

5.

Técnicas de Iluminação

A iluminação de elementos de uma cena artificial é fundamental para criar o aspecto realista de uma visualização de elementos naturais. Ao contrário do que é feito na iluminação utilizada para visualização científica, ou seja, realçar e apresentar visualmente informações numéricas, a técnica utilizada para uma visão realística de elementos naturais necessita de reproduzir de forma mais fidedigna possível o processo físico de iluminação.

Em computação gráfica, iluminação pode ser entendida como a computação da cor resultante de um determinado pixel da imagem a ser formada. Devido a isso, para a iluminação de água, é necessária a computação dos efeitos de Reflexão, Refração, combinados através do Fator de Fresnel. Sendo assim, pode-se escrever uma equação para computação da cor resultante de um pixel da seguinte forma:

$$C_{pixel} = Fresnel(above)C_{reflect} + (1 - Fresnel(above))C_{refract} \\ + A_{shadow} A_{specular}$$

Equação 28: Equação de Iluminação do Oceano

Em metodologias como Ray Tracing e Photom Tracing, o cálculo desses efeitos é muito simples, visto que, a navegação tem total controle do caminhamento da luz. No entanto, nas condições do hardware gráfico atual, tais técnicas são pouco plausíveis para visualização do oceano em tempo real considerando todas as etapas de desenho do oceano. Portanto, a técnica empregada para realizar tal tarefa é a rasterização convencional, presente em todas as placas atuais.

Todavia, essa estratégia não fornece ao desenvolvedor controle para caminhar na cena, sendo necessário utilizar de outras táticas para realizar tal finalidade. Neste capítulo serão discutidas tais táticas.

5.1. Iluminação sobre e debaixo d'água

As técnicas de iluminação da água podem ser separadas em dois grupos: iluminação da água vista de um ponto acima de sua superfície e a iluminação da água vista debaixo de sua superfície.

A maioria das técnicas se concentra na visualização sobre a água, por se tratar de um efeito muito mais comum tanto para cinema, quanto para jogos e visualizadores. Cenas subaquáticas são mais complexas, pois, para gerar uma imagem realística, vários efeitos óticos da água devem ser levados em consideração, apesar de muitos deles serem importantes para a visualização sobre a água também, contudo, podem ser omitidos.

Os efeitos óticos adicionais para cenas submersas é o efeito de cáusticas (também pode ser explorado no ambiente sobre a água), *shafts of light* (também chamado de *God Ray*), e névoa. Exceto o efeito de *shafts of light*, todos os outros são discutidos nesse capítulo.

5.2. Reflexão

Para a visualização da reflexão usando uma metodologia de rasterização, é necessária a computação de um mapa (textura) que utiliza uma passada de desenho da cena e a gravação dessa passada em um *FrameBuffer* ou *RenderTarget*.

A produção do chamado *ReflectionMap* é obtida refletindo o observador em relação ao plano do oceano e, então, renderizando a cena desse novo ponto de vista. Considerando que o tamanho da textura e projeção utilizadas são as mesmas da cena final, deve-se armazenar apenas a matriz da câmera (*View*), pois, essa textura será utilizada como textura projetiva na composição final. A Figura 28 ilustra esse processo.

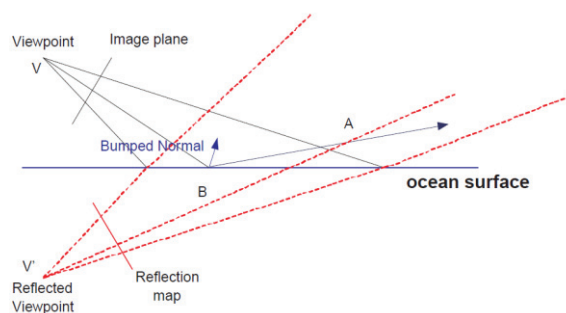


Figura 28: Reflexão da câmera (Hu et al., 2004)

Por fim, deve-se, ainda, utilizar de um plano de corte extra, que deve ficar aproximadamente ao nível da água, com normal orientada para baixo, eliminando assim os objetos submersos desnecessários. Observa-se que no caso de cenas subaquáticas, é necessária a inversão desses modelos.

Nota-se que o vetor normal do plano do oceano e a altura do mesmo podem ter sido deslocados, dessa forma, essa reflexão não é totalmente correta. Contudo, mesmo considerando a reflexão usando uma nova normal e um novo valor de distância do plano, ainda persistiriam erros, pois, a reflexão deveria ser computada para cada ponto da superfície do oceano (ou cada pixel numa análise de computação gráfica), levando em conta a posição e a normal local desse ponto. Conforme já discutido, isso não é possível utilizando uma técnica de rasterização e objetivando a visualização em tempo real. Dessa forma, assume-se o erro do método e tenta-se mitigar os erros evitando situações como ondas muito grandes.

Outro problema do uso dessa técnica surge quando se visualiza a cena utilizando a estereoscopia, pois o incômodo visual causado é muito grande, visto que, não há garantia de um correto casamento dos pixels para os olhos. Dessa forma, além da visualização se tornar falsa, ela causa uma grande perda de imersão e incômodo visual. O mais prudente de se fazer é remover a reflexão ou reduzi-la.

5.3. Refração

Da mesma forma que a reflexão, a refração é um fenômeno muito importante para o realismo de cenas com água. O processo de obtenção de um mapa de refração (*RefractionMap*) é análogo ao do mapa de reflexão, contudo, o ponto de vista é diferente.

Podem ser adotadas duas abordagens: a primeira simplifica o processo renderizando a cena do mesmo ponto de vista do observador, dessa forma, não considera o efeito físico da lei de Snell (Figura 29 linha cheia). A segunda forma recomputa a posição do observador, levando em conta o efeito da lei de Snell (Figura 29 linha tracejada). Observa-se que para pequenas variações de índices de refração, essa diferença é muito pequena.

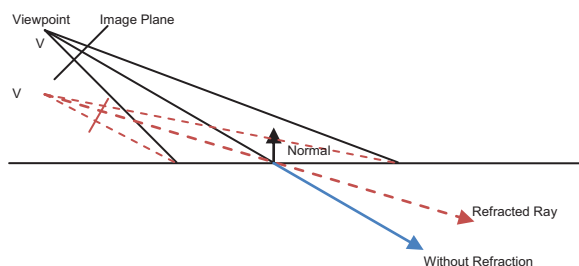


Figura 29: Refração da Câmera

A geração do mapa de refração compartilha do mesmo problema da geração do mapa de reflexão: o incômodo visual da estereocopia. Do mesmo modo, seria necessário o cálculo para cada ponto da superfície do oceano, ou melhor, cada pixel gerado na superfície. Assim, o uso ou não da lei de Snell para a rasterização não traz um grande aumento de qualidade.

Se a cena for subaquática, deve-se levar em consideração (para o uso da lei de Snell) que o meio da luz incidente é a água e não o ar.

5.3.1. Névoa submersa

Nos objetos submersos é necessário adicionar um efeito de névoa sobre os mesmos, dependendo da distância que se encontram da câmera. Esse efeito pode ser inserido, codificando no canal *alpha* da textura do *RefractionMap* a distância do objeto para a câmera e na etapa de composição utilizando esse valor para compor a cor do mesmo (Hu et al., 2004).

Sendo assim, temos a seguinte expressão para a cor da refração:

$$C_{refract} = \alpha_{fog}(d)C_{deep_water} + (1 - \alpha_{fog}(d))C_{obj}$$

Equação 29: Expressão geral da névoa submersa

A função de fog pode ser qualquer uma. No entanto, aconselha-se utilizar um modelo de fog exponencial para melhor representação física. Dessa forma, obtém-se a expressão:

$$C_{refract} = C_{deep_water} + C_{obj} e^{-Kd}$$

Equação 30: Expressão da névoa submersa exponencial

Onde **K** é a constante de extinção difusa da água e **d** é a distância do fragmento até a câmera Figura 30.

Em simulação de oceanos em águas profundas, muitas vezes o mapa de refração é substituído por uma cor de água profunda (tipicamente um azul bem escuro). Isso se deve ao fato de não existirem objetos submersos próximos o suficiente para que o coeficiente da névoa não anule a cor do mesmo. Observa-se que se **d** for grande a expressão e^{-Kd} tende a zero, deixando $C_{refract} = C_{deep_water}$.

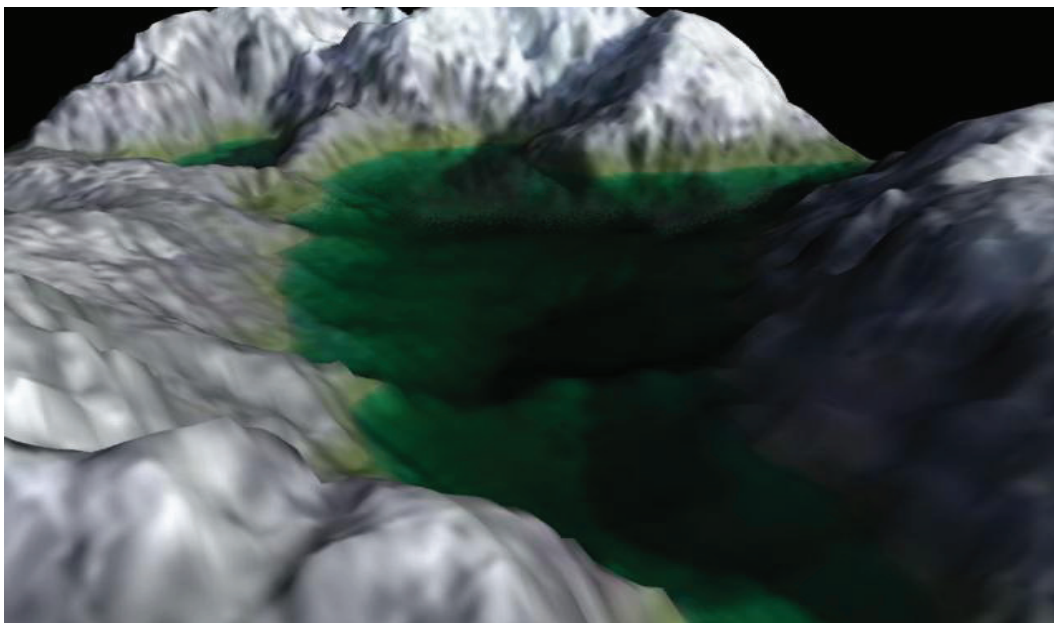


Figura 30: Nevoa submersa exponencial

5.4. Fresnel

A iluminação da água segue um modelo ótico bem definido que segue a lei de Snell. A Figura 31 ilustra esse modelo. Observa-se na figura que o raio incidente é mais espesso que os demais, isso se deve à característica conservativa do modelo, a qual pode ser modificada. Sendo assim, a espessura nessa figura ilustra a energia (radiância) do respectivo raio.

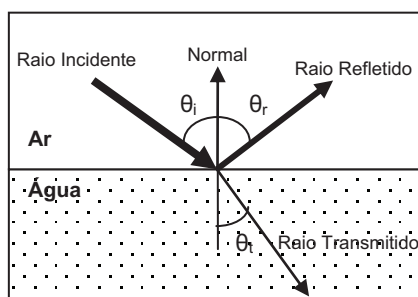


Figura 31: Modelo de Reflexão

O fenômeno da reflexão e refração foi estudado por Augustin-Jean Fresnel (Hecht, 1987). Nesse estudo, Fresnel escreve uma expressão que calcula a probabilidade de um raio ser refletido ou refratado (no caso

o complemento da probabilidade de reflexão). Para a computação gráfica, o termo *Fresnel* é usado para interpolar a cor entre a refração e a reflexão. Sendo a luz não polarizada, que é o caso da luz do sol recebida pelo mar, a expressão do termo é dada por:

$$F_{\lambda} = \frac{1}{2} \frac{(g - c)^2}{(g + c)^2} \left(1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) - 1)^2} \right)$$

Equação 31: Termo de Fresnel

Onde:

$c = \cos(\theta_i) = L \cdot H$, $g^2 = \eta(\lambda) + c^2 - 1$, $H = \frac{L+V}{|L+V|}$, L é o versor da direção da luz, V é o vetor de visão e $\eta(\lambda) = \frac{\eta_t(\lambda)}{\eta_i(\lambda)}$, t é transmitido e i é incidente.

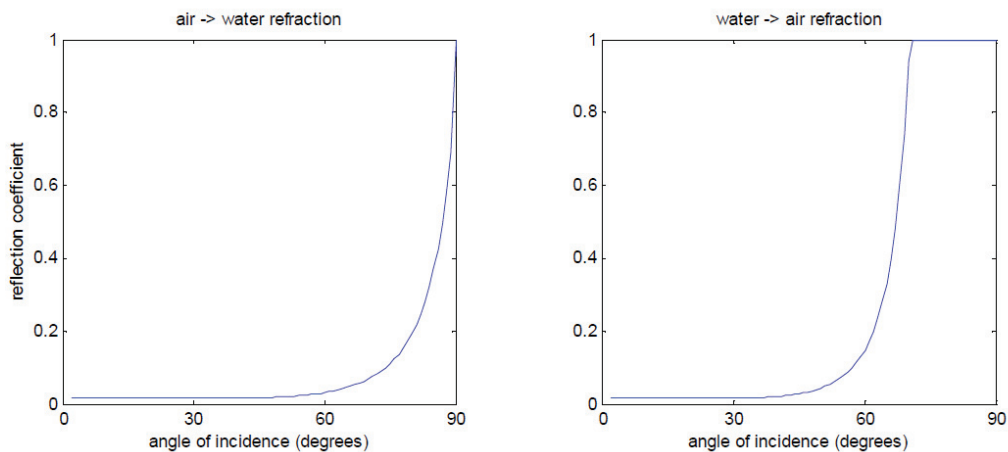


Figura 32: Variação do Coeficiente de Fresnel (Johanson, 2004)

A Figura 32 mostra variação dos coeficientes de refração(F) e reflexão($1-F$) com a variação do ângulo de incidência.

Dois efeitos muito importantes são a reflexão total interna (ângulo crítico) e a refração total (ângulo de Brewster). A Figura 33 ilustra esses efeitos. A refração total só pode ser obtida em luz polarizada, nesse caso, deve-se utilizar um filtro polarizador como na Figura 33.c.



Figura 33: a) Reflexão total, b) Refração e Reflexão Normal, c) Refração Total

Observa-se que a reflexão interna total é muito importante para as cenas subaquáticas.

5.4.1. Técnicas de Implementação

A avaliação da equação é custosa, por isso, existem algumas técnicas de avaliação da mesma. Schlick (1994) propõem uma simplificação para a expressão tal que $F_{\lambda}(c) = \eta(\lambda) + (1 - \eta(\lambda))(1 - c)^5$ tendo erro $\varepsilon = 0.6\%$.

Outra solução é pré-calcular essa expressão em função de c e armazenar em uma textura 1D (Heidrich & Seidel, 1999). Contudo, deve-se usar uma resolução grande, tipicamente 512 ou maior, para evitar *aliasing*.

Além disso, pode-se usar a técnica de *Fresnel Bump Map*, que consiste em uma textura 2D, na qual, assumindo que o vetor normal da superfície aponta para direção vertical positiva (cena sobre a superfície da água), armazena-se a expressão em todas as direções possíveis de visão. Então, para cada *texel* (s,t) computa-se o valor para um vetor de visão normalizado $\vec{v} = (s - 0.5, t - 0.5, \sqrt{(1 - (s - 0.5)^2 - (t - 0.5)^2)})$. A Figura 34 ilustra o procedimento de geração e a textura resultante.

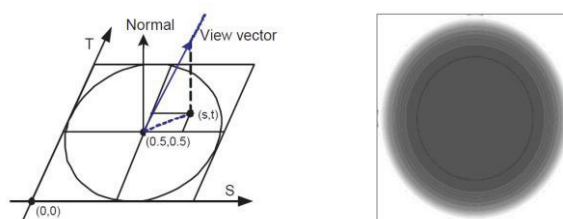


Figura 34: Fresnel Bump Map Texture (Hu et al., 2006)

Dado um ponto no oceano, pode-se calcular o vetor normalizado de visão $V = (x_v, y_v, z_v)$ e, sabendo que a superfície do mar possui vetor normal com componente vertical positiva, usa-se as coordenadas (x_v, z_v) para acessar a textura. No caso da utilização de técnica de *Bump mapping*, é necessário fazer a transformação do vetor de view para o espaço tangente (Tangente, Normal, Binormal).

É essencial notar que caso a cena seja submersa ou não, os vetores de incidência e transmissão serão diferentes e os índices de refração também. Tais índices dependem da ordem dos meios, ou seja, de que meio o raio sai e qual meio o raio entra.

5.4.2. Variação dos índices de refração

Em situações normais de simulação da refração, considera-se o índice de refração como invariante, dessa forma, ele é tratado com uma constante entre dois meios físicos. No entanto, o índice de refração (IR) é dependente, no caso da água e do ar, da temperatura, do comprimento de onda da luz, da concentração de minerais da água e da quantidade de dispersão de partículas no ar (concentração de partículas).

A simulação com todos os detalhes do índice é muitas vezes desnecessária, contudo, a análise do índice por comprimento de onda é bastante importante para a reprodução de vários fenômenos. O arco-íris é um fenômeno gerado por essa diferença dos IRs com o comprimento de onda. A Tabela 8 mostra a diferença dos valores desses índices para a água. Observa-se que há uma pequena diferença.

Tabela 8: Variação dos Índices de Refração

Comprimento de Onda	700 nm (vermelho)	530 nm (verde)	460 nm (azul)
IR a 20 °C	1.33109	1.33605	1.33957

Outro efeito muito comum que exemplifica a variação do índice de refração com a temperatura é a formação de miragens, ou espelhos de ar, como mostra a Figura 35. Na imagem da esquerda a variação ocorre da

temperatura mais alta do ar, que está mais próximo do asfalto, para a mais fria do ar, mais afastado do asfalto. Já na segunda imagem ocorre o processo inverso, do ar próximo da água com temperatura mais baixa para o ar longe da água com temperatura mais elevada. Esses efeitos são muito difíceis de serem reproduzidos computacionalmente, principalmente usando a rasterização. Devido a isso, eles não são implementados neste trabalho.



Figura 35: Efeitos da variação do índice de refração com a temperatura

5.5. Cáusticas

As cáusticas são resultados da refração e reflexão da luz em uma superfície curva, na qual diversos raios luminosos convergem para uma determinada região, causando um aumento da concentração de energia (luz) nessas áreas. A Figura 36 mostra o fenômeno ocorrendo no fundo de uma piscina em dois momentos: o primeiro com a água parada e o segundo com a água em movimento (formação de pequenas ondas). Observa-se que quanto mais ondas geradas menor o padrão da cáustica e maior o número de cáusticas, ou seja, depende da frequência e comprimento de onda das harmônicas.

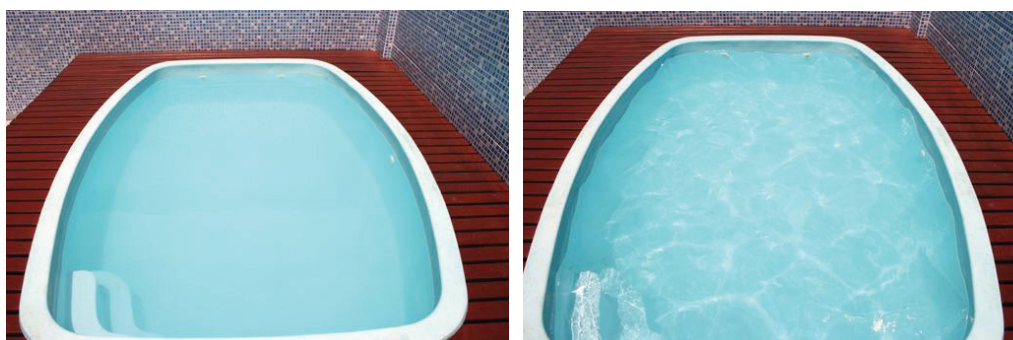


Figura 36: Cáustica no fundo de uma piscina

Muitas formas de geração de cáusticas foram estudadas, algumas que levam em consideração o efeito físico e outras que se preocupam apenas com a visualização do fenômeno.

A computação das cáusticas num processo físico é muito complexo, pois, é necessário a interação de bilhões de fótons na superfície do oceano e o cálculo da refração dos mesmos. A cáustica gerada no fundo do oceano é devido à refração e a gerada em barcos e outros (objetos sobre a água) são devido à reflexão.

Se for considerado que os vetores de incidência, normal e transmissão como co-planares, pode-se escrever o vetor de transmissão de acordo com a fórmula de Foley et al. (1995).

$$T = N \left(\frac{n_1}{n_2} (E \cdot N) \pm \sqrt{1 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 ((E \cdot N)^2 - 1)} \right) + \frac{n_1}{n_2} E$$

Equação 32: Vetor de transmissão

Na Equação 32, T é o vetor de transmissão do raio, N é a normal da superfície, E é o vetor de raio de incidência e n_1, n_2 são índices de refração.

Duas metodologias muito usadas para a simulação desse efeito é o traçado de raios direto e reverso. No modo direto, os fótons são enviados das fontes luminosas e a contribuição de energia de cada um é acumulada nas áreas que eles passam. No entanto, essa forma necessita que muitos fótons sejam enviados, impedindo o seu uso para a abordagem em tempo real.

A metodologia de traçado de raios reversa inicia-se no fundo do oceano voltando o raio e acumulando a contribuição da luz de cada ponto. Numa análise mais precisa, seria necessária a computação da integral

dessa contribuição sobre todo hemisfério ao redor de um ponto, contudo, para fins práticos, utiliza-se uma amostragem via Monte Carlo. Da mesma forma que a técnica direta, essa também é muito custosa.

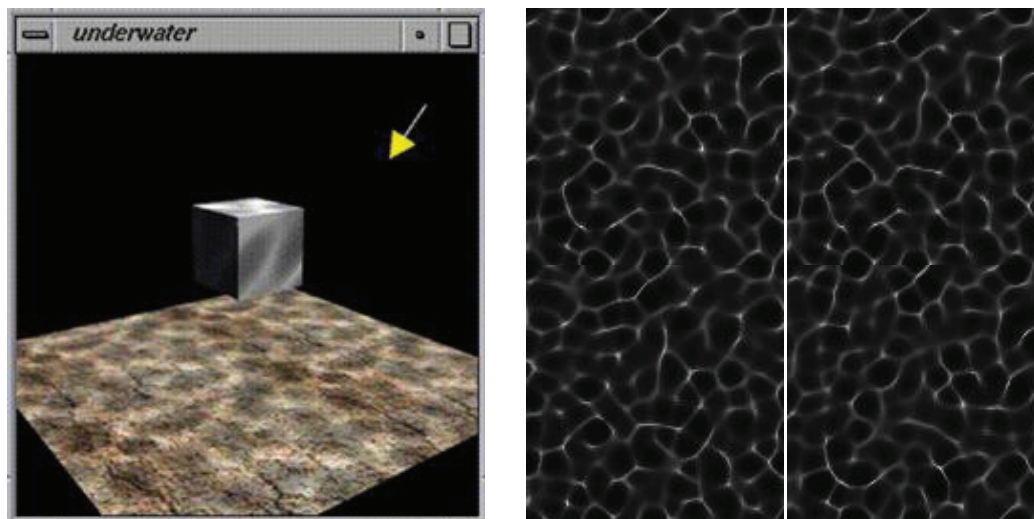


Figura 37: Cáusticas (Jos Starm, 1996)

No contexto da rasterização, Jos Starm (1996) desenvolveu uma técnica (Figura 37) utilizando uma série de texturas animadas de causticas usando a teoria de ondas (Capítulo 4). Essas texturas eram usadas como texturas projetivas e aplicadas nos objetos submersos. No presente trabalho foi desenvolvida essa técnica para a visualização de cáusticas. Observa-se que essa é uma técnica apenas visual, pois não leva o fenômeno físico em consideração, portanto, não conserva a energia total do sistema.

Para finalizar, outra técnica muito utilizada é a proposta por Jensen & Goliás (2001). O trabalho discute simulação de água e baseia-se na transformada de Fourier para a modelagem de ondas. Guardado & Sánchez-Crespo (2004) apresentam uma implementação muito eficiente de geração de cáusticas na GPU.

5.6. Espuma

Um efeito comum nas ondas oceânicas é a aparição de espuma devido ao vento nas cristas dessas. A simulação física mais precisa desse efeito

necessita do uso de um sistema de partículas para a emissão das partículas formadoras da espuma. Contudo, pode-se adotar uma solução mais simples de mapeamento de textura.

Utilizando uma textura de espuma, cada fragmento gerado pela superfície do oceano irá receber a contribuição dessa textura de acordo com sua amplitude e a velocidade do vento. Uma forma de calcular esse fator de contribuição é dada por:

$$\alpha_{FOAM}(P, V, N) = \left(\frac{P \cdot y - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \right)^{spread} \frac{V \cdot N}{|V|}$$

Equação 33: Contribuição de Espuma nas ondas

Onde P é a posição do fragmento, V é vetor velocidade do vento (e, portanto, a direção também), N é a normal do fragmento, H_{max} é a altura máxima dos pontos do oceano, H_{min} é a altura mínima dos pontos do oceano e *spread* é o coeficiente de espalhamento da espuma. A fórmula foi deduzida baseando-se na contribuição especular proposta por Phong (1975), dessa forma, o coeficiente de espalhamento atua exatamente igual ao expoente do modelo de iluminação de Phong. O produto interno $V \cdot N$ apenas assegura que a contribuição seja maior quanto mais perpendicular for à interação da orientação do fragmento da cristal com o vento.

5.7. Deformação subaquática

Imagens geradas debaixo d'água podem sofrer deformações devido ao movimento de correntes de água. Esses casos são muito complexos para serem simulados, além disso, é necessário um modelo hidrodinâmico para uma simulação mais realística. A Figura 38.a mostra um exemplo desse efeito.

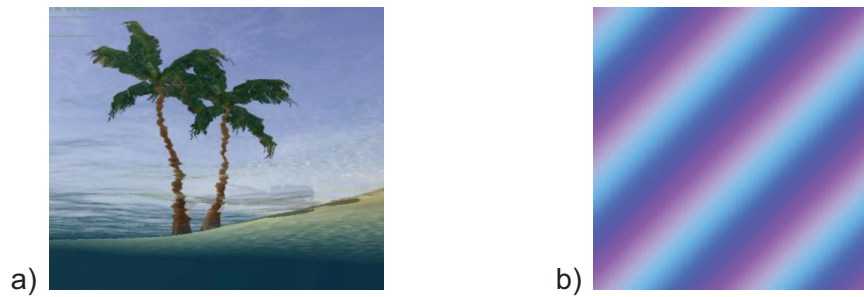


Figura 38: Deformação subaquática

A simulação visual desse efeito pode ser realizada utilizando um mapa de normal e aplicando-o na composição dos mapas de refração e de reflexão debaixo d'água. A Figura 38.b mostra uma textura típica desse efeito. Essa textura precisa ser repetível (*tileable*) e movimentada de acordo com uma regra qualquer, por exemplo, linearmente. Assim, temos: $texel(u, v) = texel(u + V_u t, v + V_v t)$, onde t é o tempo V_u e V_v são as velocidades de deslocamento em u e v , respectivamente.

Terminada a apresentação dos processos de simulação, iluminação e gerência de detalhes, pode-se iniciar o a análise do desenvolvimento do sistema de computação para a simulação desses efeitos.