O vetor-parâmetro varia de acordo com a seguinte função linear (chamada Função de Umidade) [WGL04]:

$$V_p = V_p^{seco} + f_u(V_p^{molhado} - V_p^{seco}) \tag{3.20}$$

Os seguintes parâmetros do modelo *Fake Fur Rendering* original foram selecionados para variar de acordo com a Função de Umidade: comprimento (l) e raio da base do pêlo-referência (r_b), coeficiente difuso (K_d) do pêlo, coeficiente especular do pêlo (K_s), e expoente especular (p). Os parâmetros l e r_b foram selecionados por representarem a geometria do pêlo-referência, os parâmetros K_d e K_s foram escolhidos por representarem as reflexões difusa e especular do pêlo, respectivamente, e o p é a representação do espalhamento da reflexão especular. Os valores destes parâmetros para o pêlo seco são definidos de forma empírica, a partir de avaliação visual do pêlo renderizado. Os valores para pêlo molhado são obtidos a partir da Função de Umidade aplicada aos valores iniciais de pêlo seco, as percentagens de variação para cada parâmetro (K_d, K_s e p) foram definidas a partir das amostras e as informações sobre o comportamento do cabelo humano sob a ação de água definiram as percentagens de variação dos parâmetros (l e r_b) do pêlo-referência. A figura 3.9 mostra o impacto da variação individual dos parâmetros de iluminação do *Fake Fur Rendering* e da Função de Umidade. Os demais parâmetros da técnica *Fake Fur Rendering* são mantidos com seus valores originais quando o pêlo se torna molhado, pois não têm relação com as reflexões difusa e especular.

3.2.2 Mapa de Umidade

Para a simulação da mudança do pêlo seco para o molhado, além da alteração da aparência do pêlo um outro fênomeno é modelado: a mudança gradativa ao longo do tempo. Em condições normais de ambiente, um animal não tem todos os pêlos de seu corpo completamente molhados no instante imediato em que começam a ser atingidos pela água. Geralmente a mudança ocorre de forma gradativa, algumas regiões do pêlo ficam molhadas antes das outras. Isto ocorre porque nem todas as regiões do pêlo do animal são atingidas pela água no mesmo instante. Um exemplo prático é a chuva, quando começa a chover os primeiros pêlos a serem molhados são os das regiões do dorso e do topo da cabeça, então a água gradativamente molha as demais regiões do corpo do animal, de cima para baixo. Alguns Mapas de Umidade foram criados para simular este efeito, um exemplo pode ser visto na figura 3.10, imagem à esquerda. Os Mapas de Umidade são gerados a partir da edição dos Mapas de Textura usando o *Photoshop* [CS409] como ferramenta de edição de imagens.

O Mapa de Umidade também é um parâmetro de entrada da técnica proposta nesta dissertação. As regiões mais escuras do mapa definem que partes da superfície do objeto 3D serão influenciadas primeiro pela variação da Função de Umidade. À medida que o valor da Função de Umidade aumenta, as regiões mais claras do mapa também definem as demais partes 'molhadas' da superfície do objeto. A tabela 3.1 lista as cores RGB do Mapa de Umidade que passam a definir as regiões molhadas à medida que o valor da Função de Umidade aumenta. Alguns resultados obtidos com o uso deste mapa são mostrados no capítulo 4.

Um 'Mapa de Secagem' também pode ser usado, caso se queira simular a mudança de

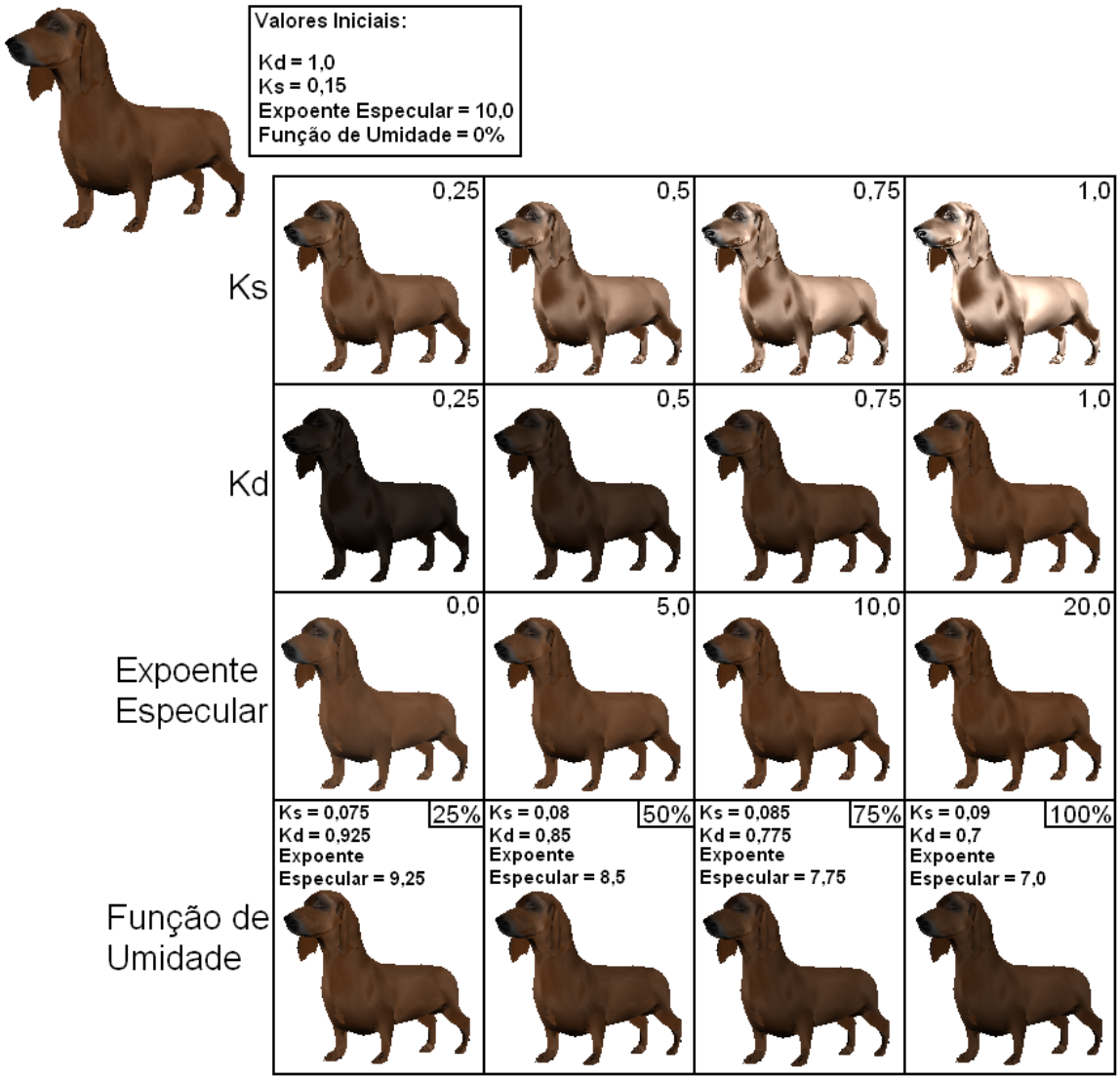
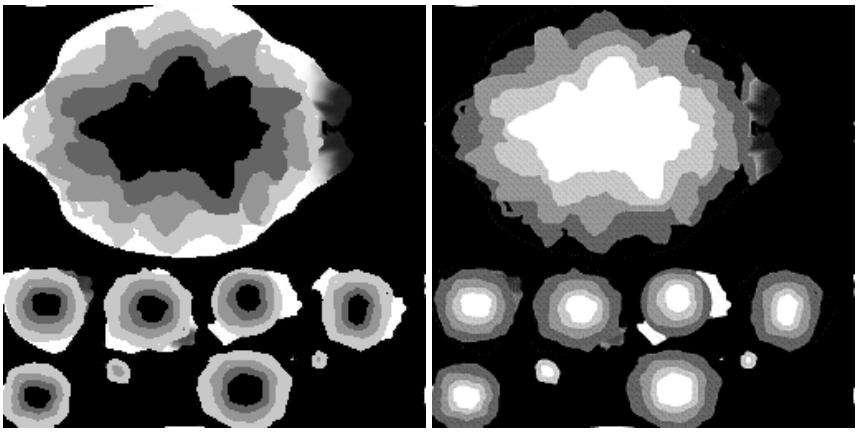


Figura 3.9 Parâmetros *Fake Fur Rendering* X Função de Umidade

estado do molhado para seco tal qual ocorre na natureza: quando um animal está sob o sol ele seca primeiro nas regiões atingidas pelos seus raios, assim como quando está sob a chuva (as regiões atingidas pelas gotas de chuvas se molham primeiro). Por isso, se faz necessário um Mapa de Secagem, para definição das regiões a serem secadas primeiro. Um exemplo pode ser visto na figura 3.10, imagem à direita. Este mapa funciona da mesma forma que o Mapa de Umidade, a diferença é que as cores estão invertidas: o preto (R = 0, G = 0, B = 0) se torna branco (R = 255, G = 255, B = 255), o cinza escuro (R = 100, G = 100, B = 100) se torna cinza claro (R = 200, G = 200, B = 200) e assim sucessivamente.



(a) Mapa de Umidade (b) Mapa de Secagem

Figura 3.10 Mapas utilizados na simulação do pêlo mudando do estado seco para molhado e vice-versa, ao longo do tempo.

Tabela 3.1 Variação da Função de Umidade.

Função de Umidade	RGB do Mapa de Umidade
1.00	0 0 0
0.75	100 100 100
0.50	150 150 150
0.25	200 200 200
0.00	255 255 255

3.3 Unidade de processamento gráfico - GPU

As GPUs (*Graphics Processing Units*, ou Unidades de Processamento Gráfico) são processadores potentes e flexíveis, foram inicialmente projetadas para processamento gráfico em 3D. Elas são programáveis, pois utilizam *shaders* (*vertex*, *geomtery* e *fragment*) e linguagens de alto nível. As GPUs mais recentes suportam cálculos de alta precisão (32 bits em todo o pipeline). O poder desses processadores é determinado pelo maior número de transistores para processamento do que para *caching* de dados e controle de fluxo, o que possibilita cálculos matemáticos e processamento em paralelo intensos. Na figura 3.11 pode ser visto o *Pipeline* gráfico das GPUs.

Neste *pipeline*, a camada de Aplicação computa a geometria 3D e faz chamadas à API gráfica, a camada de Transformação transforma a geometria 3D para 2D (em paralelo), a camada de Rasterização gera fragmentos a partir da geometria 2D (em paralelo) e, por fim, a camada de Composição combina os fragmentos para formar uma imagem. A figura 3.12 ilustra uma simplificação do *pipeline* mostrado na figura 3.11.

Os cálculos do modelo *Fake Fur Rendering* bem como da função de umidade são feitos no *pixel shader* (também chamado de *fragment shader*) que executa rotinas programáveis atuando no nível de *pixel* assim sendo, depois que a imagem foi completamente modelada pelo sistema (CPU e GPU) e teve seus polígonos 'ajustados' pelo *vertex shader*, o *pixel shader* a-

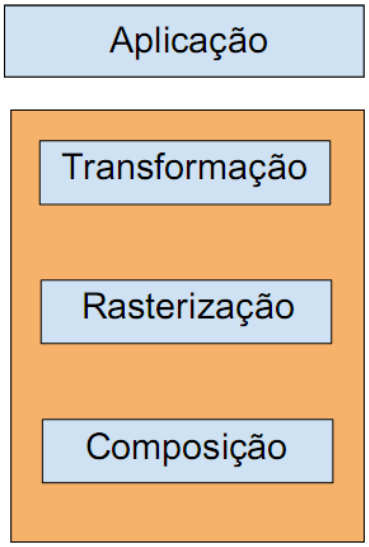


Figura 3.11 *Pipeline* gráfico das GPUs

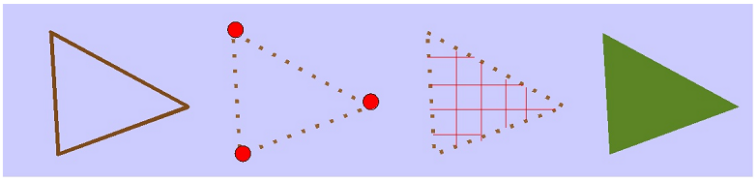


Figura 3.12 *Pipeline* gráfico simplificado

nalisa os materiais dos objetos modelados e as condições de iluminação, realçando cores onde for necessário, adicionando reflexos onde eles existirem e criando qualquer efeito que o programador quiser com mais realismo do que as técnicas simples de texturização e iluminação tradicionais.

As coordenadas de localização dos demais elementos que compõem a cena: fonte de luz, câmera e coordenadas de textura, bem como a definição dos vetores normais e tangentes são definidos no *vertex shader*. Os mapas de umidade e tangente também têm suas coordenadas estabelecidas no *vertex shader* que ainda é responsável pela manipulação dos vértices do objeto 3D e, conseqüentemente, pelo seu formato.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a maneira como os dados de entrada para a Função de Umidade são obtidos, também são mostrados e discutidos os resultados gerados a partir do modelo implementado e descrito nesta dissertação: *Dry and Wet Fake Fur*. Para as simulações foram utilizados arquivos de malha que descrevem a geometria do modelo 3D e alguns mapas de textura para atribuir cores à superfície e detalhes como olhos e focinhos dos animais. Os arquivos de malha estão no formato .obj, contendo as informações relativas aos vértices, vetores normais, coordenadas de textura e faces do modelo. Os mapas de textura estão no formato .jpg, .bmp e .png e foram criados com uso da ferramenta *3D Studio Max* [dM09]. Um modelo de cão da raça Dachshund foi usado como principal caso de estudo para um mamífero com pêlo curto do mundo real, mas outros animais também são renderizados e sofrem a ação da variação da Função de Umidade apresentada anteriormente.

O modelo original *Fake Fur Rendering* foi implementado usando a *OpenGL Shading Language* para GPUs Programáveis [Ros06], desta forma foi possível obter resultados rapidamente e com mais qualidade, visto que tanto os cálculos de iluminação quanto a renderização das imagens são feitos na placa gráfica em vez da CPU. O programa de renderização utilizado foi o *RenderMonkey* [Cen08] que é uma ferramenta gratuita de desenvolvimento usando *vertex* e *pixel shaders*. Por ser uma ferramenta que permite a programação para GPUs e de fácil disponibilidade, o *RenderMonkey* foi escolhido para implementação do *Dry and Wet Fake Fur*.

O *hardware* utilizado para realização das simulações apresenta as seguintes configurações: *Pentium Core* 2 *Duo*, Processador 2.4GHZ, 2GB de memória RAM, Disco Rígido de 250GB, placa gráfica *nvidia GeForce* 8400 256MB, Sistema Operacional *Windows XP*.

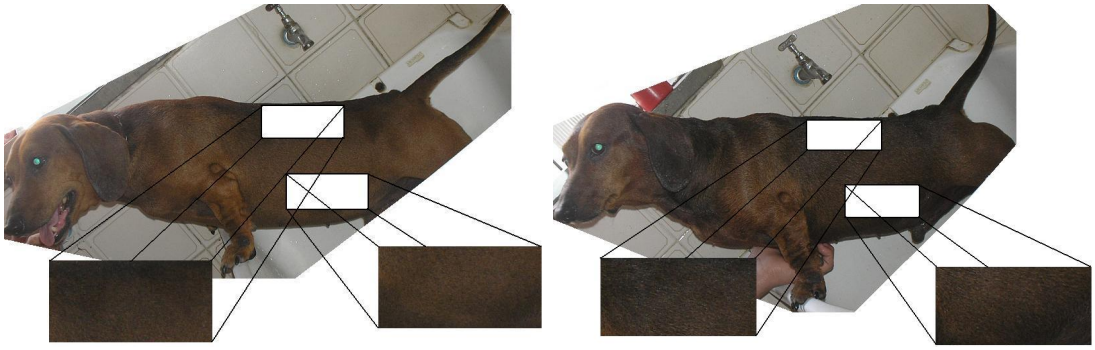
4.1 Dados Reais para Pêlo Seco e Molhado

É realmente difícil obter dados reais exatos para as propriedades especular e difusa de pêlo de mamíferos, particularmente quando o animal está sob influência de mudanças no ambiente. Para medidas especulares do cabelo humano, Marschner et al [MJC+03] utilizaram um laser e avaliou a luz espalhada em várias direções usando uma configuração baseada em um goniômetro de 4-eixos que posicionou uma fonte de luz e uma câmera CCD em direções arbitrárias de uma amosta. Esta solução demanda uma configuração de ambiente de alto custo financeiro, o que a tornou inviável para o desenvolvimento desta dissertação. Então, outras alternativas foram aplicadas para obtenção desses dados.

Algumas fotografias foram tiradas de cães da raça *Dachshund* secos e molhados, como estudo de caso, e a partir destas fotos foram medidas a reflexão especular e o escurecimento ao

longo do pêlo. Dois cães da raça Dachshund, um com pêlo na cor marrom e outro preto, foram fotografados. As amostras obtidas a partir destas fotos forneceram informações importantes sobre o quanto a aparência do pêlo muda do estado seco para molhado, elas foram usadas para avaliar esta diferença. Para o mesmo cão, sob condições aproximadamente similares de iluminação, foram tiradas fotos dele seco e, posteriormente, totalmente molhado. Algumas regiões mais significativas (com maior percepção das reflexões difusa e especular) foram selecionadas como amostras de cada foto. Para estas amostras, foram obtidos os valores da cor RGB de cada *pixel* que foram convertidos para o sistema de cores $CIEL*a*b*$ [1] que por separar um canal específico para iluminação ($L*$) dos canais de cores ($a*$ e $b*$) foi escolhido para a análise das amostras. A diferença entre os valores de mediana do parâmetro $L*$ das amostras de pêlo seco e molhado foi obtida, esta diferença forneceu uma aproximação do quanto mais escuro, proporcionalmente, o pêlo se torna quando molhado (as diferenças entre as medianas de $a*$ e $b*$ são desconsideradas pois o intuito é capturar apenas a diferença de iluminação). O valor obtido foi usado para decrementar o componente difuso e para incrementar o componente especular do modelo *Fake Fur Rendering*.

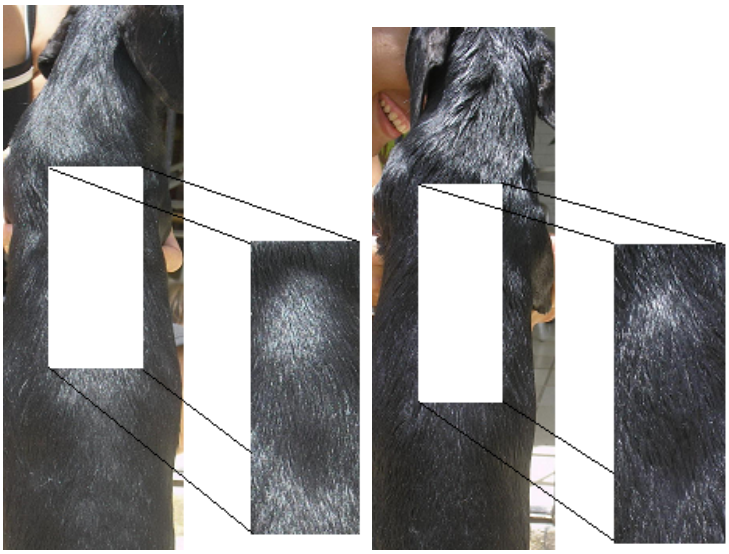
A mediana é um número que caracteriza as observações de uma determinada variável de tal forma que este número (a mediana) em um grupo de dados ordenados (valor $CIEL*a*b*$ de cada *pixel*) separa a metade inferior da amostra da metade superior. Visto que as amotras selecionadas apresentam uma certa variação de tonalidades na cor do pêlo, os valores de mediana foram escolhidos para a detecção da cor 'intermediária' dentre estas tonalidades. Então, foi obtida a diferença entre as medianas das componentes difusas das amostras de pêlo seco e molhado. As amostras do pêlo na cor marrom foram utilizadas para este cálculo por apresentarem uma variação de cor mais perceptível. A figura 4.1 mostra duas fotos do mesmo cão e as amostras que serviram como dados de entrada.



(a) Amostras de pêlo seco (b) Amostras de pêlo molhado

Figura 4.1 Cão da raça Dachshund com pêlo marrom.

[1] O $CIEL*a*b*$ é o mais completo espaço de cores especificado pela Comissão Internacional de Iluminação, ele descreve todas as cores visíveis pelo olho humano e foi criado para servir como um modelo independente a ser usado como referência. As três coordenadas do $CIEL*a*b*$ representam a iluminação da cor ($L*$ = 0 indica preto e $L*$ = 100 indica luz difusa de cor branca), sua posição entre vermelho/magenta e verde ($a*$, valores negativos indicam verde enquanto valores positivos indicam magenta) e sua posição entre amarelo e azul ($b*$, valores negativos indicam azul e valores positivos indicam amarelo)[Hal89].



(a) Amostra de pêlo seco (b) Amostra de pêlo molhado

Figura 4.2 Cão da raça Dachshund com pêlo preto.

Finalmente, a diferença entre os valores da média de $L*$ foi usada para medir a variação nas propriedades especulares, os valores de média foram usados para reduzir os efeitos da iluminação irregular no momento da obteção das amostras. As amostras de pêlo seco e molhado foram convertidas para escala de nível cinza (ver a equação 4.1), então os valores das médias do parâmetro L (para cada amostra - pêlo seco e pêlo molhado) do sistema de cores $CIEL*a*b*$ foram obtidos pela conversão de nível de cinza para $CIEL*a*b*$ e então computados. O valor de diferença entre as médias forneceu uma estimativa de intensidade da reflexão especular. Este valor foi posteriormente usado para calibrar a variação no coeficiente especular do modelo. Visto que a intenção é focar no efeito especular, os valores de média foram usados para reduzir os efeitos da iluminação irregular. As amostras do pêlo na cor preta, em particular as regiões do pêlo em que o efeito especular era mais visível, foram utilizadas para este cálculo por apresentarem uma variação de reflexão especular mais perceptível. A figura 4.2 mostra duas fotos do mesmo cão e as amostras que serviram como dados de entrada.

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \tag{4.1}$$

Na figura 4.3 são mostrados os resultados relacionados às diferenças nas propriedades especulares e na cor para o pêlo seco e o molhado. A tabela 4.2 lista os valores para seco e completamente molhado utilizados nas simulações com o modelo 3D de cão da raça Dachshund. Embora poucas amostras tenham sido utilizadas para medidas, as informações obtidas geram os dados utilizados para calibrar as diferenças no modelo. Contudo, é sabido que a configuração de ambiente apropriada para tirar as fotos, de onde as amostras são extraídas, não são as ideais. Além disso, seriam necessárias mais fotos e amostras para uma maior credibilidade estatística dos dados.

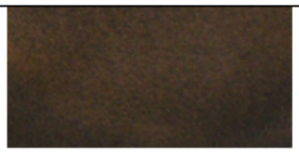
	 Amostra de pêlo seco	Amostra de pêlo molhado
L*	-	-
Valor mínimo	-13,13	-14,78
Valor máximo	36,84	40,42
Mediana	**17,7**	**12,5**
Diferença entre medianas	**~ - 30%**	
	Amostra de pêlo seco em nível de cinza	Amostra de pêlo molhado em nível de cinza
L*	-	-
Valor mínimo	0,47	0,36
Valor máximo	86,75	87,65
Média	**41,4**	**30,2**
Diferença entre médias	**~ 27%**	

Figura 4.3 Diferenças entre as Medianas e entre as Médias para o canal *CIEL*∗ em amostras distintas.

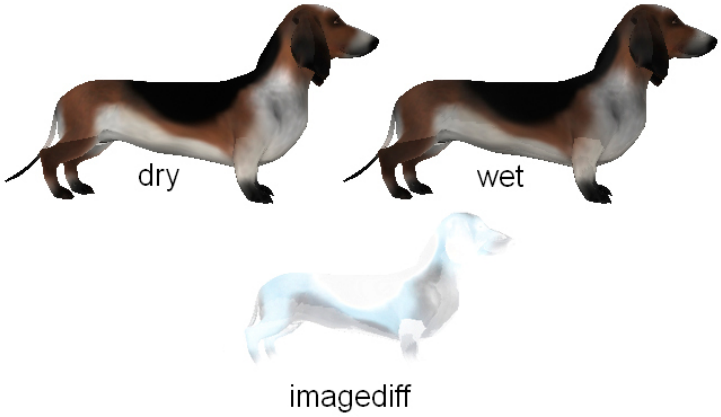
4.2 Estudo de Caso

Nas simulações, as cenas são renderizadas com duas fontes de luz e os seguintes parâmetros fixos:

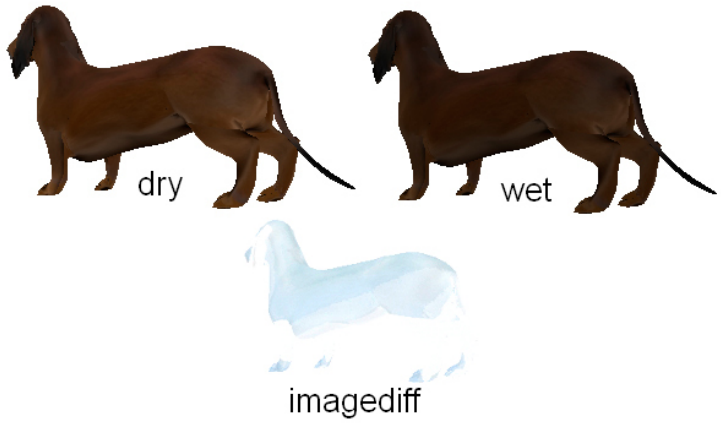
Tabela 4.1 Parâmetros fixos do *Fake Fur Rendering*.

$K_d skin$	1,00
$\rho_{transmit}$	0,02
$\rho_{reflect}$	1,00
densidade	500,00

O vetor tangente muda dinamicamente de acordo com o mapa de tangente descrito no capítulo anterior, neste mapa o vetor tangente é obtido a partir do valor normalizado do RGB por *pixel* e então aplicado ao modelo. Mapas de textura de diferentes raças de cães foram utilizados com o modelo de geometria do Dachshund: Dachshund (marrom e preto), Basset e Dálmata.



(a) Raça Basset



(b) Raça Dachshund com pêlo marrom.

Figura 4.4 Resultados para Basset e Dachshund marrom com pêlo seco e molhado, também a imagem de diferença entre eles.

O que possibilita a análise do modelo *Dry and Wet Fake Fur* aplicada em diferentes cores de pêlo.

Primeiro é mostrado, na figura 4.4 (a), um modelo de Dachshund com uma textura de Basset simulando o pêlo seco e depois molhado. Na figura 4.4 (b) é mostrado a mesma situação para uma textura de Dachshund. É possível observar que o efeito de pêlo molhado cria uma aparência mais escura para esse tipo de pêlo curto.

O programa *Imagediff* [Til08] foi utilizado para gerar imagens que ilustram a diferença entre as imagens do modelo 3D com o pêlo seco e com o pêlo molhado, esta ferramenta realiza a comparação de imagens *pixel* a *pixel* gerando uma 'máscara de diferença' mostrando os *pixels* que foram alterados entre as imagens.

Nas figuras 4.7 (a) e (b) são mostrados os resultados das simulações para cães da raça Dachshund e Dálmata. No caso do Dálmata, o valores dos parâmetros $\rho_{transmit}$ e $\rho_{reflect}$ são iguais a 0,5, pois os pêlos brancos ou cinzas são bem representados por coeficientes de reflexão e transmissão quase iguais [Gol97]. Os cães ficam molhados de forma gradativa, este efeito é

Tabela 4.2 Parâmetros para pêlo seco e molhado usados nos modelos da figura 4.4.

	seco	molhado	% de variação
comprimento	2,40	2,88	2%
raio da base	0,30	0,31	20%
K_d	1,00	0,70	-30%
K_s	0,15	0,19	30%
p	10,00	7,30	-27%
f_u	0%	100%	-

Figura 4.5 Um Dachshund preto real com pêlo molhado e um modelo gerado pelo modelo *Dry and Wet Fake Fur*, para este modelo: K_s = 0,4 e f_u = 100%. Os demais parâmetros são iguais aos das tabelas 4.1 e 4.2.

obtido graças à utilização do Mapa de Umidade descrito no capítulo anterior: algumas regiões são marcadas para ficarem molhadas antes das outras até o cão se tornar completamente molhado, de acordo com o valor RGB de cada pixel, conforme a tabela 3.1 apresentada no capítulo anterior. Quando a Função de Umidade alcança seu valor máximo, todas as regiões da superfície do modelo se tornam igualmente molhadas. Desta forma, é possível simular o que ocorre em um cão no mundo real enquando ele fica molhado sob a chuva, por exemplo. As características físicas do pêlo (parâmetros r_b e l, raio da base e comprimento do pêlo-referência, respectivamente) também contribuem para a aparência mais escura do pêlo. Além disso, o componente especular do material (parâmetro K_s) contribui para a aparência com um pouco mais de brilho em algumas poucas regiões do pêlo, em particular para as texturas do Dachshund e dos outros animais utilizados nas simulações. Na figura 4.7 (a) as imagens de diferença ilustram a variação do pêlo seco (a) para o nível de umidade atual, já na figura 4.7 (b) as imagens de diferença mostram a variação do nível de umidade anterior para o atual.

Ainda foi possível verificar que o *Dry and Wet Fake Fur* comportou-se melhor com texturas de pêlos claros, quando a variação do estado seco para o molhado é mais perceptível. Em texturas de pêlos escuros, a variação é difícil de se identificar, assim como no mundo real, sendo restrita aos pontos de reflexão especular, ainda assim em pequena proporção. Contudo, em ambos os casos (texturas de pêlos claros e escuros) os resultados são satisfatórios e condizentes com o mundo real.

Visto que os efeitos especulares são mais visíveis em texturas pretas, foi feita uma simulação usando uma textura de um cão da raça Dachshund na cor preta, um cão preto real é

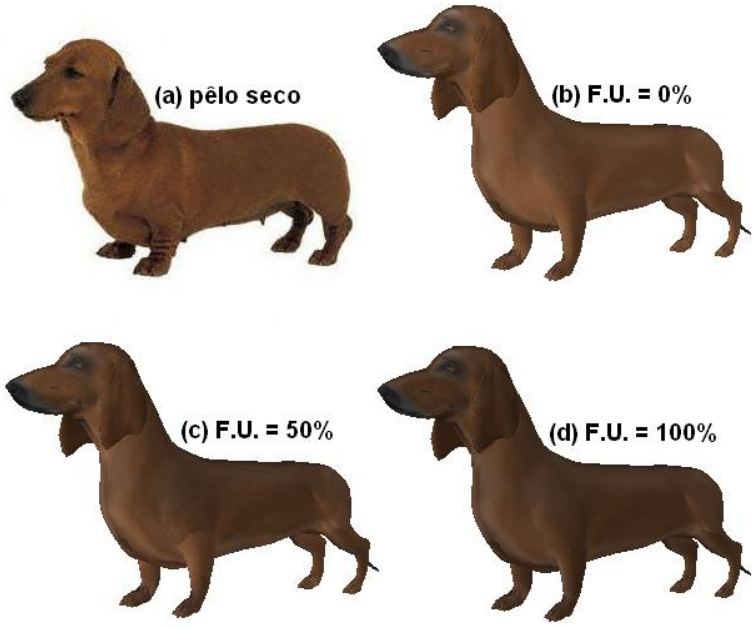


Figura 4.6 Um Dachshund real com pêlo seco na cor amarelo queimado e modelos 3D com valores diferentes para a Função de Umidade (F.U.).

mostrado para comparação na figura 4.5. A figura 4.6 mostra mais um cão real, desta vez na cor amarelo queimado, e simulações no seu modelo 3D em diferentes níveis de molhado.

Com o objetivo de avaliar o modelo *Dry and Wet Fake Fur* atuando em diversos tipos de pêlos, diversas texturas foram utilizadas no modelo 3D do Dachshund. Na figura 4.8 são mostradas as texturas utilizadas nas simulações.

4.3 Outras Simulações

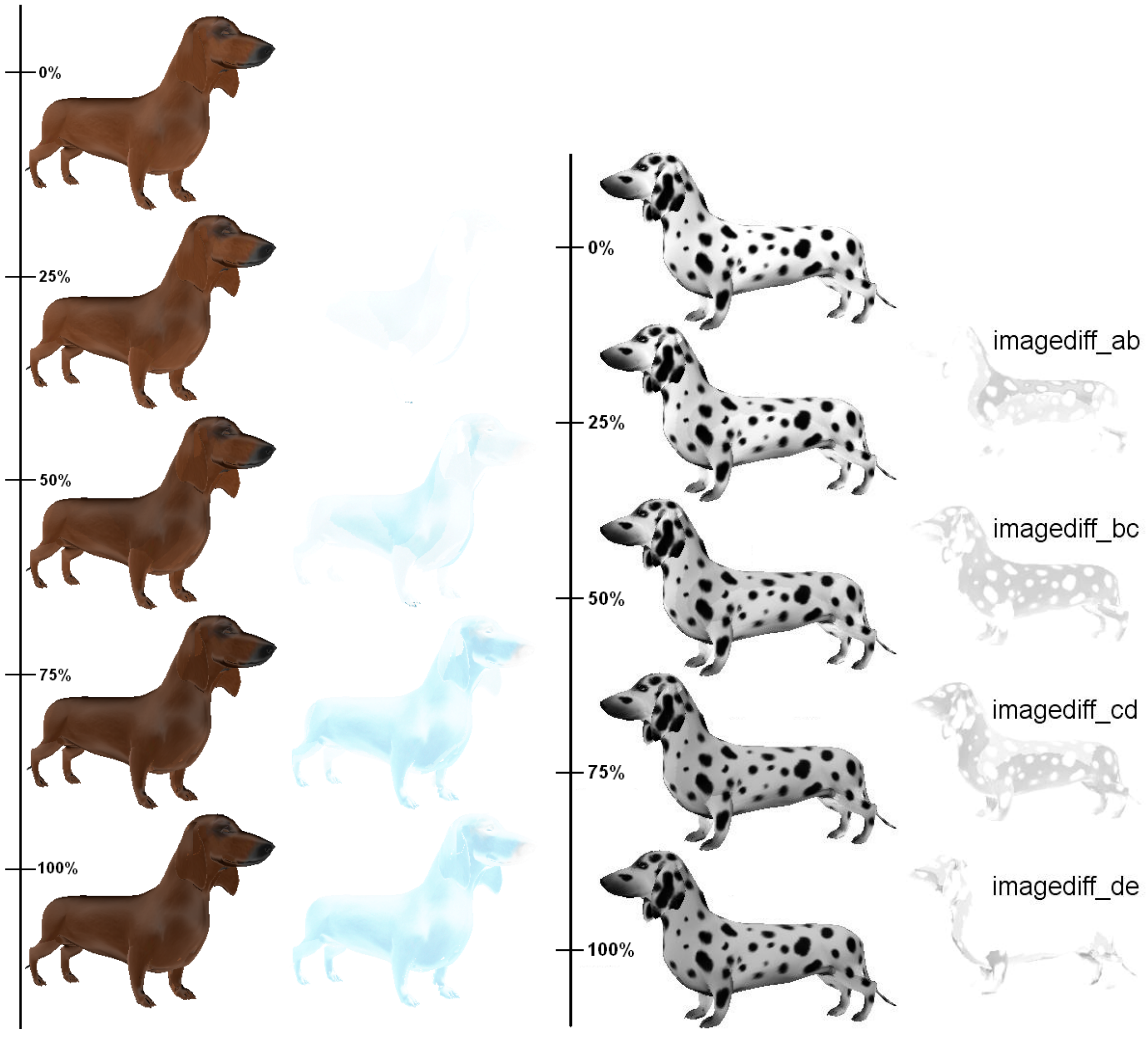
Apesar das amostras coletadas serem apenas de cães da raça Dachshund, modelos 3D de outros animas foram utilizados nas simulações, estes animais têm pelagem rala similar (visualmente) ao cão da raça Dachshund. A diversidade de cores dos pêlos permite a análise do comportamento do modelo *Dry and Wet Fake Fur* aplicada em outros modelos e utilizando diversas texturas. Contudo, para a obtenção de melhores resultados, seria necessário coletar amostras de pêlos secos e molhados dos animais simulados nas figuras 4.9 e 4.10. A figura 4.11 ilustra os mapas de textura e de umidade utilizados para as simulações apresentadas nesta seção.

Visto que são renderizados pêlos de animais diferentes, foi observado, de forma empírica, que valores diferentes para o parâmetro coeficiente especular (K_s) possibilitam melhores resultados nas simulações. A tabela 4.3 relaciona os modelos 3D de animais com os coeficientes utilizados nas simulações. Os demais parâmetros são os mesmos das tabelas 4.1 e 4.2.

O sistema implementado não requer nenhuma pré-computação para adicionar água dinamicamente ao pêlo. As simulações são executadas aproximadamente na mesma taxa de velocidade e o pêlo molhado é obtido, através de ajustes na função de umidade, em tempo-real.

Tabela 4.3 Modelo 3D e respectivo coeficiente especular (K_s).

Modelo 3D	K_s pêlo seco	K_s pêlo molhado
Cão	0,17	0,22
Tigre	0,25	0,33



(a) Dachshund marrom (b) Dálmata

Figura 4.7 Variação de seco para molhado em dois tipos de pêlo no modelo 3D do Dachshund. No caso do pêlo marrom, à direita estão as imagens de diferença em relação ao pêlo totalmente seco (Função de Umidade = 0%). No caso do pêlo de Dálmata, à direita estão as imagens de diferença em relação ao valor anterior da Função de Umidade.

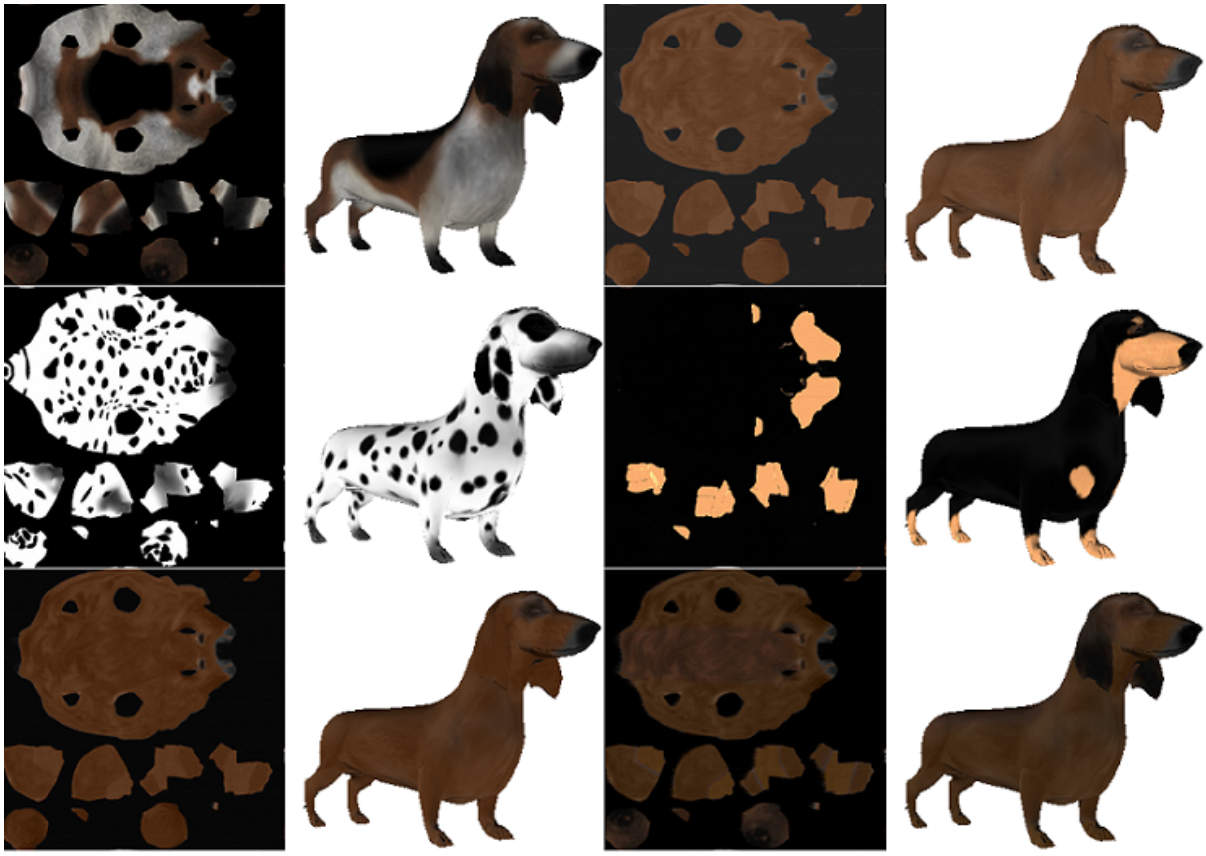


Figura 4.8 Um mesmo modelo 3D renderizado com as diversas texturas usadas nas simulações.

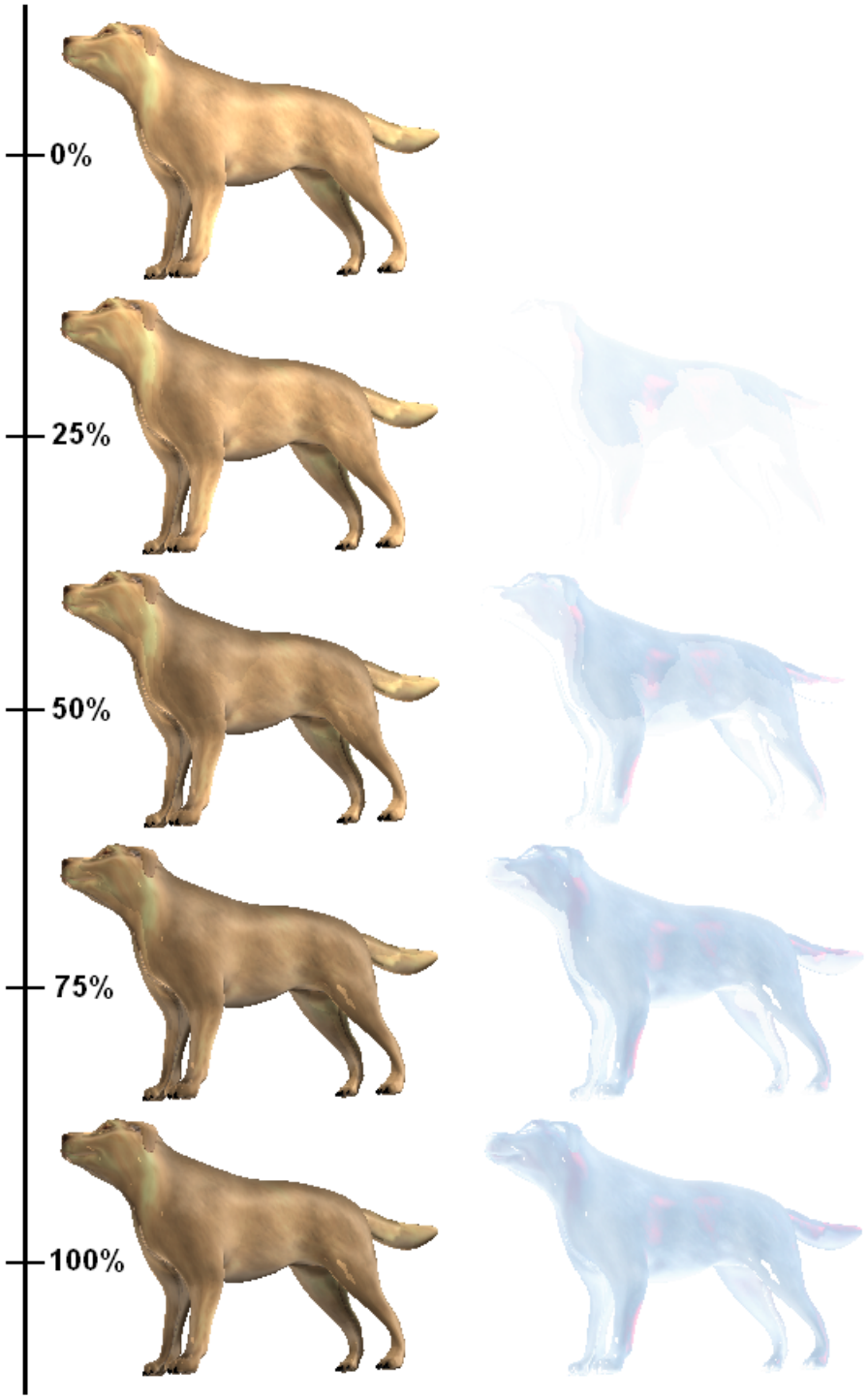


Figura 4.9 Outro modelo 3D de cachorro com variação da Função de Umidade, à direita são mostradas as imagens de diferença em relação à primeira imagem do cachorro com pêlo seco.

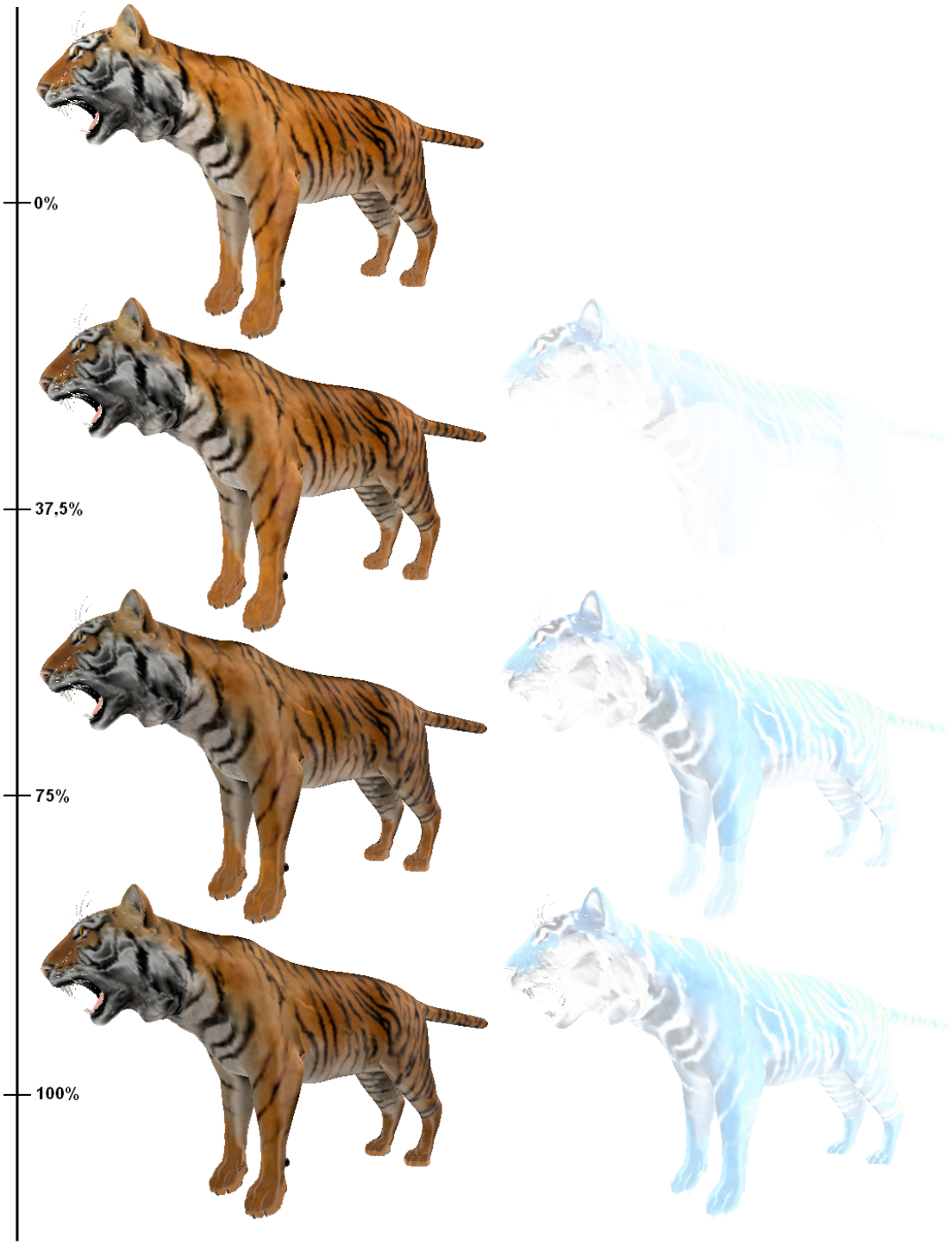


Figura 4.10 Modelo 3D de um tigre com variação da Função de Umidade, à direita são mostradas as imagens de diferença em relação à primeira imagem do tigre com pêlo seco.

Figura 4.11 Modelos 3D dos outros animais utilizados nas simulações e seus respectivos Mapas de Textura e Umidade.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são discutidos as conclusões a respeito dos resultados apresentados no capítulo anterior e os trabalhos futuros que visam a melhora, a extensão e a obtenção de novos resultados.

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou um modelo de iluminação probabilístico para simulação de pelagem animal rala sob influência da ação do ambiente, mais especificamente o modelo *Fake Fur Rendering* sofrendo influência de água. Nesta dissertação é proposta uma nova abordagem para variação da aparência do pêlo renderizado quando este é molhado virtualmente. Valores de entrada são obtidos a partir de amostras retiradas de fotos de cães da raça Dachshund do mundo real, o sistema então sintetiza alterações na aparência do objeto 3D utilizado para simulações, em particular animais mamíferos com pêlo curto posicionados a uma certa distância do observador.

O modelo *Dry and Wet Fake Fur* se mostrou satisfatório para realizar as tarefas que se propõe, simulando um animal virtual ficando molhado gradativamente, tal qual acontece no mundo real. A validação foi feita de forma empírica, por observação da mudança de aparência do pêlo curto, no mundo real, quando muda do estado seco para o molhado e vice-versa. O sistema implementado permite ainda vários tipos de controle ao usuário que pode usar da sua criatividade para gerar uma grande diversidade de resultados a partir de um mesmo objeto 3D. Os demais sistemas de renderização de pêlos revisados neste trabalho também geram bons resultados, entretanto, na maioria dos casos, estão limitados a renderização de pêlos longos, em que a geometria de cada fio de pêlo deve ser renderizada o que torna o processo muito intenso computacionalmente. Nos casos em que a geometria de cada fio de pêlo não é importante, quando o objeto 3D está distante da câmera e os fios não podem ser enxergados individualmente, estes sistemas geram resultados similares ao *Dry and Wet Fake Fur*.

As principais contribuições do trabalho no contexto de renderização de pêlos sofrendo mudança de estado são:

1. A implementação do modelo *Fake Fur Rendering* em GPU.

2. Uma nova abordagem para renderização de pêlos sob influência de água. O modelo apresentado é menos complexo computacionalmente, permitindo a obtenção de novos resultados em tempo real.

3. O controle em tempo-real dos parâmetros de umidade possibilita ao usuário a escolha de que parâmetros devem representar as características mais evidentes nas variações de estado. Por exemplo: variação mais acentuada da reflexão difusa no caso de cães com pêlo nas cores mais claras e da reflexão especular em cães com pêlo na cor preta.

4. O Mapa de Umidade permite a variação gradativa da aparência do pêlo em quanto o mesmo se torna molhado, aqui a variação do tempo é considerada, de forma similar ao que ocorre no mundo real. Visto que, o animal não se torna completamente molhado em um instante, o processo ocorre gradativamente, tanto em termos de intensidade quanto em termos de que regiões do corpo do animal ficando molhadas antes das outras. Já o Mapa de Secagem faz o oposto, permitindo a variação gradativa da aparência do pêlo em quanto o mesmo se torna seco.

5. O Mapa de Tangente Dinâmica atribui ao usuário o controle em tempo real dos vetores tangente usados na renderização de pêlos.

6. Uma extensão do modelo *Fake Fur Rendering*: o modelo *Dry and Wet Fake Fur*.

5.2 Trabalhos Futuros

Apenas dois cães foram usados como fontes reais de amostras de pêlos, o que é consideravelmente escasso para um levantamento confiável de dados estatísticos. Por este motivo, se faz necessária a calibração do sistema com um estudo estatístico mais completo, contando com mais amostras de pêlos. Assim como um laboratório ou estúdio em que as condições de iluminação e ambiente como um todo sejam asseguradamente idênticas para fotos dos cães com pêlo seco e posteriormente com o pêlo molhado.

A pelagem rala de alguns animais mamíferos é um tipo de material bastante similar visualmente a outros materiais como alguns tipos de tecido ou mesmo cenários da natureza como grama ou neve (a uma certa distância do observador), nestes casos seria necessária uma modificação do modelo *Fake Fur Rendering* em relação à forma em que a área do objeto-referência é calculada, pois a geometria do mesmo seria diferente da geometria de um fio de pêlo. Por isso, a extensão do *Dry and Wet Fake Fur* para outros materiais é considerado um trabalho futuro.

Além da ação da água, a influência de outros líquidos na aparência do pêlo (óleo, por exemplo) poderia ser estudada e simulada.

Por fim, outras mudanças de estado poderiam ser implementadas além do molhado. O objeto 3D poderia ter sua superfície sujeita às mudanças para os estados de queimado, congelado, envelhecimento, etc. Para tal, seria necessário o estudo e análise de outras técnicas que poderiam servir de referências para a extensão do *Fake Fur Rendering*.

Referências Bibliográficas

[BDMV88] Christian Bouville, Jean-Luc Dubois, Isabelle Marchal, and M. L. Viaud. Monte-carlo integration applied to an illumination model. In *Eurographics '88*, pages 483–498, September 1988.

[Bru99] Armin Bruderlin. A method to generate wet and broken-up animal fur. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 11(5):249–259, December 1999.

[BW06] S. Banisch and C. A. Wüthrich. Making grass and fur move. In *Thirteenth International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (Winter School on Computer Graphics)*, pages 25–32, February 2006.

[Cen08] AMD Developer Central. Website, 2008. `http://developer.amd.com/gpu/rendermonkey`.

[CS409] Adobe Photoshop CS4. Website, 2009. `http://www.adobe.com/br/products/photoshop/photoshop/`.

[CT82] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 1(1):7–24, January 1982.

[DEL+99] Julie Dorsey, Alan Edelman, Justin Legakis, Henrik Wann Jensen, and Hans Køhling Pedersen. Modeling and rendering of weathered stone. In *Proceedings of SIGGRAPH 99*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 225–234, August 1999.

[DH96] Julie Dorsey and Patrick M. Hanrahan. Modeling and rendering of metallic patinas. In *Proceedings of SIGGRAPH 96*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 387–396, August 1996.

[Dis96] Disney. 101 dalmatians. Website, 1996. `http://disney.go.com/disneyvideos/animatedfilms/101dalmatians/`.

[dM09] Autodesk 3ds Max. Website, 2009. `http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?siteID=123112&id=5659302`.

[DPH96] Julie Dorsey, Hans Køhling Pedersen, and Patrick M. Hanrahan. Flow and changes in appearance. In *Proceedings of SIGGRAPH 96*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 411–420, August 1996.

[DRS07] Julie Dorsey, Holly Rushmeier, and François Sillion. Digital modeling of material appearance, 2007.

[DVGNK99] K.J. Dana, B. Van-Ginneken, S.K. Nayar, and J.J. Koenderink. Reflectance and Texture of Real World Surfaces. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 18(1):1–34, Jan 1999.

[Gol97] D. B. Goldman. Fake fur rendering. In *Proceedings of SIGGRAPH 97*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 127–134, August 1997.

[GW97] Allen Van Gelder and Jane Wilhelms. An interactive fur modeling technique. In *Graphics Interface '97*, pages 181–188, May 1997.

[Hal89] Roy Hall. *Illumination and Color in Computer Generated Imagery*. Springer-Verlag, 1989.

[JLD99] Henrik Wann Jensen, Justin Legakis, and Julie Dorsey. Rendering of wet materials. In *Eurographics Rendering Workshop 1999*, pages 273–282, June 1999.

[KK89] J. T. Kajiya and T. L. Kay. Rendering fur with three dimensional textures. In *Proceedings of SIGGRAPH 89*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 271–280, July 1989.

[LGLM99] E. Larsen, S. Gottschalk, M. C. Lin, and D. Manocha. Fast proximity queries with swept sphere volumes. In *University of North Carolina, Tech. Rep. TR99-018*, 1999.

[L'O08] L'OREAL. Website, 2008. `http://www.hair-science.com/_int/_en/topic/topic_sousrub.aspx?tc=ROOT-HAIR-SCIENCE^SO-STURDY-SO-FRAGILE^PROPERTIES-OF\\-HAIR&cur=PROPERTIES-OF-HAIR`.

[LPFH01] Jerome E. Lengyel, Emil Praun, Adam Finkelstein, and Hugues Hoppe. Real-time fur over arbitrary surfaces. In *2001 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 227–232, March 2001.

[LTT91] Andre M. LeBlanc, Russell Turner, and Daniel Thalmann. Rendering hair using pixel blending and shadow buffers. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 2:92–97, 1991.

[MJC+03] Stephen R. Marschner, Henrik Wann Jensen, Mike Cammarano, Steve Worley, and Pat Hanrahan. Light scattering from human hair fibers. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):780–791, July 2003.

[ML95] H.B. Mall and N.V. Lobo. Determining wet surfaces from dry. In *ICCV - International Conference on Computer Vision*, pages 963–968, 1995.

[Pap02] Georgios Papaioannou. A simple and fast technique for fur rendering. Technical report, 2002.

[Ros06] Randi J. Rost. *OpenGL Shading Language Second Edition*. Addison Wesley, 2006.

[SWND05] Dave Shreiner, Mason Woo, Jackie Neider, and Tom Davis. *OpenGL Programming Guide, Fifth Edition*. Addison Wesley, 2005.

[TBM86] S.A. Twomey, C.F. Bohren, and J.L. Mergenthaler. Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces. *Applied Optics*, 25(3):431–437, 1986.

[Til08] Jim Tilander. Website, 2008. `http://www.tilander.org/aurora/2008/03/comparing-images.html`.

[TS67] Kenneth Torrance and E.M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57(9):1105–1114, September 1967.

[WAT92] Stephen H. Westin, James R. Arvo, and Kenneth E. Torrance. Predicting reflectance functions from complex surfaces. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92)*, pages 255–264, July 1992.

[WGL04] Kelly Ward, Nico Galoppo, and Ming C. Lin. Modeling hair influenced by water and styling products. In *2004 Computer Animation and Social Agents*, pages 207–214, 2004.