

Variação Dinâmica do Nível de Detalhe na Simulação Estável de Tecidos

Fernando Pedro Birra

Manuel Próspero dos Santos

Departamento de Informática
Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa
Quinta da Torre, 2825-114 Caparica
{ fpb, ps }@di.fct.unl.pt

Sumário

A simulação de tecidos virtuais é um processo que requer um significativo poder computacional. De modo a manter uma velocidade de simulação aceitável sacrifica-se o detalhe. Neste artigo propomos uma técnica de gestão dinâmica do nível de discretização do tecido onde a qualidade das sucessivas malhas obtidas por subdivisão/simplificação é garantida pelo esquema de subdivisão escolhido. A topologia da malha por nós usada exhibe algumas características únicas que a tornam atraente no contexto da variação gradual do nível de detalhe. A subdivisão é accionada segundo um critério geométrico, avaliado localmente, tendo como base a presumível curvatura do tecido. A simplificação é despoletada nas regiões do tecido onde a curvatura é suficientemente reduzida. A escolha do método de subdivisão não deverá causar perturbações bruscas no plano do tecido em direcções perpendiculares a este. No entanto, a redução do nível de detalhe produz inevitáveis alterações geométricas instantâneas que provocam descontinuidades ao nível das equações diferenciais usadas no modelo do tecido. Este artigo contribui, de forma original, com um conjunto de técnicas que permitem resolver os problemas de instabilidade numérica que advêm da simplificação da malha.

Palavras-chave

Sistemas de partículas, simulação, modelação de tecidos, nível de detalhe.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de partículas são a ferramenta de modelação mais frequente na modelação de tecidos virtuais. O tecido é modelado como um conjunto de partículas com massa, sobre as quais actua um conjunto de forças. Essas forças tanto surgem como resultado de interacções internas ao tecido (curvatura, elasticidade e distorção) ou como acção externa: gravidade, interacção com o utilizador ou resposta a colisões. As forças internas do tecido são modeladas ligando conjuntos de partículas entre si. A evolução do sistema é efectuada resolvendo o sistema de equações diferenciais ordinárias cuja solução traduz o movimento de cada partícula do sistema.

A resolução do sistema de equações diferenciais é um processo que requer um significativo poder computacional, podendo ter que se avaliar o modelo do tecido várias vezes por cada passo de simulação.

Os métodos de subdivisão e simplificação adaptativas podem permitir a simulação realista de tecidos, com grande nível de detalhe, usando criteriosamente o poder computacional disponível. Uma vez que o detalhe é introduzido apenas onde é mais necessário, os resultados poderão ser equivalentes aos obtidos quando se utiliza uma malha muito detalhada, visto o detalhe nas zonas menos curvas ser perfeitamente dispensável.

Neste artigo propomos um método de animação baseado num modelo contínuo do tecido, acoplado com um esquema de subdivisão e simplificação adaptativas que preserva a qualidade da malha durante toda a simulação. O esquema de subdivisão utilizado é um dos que permite uma variação mais gradual no número de elementos (triângulos) e vértices da malha. Devido à sua simplicidade permite ainda uma implementação muito eficiente e compacta.

2. TRABALHO RELACIONADO

Alguns trabalhos iniciais na simulação de tecidos, recorrendo a sistemas de partículas [Breen92, Breen94], usavam técnicas de minimização da energia total do sistema para encontrar configurações estáveis para o drapejado dos tecidos. As funções de energia tentavam modelar a mecânica interna do tecido e eram definidas relacionando partículas de um determinado arranjo, entre si. Na primeira fase da simulação deixava-se cair o tecido e determinavam-se os pontos de contacto com os obstáculos. Na segunda fase minimizava-se a energia total do sistema corrigindo as posições obtidas na primeira fase.

Posteriormente, com vista a conseguir-se simular a dinâmica dos tecidos, assistiu-se à proliferação de modelos mecânicos que permitiam simular o movimento das partículas, recorrendo à resolução de

sistemas de equações diferenciais. Aqui podem-se categorizar os modelos mecânicos dos tecidos em contínuos ou discretos. Exemplos de modelos discretos incluem os conhecidos sistemas mola-massa [Provot95] ou sistemas baseados em equações de energia semelhantes às definidas em [Breen92], mas de onde se derivavam as equações diferenciais do movimento [Eberhardt96]. As técnicas de integração usadas eram, geralmente, baseadas em métodos de integração explícitos, tais como o método de Euler ou de Runge-Kutta.

Em relação aos modelos físicos onde o tecido é tratado com um contínuo encontramos exemplos orientados por preocupações distintas. Por um lado, o trabalho de Baraff e Witkin [Baraff98] tem como preocupação a estabilidade da simulação, usando para isso um método de integração implícita onde a precisão é sacrificada pela estabilidade. O comportamento do tecido é definido formulando um vector condição que se pretende que seja nulo. Sobre este vector condição são definidas funções de energia assim como, por derivação destas, as forças que actuam no sistema. Grande parte da originalidade do método advém de os autores terem conseguido resolver o sistema de equações resultante da técnica de integração, que é muito esparso, usando um método que, simultaneamente, permite garantir que um conjunto de restrições sobre as partículas é satisfeito em cada passo. Por outro lado, o trabalho de Dias et al. [Dias00] tem como preocupação simular conhecidos comportamentos mecânicos dos tecidos, sendo uma das características deste trabalho a incorporação no modelo de dados experimentais obtidos por medições mecânicas directas.

Todos estes trabalhos usam malhas com uma divisão regular, quer seja sob a forma de quadriláteros ou sob a forma de triângulos.

A primeira tentativa de usar o refinamento de forma adaptativa, sobre uma malha rectilínea regular, foi efectuada por Hutchinson et al. [Hutchinson96]. O modelo massa-mola introduzido em [Provot95] foi usado na simulação. Cada vez que era detectado um ângulo, entre duas molas consecutivas que fosse superior a um determinado valor limiar, os 4 quadriláteros da vizinhança eram subdivididos, dando lugar a 16 no total. Os resultados relatados não eram muito satisfatórios e o tempo computacional era enorme. Por outro lado, quando o detalhe já não fosse necessário a malha não era simplificada.

Zhang et al. [Zhang01] inspiraram-se também no modelo de Provot e apresentaram um método de subdivisão regular. A malha inicial, é uma malha regular de triângulos com baixa resolução. O drapejado do tecido é simulado até a malha atingir um ponto de equilíbrio. Nessa altura a malha é refinada de forma regular. Cada triângulo produz quatro novos triângulos, mesmo onde o detalhe não é necessário. O processo repete-se durante diversos níveis de subdivisão. Apesar da ineficiência da subdivisão regular, os autores alegam uma poupança, em termos computacionais, da ordem de

2.5:1 quando em comparação directa com a malha refinada no maior nível de detalhe. O método, infelizmente, apenas pode ser usado para refinar o tecido no final da simulação.

Num trabalho recente, Villard et al. [Villard02] partiram também do modelo de mola-massa de Provot, mas corrigiram o termo responsável pelas forças de curvatura, formulado de forma errada no trabalho original de Provot. A malha, formada por uma grelha regular de partículas, é subdividida, durante a simulação, usando um critério local puramente geométrico. A curvatura é estimada num vértice da malha medindo o maior desvio das normais dos triângulos que partilham esse vértice, em relação à normal do vértice (calculada por soma de todas as normais dos triângulos circundantes). Cada passo de subdivisão divide cada um dos 4 quadriláteros à volta do vértice seleccionado em 4 novos elementos. Desta forma, cada passo multiplica o número de faces por 4 e o número de vértices, se ignorarmos o vértice que causou a subdivisão, é duplicado. Os novos vértices são ainda classificados em nós activos e nós virtuais. Esta divisão em dois conjuntos distintos de nós visa resolver o problema da subdivisão escolhida gerar malhas que não respeitam a topologia inicial. As forças aplicadas aos nós virtuais são distribuídas pelos nós activos da vizinhança. A resolução do sistema de equações que traduz a dinâmica do tecido é efectuada usando um passo de Euler explícito requerendo, por isso, passos de simulação muito pequenos. Infelizmente, a simplificação dinâmica da malha é relegada para trabalho futuro.

Outros autores [Howlett98, DeRose98, Etmuss00] usaram também técnicas onde novos vértices são introduzidos na malha, mas que não contribuem para o realismo da simulação. Esses novos vértices não são usados na simulação e são calculados de forma puramente geométrica.

Volkov e Ling [Volkov02] abordam, também, o problema do refinamento e simplificação adaptativos de malhas de tecidos. No seu trabalho são usadas malhas de triângulos e o sistema é simulado usando a técnica descrita em [Baraff98]. O sistema monitoriza a curvatura do tecido em cada aresta e decide proceder à subdivisão quando o erro da aproximação poligonal da malha é superior a um patamar escolhido. O processo inverso, da simplificação, é efectuada quando se considera que uma malha com menos elementos é suficiente. A técnica de subdivisão escolhida é a descrita em [Kobbelt00] e denomina-se por subdivisão $\sqrt{3}$. Infelizmente, os autores não explicam quais as vantagens do método de subdivisão escolhido, no contexto da sua aplicação específica, à simulação de tecidos. Os resultados apresentados pelos autores não fazem qualquer referência aos problemas de descontinuidade, e conseqüente instabilidade, que as operações de subdivisão e simplificação daquela técnica causam quando aplicadas a malhas representando tecidos.

Outras estratégias de refinamento são apresentadas em [Bridson02, Hadap99]. A subdivisão é totalmente desacoplada da simulação, sendo efectuada como um passo de pós-processamento depois de a simulação ter sido efectuada com uma malha menos detalhada. O objectivo é o de obter, recorrendo à interpolação, superfícies que, no final, se assemelham a tecidos reais..

3. SUBDIVISÃO HIERÁRQUICA DE MALHAS 4-8 REGULARES

As malhas por nós escolhidas denominam-se malhas 4-8 regulares¹ e são um caso particular das malhas 4- k [Velho00].

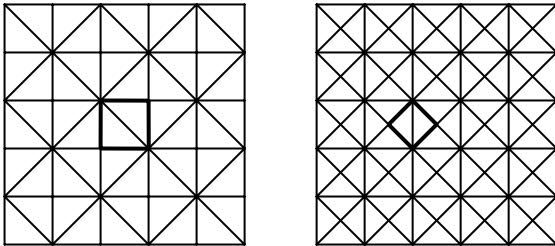


Figura 1 - Duas malhas 4-8 regulares

A topologia, duplamente ilustrada pela Figura 1, pode-se caracterizar da seguinte forma:

- A malha é formada por quadriláteros, sendo cada um destes dividido por uma diagonal dando origem a dois triângulos.
- O grau dos vértices interiores da malha é 4 ou 8.
- A vizinhança-1 de cada vértice de grau 4 é formada apenas por vértices de grau 8
- A vizinhança-1 de cada vértice de grau 8 forma um anel de vértices com graus alternados de 4 e 8.

Apesar de, à primeira vista, a topologia parecer demasiado limitativa, qualquer malha de triângulos pode ser previamente transformada numa malha regular 4-8 através de pré-processamento. Em [Velho01] é descrito um algoritmo para o efeito.

Na Figura 1, a malha do lado direito pode ser obtida subdividindo de forma uniforme a malha do lado esquerdo. É ainda visível, a traço grosso, o bloco fundamental (*prototile*) do esquema de subdivisão usado. Este é composto por um arranjo de dois triângulos partilhando uma aresta.

A operação elementar de refinamento, exemplificada na Figura 2, é a bissecção da aresta interior ao bloco, e é traduzida nos seguintes passos:

1. A aresta interna do bloco é dividida em duas, por inserção de um novo vértice v .
2. Cada uma das faces é dividida em duas, unindo o novo vértice v aos vértices opostos, w e e , das faces iniciais.

¹ O termo regular é aqui usado num sentido lato, uma vez que existe mais do que um tipo de grau ou valência dos vértices.

A vantagem da aplicação desta operação a uma malha conforme, ao contrário de outras operações tais como a divisão de um triângulo em 4 (*face split*), é que a malha resultante continua a ser conforme, ou seja, sem *cracks* (buracos).

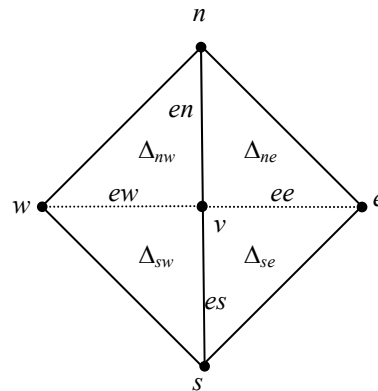


Figura 2 - Bissecção da aresta interna ao bloco

No lado esquerdo da Figura 3 mostra-se o resultado de uma subdivisão aplicada duas vezes, de forma uniforme, à malha representada pelo traço mais grosso. Os vértices a negro resultam do primeiro passo de refinamento e os cinzentos do segundo. O lado direito mostra a hierarquia que o processo de subdivisão vai criando nos triângulos subdivididos.

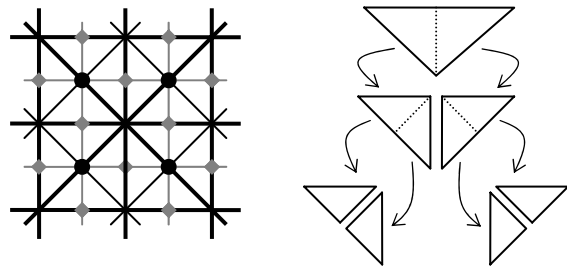


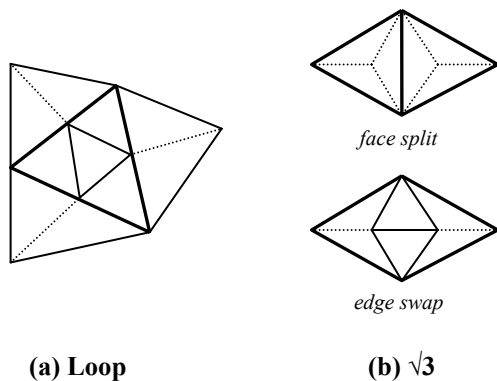
Figura 3 – Dois níveis de subdivisão e correspondente hierarquia para um elemento da malha original

4. VANTAGENS DA SUBDIVISÃO 4-8.

No contexto da aplicação à simulação de tecidos virtuais, o que mais interessa num esquema de subdivisão adaptativa é a capacidade de se refinar a malha e poder voltar-se a simplificá-la, sem introduzir discontinuidades nas equações que regem a simulação. Parece óbvia a inevitabilidade da simplificação produzir essas discontinuidades geométricas, que se transmitirão directamente à avaliação do modelo do tecido. No entanto, mesmo o processo de refinamento pode gerar tais problemas, como se verá de seguida.

Talvez o método de subdivisão mais comum, quando lidamos com malhas de triângulos, seja o método de subdivisão de 1-para-4 de Loop [Loop87]. Cada aresta é

dividida em duas e os novos vértices são ligados entre si, produzindo um triângulo central e três outros junto dos vértices iniciais. Este método, quando aplicado de forma não uniforme, tem o problema de gerar *cracks* na malha, que poderá ser resolvido, como se ilustra na Figura 4(a), dividindo em dois os triângulos circundantes.



(a) Loop **(b) $\sqrt{3}$**

Figura 4 - Outros métodos de subdivisão

Uma desvantagem evidente é a necessidade de distinguir entre os triângulos regulares e os irregulares (separados entre si, na Figura 4(a), pelas linhas a ponteadas). Os triângulos regulares participam da hierarquia, podendo ser subdivididos mais tarde, o mesmo não acontecendo com os triângulos irregulares, que apenas existem para evitar o aparecimento de buracos na malha. Os triângulos irregulares, caso fossem subdivididos, fariam com que a malha degenerasse. Eles são, posteriormente, descartados, sendo substituídos por triângulos regulares quando a subdivisão for efectuada no triângulo (regular) que os contém.

No caso da subdivisão $\sqrt{3}$, para além de existirem igualmente dois tipos de triângulos – regulares e irregulares, a geometria também pode sofrer perturbações modificando, localmente, o plano da malha. Estas alterações ocorrem na etapa designada por *edge swap*, que visa a transformação de triângulos irregulares adjacentes em triângulos regulares, como se mostra na Figura 4(b).

No decorrer do nosso trabalho, descobrimos que a maior causa de instabilidade, introduzida pela utilização de um método de subdivisão adaptativa, resulta das perturbações instantâneas da malha que se traduzam em deslocamentos da geometria inicial em direcções normais ao plano do tecido. O fenómeno pode ser observado por um enrugamento (ou encarquilhar) artificial e instantâneo, como resultado da modificação da topologia da malha num determinado local.

Quando as alterações na malha produzem uma variação instantânea na orientação dos triângulos, o resultado é geralmente catastrófico. As forças estruturais que contrariam o alongamento do tecido sofrem, neste caso, uma mudança brusca, não apenas em módulo mas também, e essencialmente, na sua direcção. Ora estas mudanças não são acompanhadas pela evolução das

suas derivadas, usadas na integração numérica do sistema. Apenas referimos as forças de elasticidade porque são as de maior intensidade e as que causam a maior parte dos comportamentos caóticos nas simulações onde o processo de integração numérica entra em divergência.

Não podemos afirmar, taxativamente, que este fenómeno proíbe a utilização de esquemas de subdivisão onde a orientação dos triângulos pode variar bruscamente, no decorrer de uma operação elementar de refinamento ou subdivisão. Podemos, contudo, afirmar que, na ausência de medidas adicionais que resolvam ou atenuem o problema, as quais não vimos ainda referidas na literatura, tais esquemas de subdivisão se tornam impraticáveis na simulação de tecidos. Mesmo que se consiga evitar a divergência na integração numérica, as oscilações causadas na malha não serão facilmente disfarçadas.

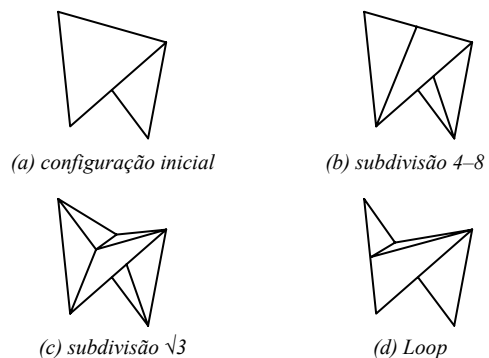


Figure 5 - Subdivisão de dois triângulos por diferentes métodos

Uma das grandes vantagens da subdivisão hierárquica 4–8 é a sua simplicidade, facto que a torna uma das técnicas de subdivisão mais eficientes. Outras características importantes, enumeradas em [Velho00] são: o grande poder de expressividade, a profundidade logarítmica (*logarithmic depth*) e o crescimento linear.

Na Figura 5 pode-se ver as diferenças entre as diversas técnicas de subdivisão. O exemplo refere-se à subdivisão de dois triângulos que partilham uma aresta. No caso da subdivisão de Loop, a situação apenas ocorre quando dois triângulos irregulares necessitam ser convertidos em 4 regulares. Como se pode observar, apenas a subdivisão 4–8 produz triângulos cujas orientações são consistentes com a situação de partida, pois os triângulos gerados estão situados no mesmo plano que os triângulos originais.

A subdivisão 4–8 permite ainda uma transição mais gradual e fina entre as sucessivas malhas, visto o número de partículas e triângulos gerados, em cada caso, ser inferior ao das outras duas técnicas. No caso da subdivisão $\sqrt{3}$, por cada passo de subdivisão uniforme é triplicado o número de faces e por cada triângulo da malha original é gerado um novo vértice. No caso da subdivisão de Loop, o factor de crescimento das faces é ainda maior, sendo criados 4 novos triângulos por cada

triângulo inicial. Estes valores são, em ambos os casos, superiores aos da subdivisão 4–8, onde o número de faces é multiplicado por 2 e o número de vértices adicionais é de 1 por cada dois triângulos.

5. TÉCNICA PROPOSTA

Em primeiro lugar, convém referir alguns detalhes de implementação que se prendem com o modelo do tecido usado, assim como a técnica de integração que faz avançar a simulação.

O nosso trabalho tem como ponto de partida o modelo de tecidos proposto por Baraff e Witkin [Baraff98]. O passo de integração é o passo de Euler implícito, que necessita resolver um sistema de equações esparso. As estruturas de dados programadas foram optimizadas para operarem com matrizes esparsas e o produto de uma matriz esparsa por um vector tem complexidade linear no número de elementos da matriz.

O objectivo principal da utilização do refinamento e redução adaptativos é o de permitir introduzir detalhe onde ele é estritamente necessário, evitando assim gastar tempo de CPU na simulação de zonas do tecido onde uma aproximação poligonal menos rica seria suficiente. No caso da simulação de tecidos, os fenómenos que conferem maior realismo à simulação e que necessitam, simultaneamente, de maior detalhe são os que estão relacionados com a curvatura. As propriedades de elasticidade e de distorção, uma vez que são fenómenos que ocorrem no plano da malha, conseguem-se simular com recurso a malhas pouco discretizadas. Sendo assim, parece natural que o critério que orienta a subdivisão seja baseado na curvatura do tecido. Uma vez que se pretende um processo de subdivisão adaptativa eficiente, esse mesmo critério terá de ser avaliado localmente.

5.1. Critério de refinamento e redução

O estimador de erro por nós usado mede a distância da superfície poligonal da malha a uma superfície curva, idealizada, que aproxima, localmente, a curvatura do tecido virtual. Para cada par de triângulos, partilhando uma aresta, avalia-se a distância dos vértices opostos à aresta de junção e calcula-se a sua média, L . De seguida, o par de triângulos é aproximado por dois triângulos iguais cujos vértices opostos à aresta comum distam desta o mesmo valor L . A curvatura estimada é a de uma circunferência que passa nesses dois vértices e no ponto médio da aresta. A Figura 6 ilustra o que se acabou de referir. Recorrendo à trigonometria, o valor estimado do desvio da malha, em relação à superfície do tecido, é dado por

$$d = \frac{L(1 - \cos(\theta/2))}{2 \sin(\theta/2)}$$

onde θ é o ângulo formado pelas duas normais aos triângulos considerados.

A cada passo da simulação, as arestas partilhadas são analisadas e, sempre que o estimador ultrapasse um determinado limiar máximo, a subdivisão dessa aresta é accionada. O critério para a simplificação, como

operação inversa, é semelhante, mas seleccionando agora, para possível remoção, apenas as arestas para as quais o valor do estimador é inferior a um valor limiar mínimo. Na realidade, porém, a experiência mostrou que o processo não pode ser assim tão simples e veremos adiante as razões de tal facto, assim como a solução que preconizamos.

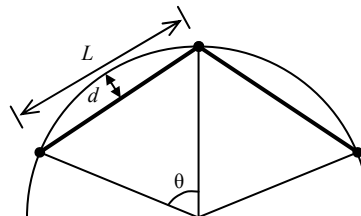


Figura 6 - Estimador da curvatura do tecido na junção de dois triângulos

Em [Volkov02] é usado o mesmo estimador do erro da aproximação poligonal à superfície do tecido, enquanto que em [Villard02] se preferiu estimar o erro nos vértices, analisando o maior dos desvios entre a normal no vértice – obtida ponderando as normais dos triângulos vizinhos – e as normais desses mesmos triângulos.

5.2. Algoritmo de subdivisão adaptativa

De um modo geral, os esquemas de subdivisão de malhas decompõem-se em dois tipos de regras:

- *Face rules* – determinam a localização dos novos vértices.
- *Vertex rules* – determinam as novas localizações dos vértices, já existentes, envolvidos na subdivisão.

Na transposição dos esquemas de subdivisão para a simulação de tecidos, pensamos que apenas o primeiro tipo de regras deverá ser usado. Com efeito, a aplicação das *vertex rules* provocaria mudanças instantâneas nas posições das partículas e nas orientações dos triângulos, facto que pretendemos evitar a todo o custo. Para além do mais, a eficiência é uma preocupação constante na simulação de tecidos, pelo que, ao deixar cair o segundo tipo de regras, estamos a melhorar o desempenho global da técnica.

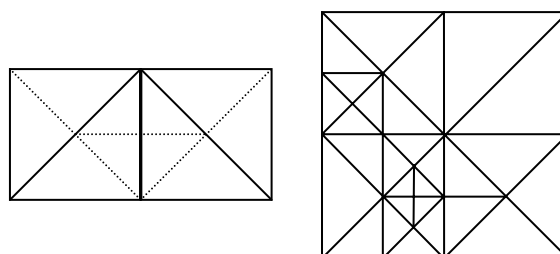


Figura 7 - Exemplos de subdivisão de uma aresta exterior a um bloco e de uma subdivisão não uniforme

Na subdivisão adaptativa de malhas 4–8, sempre que uma aresta desencadeia um processo de subdivisão é

necessário ter em conta se se trata de uma aresta interna ao bloco protótipo (Figura 2) ou se é uma aresta fronteira. No caso de se tratar de uma aresta exterior ao bloco, será necessário refinar, em primeiro lugar, cada um dos blocos adjacentes a essa aresta exterior. A situação encontra-se representada na Figura 7, assim como um exemplo da subdivisão adaptativa.

Existe ainda uma outra situação que é necessário precaver e que se manifesta quando a aresta que determina o refinamento une dois blocos de diferentes níveis de detalhe. Contudo, o nível de detalhe apenas poderá diferir de uma unidade, pelo que bastará subdividir recursivamente o bloco de nível inferior antes de se prosseguir. Eis o nosso algoritmo recursivo de subdivisão, apresentado em pseudo-código:

Subdivide48(Edge h)

begin

if *h.splited* **then return**

if *h.left.level = max_level* **return**

le = BreakingEdge(h.left)

re = BreakingEdge(h.right)

if *h.left.level < h.right.level* **then**

Subdivide48(le)

else if *h.right.level < h.level.right* **then**

Subdivide48(re)

// Criar os 4 novos triângulos nw, sw, ne e se

// situados nas direcções cardeais secundárias

// assim como as novas arestas en, es, ew, ee

// nas direcções cardeais principais

nw.level=sw.level=ne.level=se.level=h.left.level+1

if *h.type = internal* **then**

edge_type = external

else *edge_type = internal*

en.type=ee.type=es.type=ew.type=edge_type

return

end

Acrescente-se que a função *BreakingEdge* procura a aresta de um triângulo que está marcada como *internal*. A versão implementada é ligeiramente mais complexa que a apresentada, porque é ainda necessário tratar dos casos em que a subdivisão actua sobre uma aresta situada num bordo da malha. Nesse caso, apenas o campo *left* da aresta estará preenchido.

O processo de simplificação opera de forma inversa. Porém, apenas são consideradas as arestas que tiverem resultado de um processo de subdivisão anterior, sendo as outras dispensadas de testes futuros.

5.3. Estruturas Hierárquicas e gestão da memória

Como em todos os algoritmos hierárquicos de refinamento adaptativo, é necessário guardar a hierarquia de triângulos, exemplificada na Figura 3. No nosso simulador, cada uma das arestas *ew* e *ee* contém um apontador para um triplo formado pela aresta inicial *h* e pelas próprias arestas *ew* e *ee* (ver Figura 2). Note-se que, na nossa implementação, a informação acerca das

arestas *en* e *es* é recuperada seguindo as ligações das arestas para os triângulos adjacentes a elas. Esta opção permite poupar alguma memória e, das experiências efectuadas, a performance não sai demasiado penalizada pelas indirectões adicionais. Refira-se que a estrutura de dados que codifica a hierarquia não é, na realidade, uma árvore, mas sim uma floresta, existindo várias raízes. Outra característica interessante é que a hierarquia de níveis de detalhe não permite efectuar percursos da raiz até às folhas, o que não é necessário, mas sim no sentido inverso, das folhas para a raiz.

Na estratégia de gestão de memória do nosso simulador as operações de subdivisão são penalizadas face às operações de simplificação. Em cada momento, estão presentes, em memória, todos os triângulos (e demais objectos, tais como as arestas) necessários para representar a malha no seu nível de detalhe actual. Para além deles, também os triângulos de níveis superiores (na hierarquia) continuam em memória, apesar de não estarem a ser usados na simulação. Quando ocorre uma simplificação num determinado local da malha, os triângulos a eliminar da malha são destruídos e os do nível acima são reactivados. Este processo de reactivação permite que a simplificação seja uma operação bastante eficiente.

5.4. Simplificação estável da malha

A nossa escolha do método de subdivisão 4-8 elimina a maior parte das causas de instabilidade da simulação, durante os processos de refinamento e de redução da malha. A causa do temido comportamento caótico do tecido modelado é, na maior parte das vezes, originada por alterações instantâneas na geometria da malha que não são suportadas pelas equações que regem e descrevem o comportamento dinâmico do modelo.

Apesar de tudo, subsiste ainda o problema das operações de redução (ou simplificação) da malha. Aqui é impossível evitar a descontinuidade, porque o único cenário que o permitiria fazer seria o de ter os dois triângulos, aí em causa, num arranjo coplanar e a efectuarem um movimento solidário entre si.

A nossa primeira tentativa foi proceder à simplificação assim que o erro estimado da aproximação da malha ao tecido fosse inferior ao valor limiar estipulado. Mas este método simples revelou-se catastrófico. Uma análise mais cuidada à situação mostra que não bastará que os dois triângulos a fundir estejam praticamente coplanares. É também necessário saber se o arranjo é estável ou se é meramente transitório. O vector condição $C(\mathbf{x})$, proposto em [Baraff98] e usado para modelar as forças que contrariam a curvatura do tecido é definido, para cada par de triângulos, como sendo o ângulo θ que as normais dos dois triângulos fazem entre si (ver Figura 8).

Numa situação em que o ângulo permanece estável, então a derivada do vector condição, $\partial C(\mathbf{x})/\partial \mathbf{x}$, deverá ser nula. Neste caso, a condição C depende apenas das posições das 4 partículas envolvidas (\mathbf{x}_i , \mathbf{x}_j , \mathbf{x}_k e \mathbf{x}_l), pelo que a sua derivada será obtida pelo vector de gradientes:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = (\partial C / \partial x_i \quad \partial C / \partial x_j \quad \partial C / \partial x_k \quad \partial C / \partial x_l)$$

Felizmente, estes gradientes já necessitavam ser avaliados no decorrer da simulação [Baraff98], pelo que a penalização introduzida por este critério de estabilidade é quase nula. Assim, em vez de verificarmos se os gradientes são vectores nulos, verificamos simplesmente se os seus módulos se encontram abaixo de um valor limiar muito pequeno. Desta forma, a quase totalidade dos problemas de instabilidade, que verificávamos durante a simplificação da malha, ficaram resolvidos com este teste adicional.

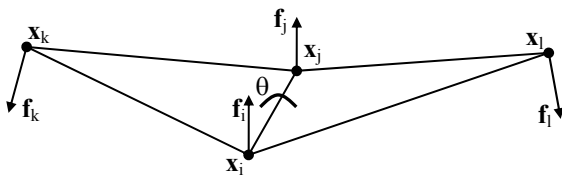


Figura 8 - Condição de curvatura

Outro dos problemas detectados foi a possibilidade de a gestão dinâmica do detalhe gerar ciclos apertados de subdivisão e simplificação. Embora estes ciclos sejam, na sua maior parte, transitórios, causam instabilidade, um efeito visual perturbador e gasta-se tempo de CPU desnecessariamente. A estratégia que decidimos implementar impede que o fenómeno possa ter uma alta frequência e traduz-se numa espécie de amortecimento da evolução da malha. Cada triângulo terá que existir por um período mínimo, parametrizável. Esta técnica simples impede que os triângulos gerados numa determinada altura da simulação possam, muito pouco tempo depois, ser destruídos devido ao processo de redução da malha. Note-se que com esta estratégia não impedimos que esses mesmos triângulos sejam subdivididos ainda mais. Esta característica revelou-se fundamental para que a subdivisão se possa adaptar, com rapidez, às variações de curvatura durante a simulação.

5.5. Manutenção das características físicas da malha

Ao contrário do que se verifica com os modelos de tecidos baseados em arranjos mola-massa [Villard02, Zhang02], uma das grandes vantagens do modelo contínuo, por nós utilizado, é a de não haver qualquer necessidade de ir ajustando, ao longo da simulação, as grandezas físicas que descrevem as características do tecido, tais como as constantes de elasticidade, distorção e curvatura.

Não basta, no entanto, calcular as novas propriedades da partícula gerada a cada passo da subdivisão. Se por um lado a sua posição de repouso é trivialmente calculada por interpolação das coordenadas (u,v), no espaço do tecido, das duas partículas situadas nos extremos da aresta subdividida, o cálculo da massa não se limita à

nova partícula gerada, sendo necessário proceder a uma distribuição de massas conforme se verá de seguida.

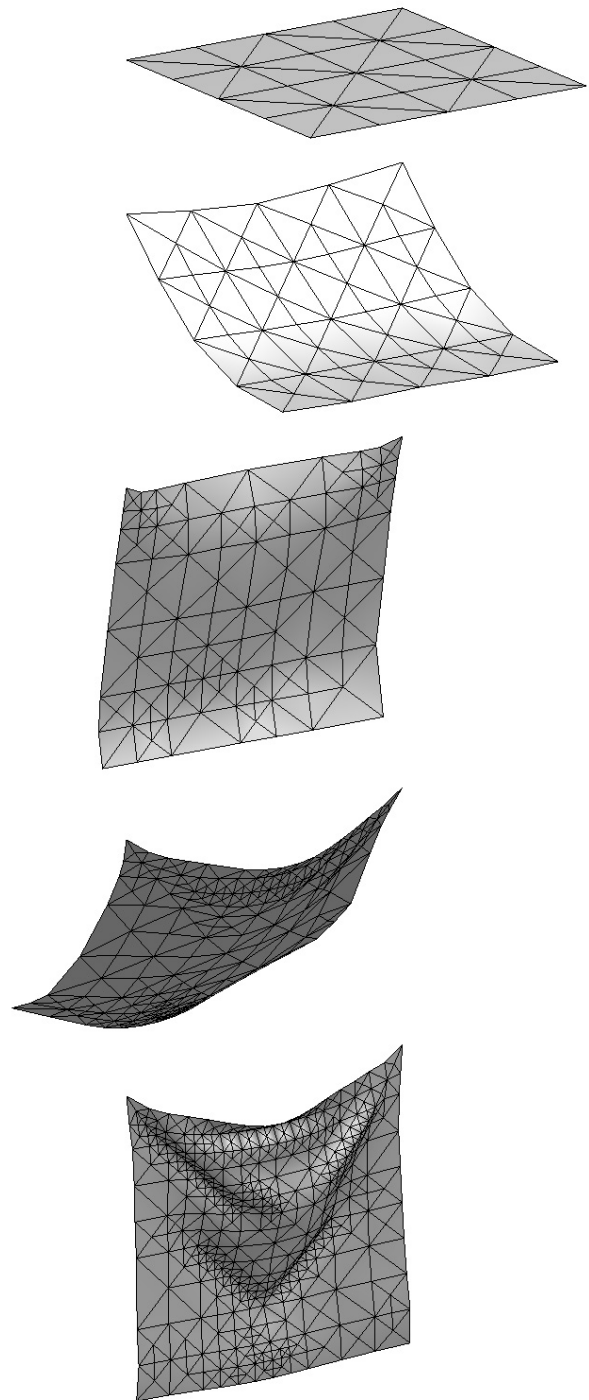


Figura 9 - Tecido em queda livre, suspenso em dois pontos

Durante a subdivisão da malha, a massa total do tecido terá de permanecer constante. No nosso caso, a massa de cada elemento é calculada multiplicando a sua área pela densidade do tecido (uma constante da simulação). A massa é então distribuída pelas três partículas que servem de suporte ao triângulo. Durante o processo de subdivisão e simplificação a massa é calculada de forma incremental. Na primeira fase, cada triângulo a remover

“liberta” o seu peso das partículas que o suportavam. Os novos triângulos efectuam o processo inverso, distribuindo, como indicado anteriormente, o seu peso pelas três partículas situadas em cada um dos seus vértices.

A distribuição final de massas assim obtida não é uniforme e, apesar de em [Volkov02] se apontar este fenómeno como causa de alguns artefactos durante a simulação, nomeadamente a deformação do tecido durante uma queda livre, as nossas experiências não confirmaram a existência de tais problemas.

6. RESULTADOS

A Figura 9 mostra vários passos de uma experiência, realizada partindo de um tecido, uniformemente dividido, formado por 25 partículas e 32 triângulos, e limitando a subdivisão a 6 níveis de profundidade. O tecido foi largado em queda livre estando, no entanto, suspenso por dois cantos. As imagens mostram como a subdivisão pode ser usada para, partindo de uma malha simplificada, e sem qualquer conhecimento prévio das condições da simulação, simular e mostrar detalhes do tecido que, de outra forma, apenas poderiam ser visíveis usando uma malha uniforme muito refinada.



Figure 10 - Tecido suspenso, subdividido dinamicamente

Na Figura 11 podem ver-se os tempos médios de CPU despendidos pelo algoritmo de subdivisão e simplificação adaptativas, para os primeiros 2 segundos de tempo simulado. O tempo médio de CPU gasto por frame, foi de 284.5ms, variando entre 3.27ms e 835.4ms. Sem recurso ao algoritmo, para se obterem triângulos com a mesma área dos de nível de detalhe maior, seria necessário recorrer a uma malha de 33×33 partículas. Nesse caso, cada passo da simulação demoraria, em média, cerca de 3012.7ms, ou seja, superior em mais de 10 vezes.

Note-se que a subdivisão e simplificação adaptativas apenas consomem, em média, cerca de 3% do tempo total gasto na simulação. Embora, por vezes, essa proporção possa atingir valores consideráveis, conforme se pode visualizar no gráfico, à medida que o número de partículas se torna mais significativo, o tempo de CPU

gasto é dominado pela resolução do sistema de equações lineares. Assim, a percentagem de tempo despendido pelas fases de subdivisão e simplificação converge, de forma rápida, para valores muito baixos.

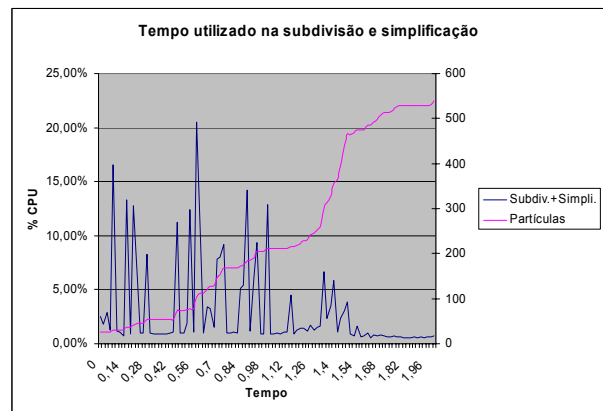


Figure 11 – Percentagem de tempo de CPU usado

Uma experiência diferente pode ser visualizada na Figura 12. Neste caso, uma malha, previamente subdividida de forma regular, é deixada cair sobre uma superfície circular. Na zona de contacto pode ver-se, facilmente, o resultado do processo de simplificação.

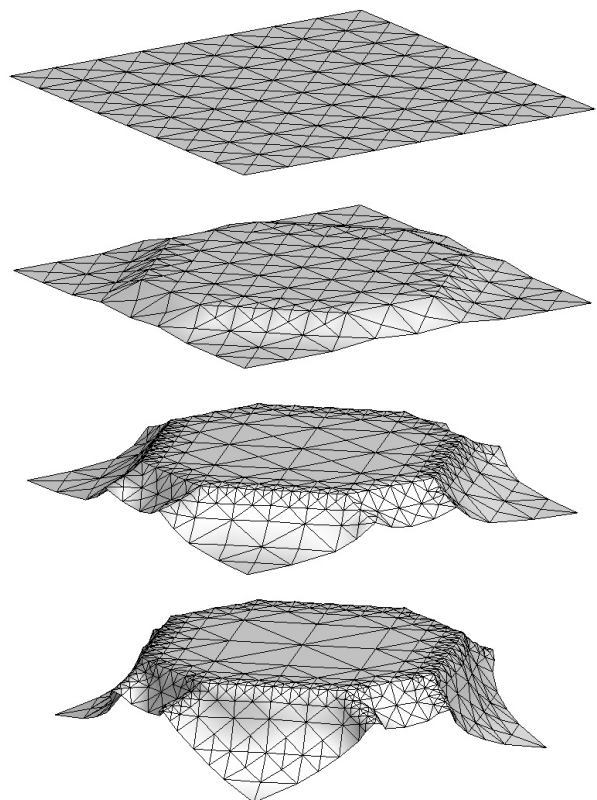


Figure 12 - Tecido a cair sobre uma superfície circular

7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste artigo mostrámos como a subdivisão de malhas 4–8 pode ser usada no contexto da variação dinâmica do nível de detalhe, aplicada à simulação de tecidos virtuais. O esquema de subdivisão usado exhibe boas características no que diz respeito à qualidade das

malhas que vão sendo sucessivamente obtidas, sem que a geometria dos triângulos se torne excêntrica ou degenera. A sua escolha teve como critério fundamental evitar problemas de descontinuidade geométrica que provocariam certamente um comportamento caótico do tecido. Outra vantagem do esquema 4–8 é o número reduzido de novos elementos (vértices e faces) introduzidos na malha a cada passo elementar de subdivisão. Este fenómeno permite um controlo mais gradual da evolução da malha. Apresentámos, igualmente, algumas técnicas que combatem os problemas de instabilidade e descontinuidade introduzidos pelas inevitáveis modificações instantâneas da geometria durante o processo de simplificação da malha. Os resultados experimentais mostram que o ganho obtido em termos computacionais é significativo e que o peso total das operações de refinamento e simplificação é negligenciável, tornando atractiva a utilização do método.

Um dos defeitos anteriormente apontados à técnica de Baraff, aqui utilizada, seria o de não haver garantia que a versão modificada do método do gradiente conjugado convergisse para a solução do sistema. Recentemente, em [Ascher02], para além de se provar a convergência desse método, os autores sugerem ainda uma pequena alteração na inicialização do algoritmo que permite uma aceleração do mesmo, fazendo-o convergir mais depressa. No entanto, não nos foi possível ainda implementar e verificar os ganhos que se poderão obter com tal alteração.

Por outro lado, estamos cientes que outras estratégias de gestão de memória, especialmente as que disponham de mecanismos de *cache*, poderiam, eventualmente, ser mais bem sucedidas no estabelecimento do compromisso entre ocupação de memória central e rapidez de execução. Mas, não sendo prioritário, também deixaremos esse estudo como tópico de investigação para trabalho futuro.

8. REFERÊNCIAS

- [Ascher02] Uri M. Ascher and Eddy Boxerman. On the modified conjugate gradient method in cloth simulation. Electronically available at: <http://www.cs.ubc.ca/~ascher>
- [Baraff98] David Baraff and Andrew Witkin. Large Steps in Cloth Simulation. In *SIGGRAPH 98 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 43-54. ACM SIGGRAPH, 1998.
- [Breen92] D.E. Breen, D.H. House and P.H. Getto. A physically Based Particle Model of Woven Cloth. *The Visual Computer*, 8(5-6):264-277, June 1992.
- [Breen94] D.E. Breen, D.H. House and M.J.Wozny. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pages 365-372, 1994.
- [Bridson02] R. Bridson, R. Fedkiw and J. Anderson. Robust Treatment of Collisions, Contact and Friction for Cloth Animation. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3): 594–603, 2002.
- [DeRose98] Tony DeRose, Michael Kass and Tien Truong. Subdivision surfaces in character animation. In *Proceedings of the 25th annual conference on computer graphics and interactive techniques*, pages 85-94. ACM Press, 1998.
- [Dias00] J.M.S. Dias, M.N. Gamito and J.M. Rebordão. A Discretized Linear Elastic Model for Cloth Buckling and Drape. *Textile Research Journal*, 70(4):285-297, April 2000.
- [Eberhardt96] B. Eberhardt, A. Weber and W. Strasser. A Fast, Flexible, Particle-system for Cloth Draping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(5):52-59, September 1996.
- [Etmuss00] Olaf Etmuss, Bernhard Eberhardt, Michael Hauth, and Wolfgang Strasser. Collision adaptive particle systems. *Proceedings Pacific Graphics 2000*, pages 338-347, 2000.
- [Hadap99] S. Hadap, E. Bangarter, P. Volino and N. Magnent-Thalmann. Animating Wrinkles on Clothes. *IEEE Visualization '99*, pages 175-182. IEEE Computer Society Press, San Francisco, USA, October 1999.
- [Howlett98] P. Howlett and W.T. Hewitt. Mass-spring simulation using adaptive non-active points. *Computer Graphics Forum*, 17(3), 1998.
- [Hutchinson96] Dave Hutchinson, Martin Preston, and Terry Hewitt. Adaptive refinement for mass/spring simulations. In *Computer Animation and Simulation '96*, Eurographics, pages 31-45. Springer-Verlag Wien New York, 1996.
- [Kobbelt00] Leif Kobbelt. $\sqrt{3}$ -Subdivision. In *Proceedings of the 27th annual conference on Computer Graphics and interactive techniques*, pages 103-112. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.
- [Loop87] C.T. Loop. *Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles*. Master's Thesis, Department of Mathematics, University of Utah, August 1987.
- [Provot95] Xavier Provot. Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behaviour. *Computer Interface Proceedings*, pages 147-154. Quebec City, Canada, May 1995.
- [Velho00] Luis Velho and Jonas Gomes. Variable Resolution 4-k Meshes: Concepts and Applications. *Computer Graphics Forum*, 19(4):195-214, 2000.
- [Velho01] Luis Velho and Denis Zorin. 4-8 Subdivision. *Computer Aided Geometric Design*, 18(5): 397-427, 2001. Special Issue on Subdivision Techniques.
- [Villard02] Julien Villard and Houman Borouchaki. Adaptive Meshing for Cloth Animation. *11th International Meshing Roundtable*, pages 243-252, Ithaca, New York, USA. September, 2002.
- [Volkov02] Vasily Volkov and Li Ling. Adaptive Local Refinement and Simplification of Cloth Meshes. In *First International Conference on Information*

Technology & Applications-ICITA 2002, Bathurst, Australia, 25-28 November 2002. Electronically available at:

<<http://charybdis.mit.csu.edu.au/~mantolov/CD/ICITA2002/papers/266-5.pdf>>

[Zhang01] Dongliang Zhang and Matthew M.F. Yuen. Cloth Simulation using Multilevel Meshes. *Computers & Graphics*, 25(3):383-389, 2001.

[Zhang02] Jian Zhang, Shahram Payandeh and John Dill. Haptic Subdivision: an Approach to Defining Level-of-detail in Haptic Rendering. *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems 2002*, pages 201–208.