UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Leandro de Pinho Monteiro

Soluções Numéricas em um Modelo de Tecidos Baseado na Superfície de Cosserat

Orientadora: Profa. Dra. Wu, Shin-Ting

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Engenharia de Computação**.

Campinas, SP
Dezembro de 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Leandro de Pinho Monteiro

Soluções Numéricas em um Modelo de Tecidos Baseado na Superfície de Cosserat

Orientadora: Profa. Dra. Wu, Shin-Ting

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Engenharia de Computação**.

Banca Examinadora

Profa. Dra. Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno . . DEP/FEM/UNICAMP
Prof. Dr. Léo Pini Magalhães . . . . DCA/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Clésio Luis Tozzi . . . . DCA/FEEC/UNICAMP

Campinas, SP

Dezembro de 2007

Resumo

Atualmente, os modelos físicos são amplamente utilizados em simulações computacionais de vestuários e tecidos em geral. Eles podem ser divididos em duas abordagens: mecânica de partículas e mecânica de contínuos. A mecânica de partículas é hoje a abordagem mais utilizada, possuindo vantagens como a simplicidade da formulação e um bom desempenho computacional. Já a mecânica de contínuos é reconhecida por ser a abordagem mais precisa sob o ponto de vista físico, porém tem um alto custo computacional. Muitas vezes, o baixo desempenho da mecânica de contínuos está relacionado à solução numérica utilizada para obter diferentes estados do tecido ao longo do tempo, em decorrência da sua solução demandar resolução de sistemas de equações de um grande número de variáveis. As soluções encontradas na literatura são técnicas de elementos finitos ou de diferenças finitas, com integração semi-implícita ou implícita, todas com uma complexidade computacional não linear. Desta forma, este trabalho visa analisar a adequabilidade de utilizar métodos explícitos, que tem um comportamento linear, em um modelo físico fundamentado na teoria de superfície de Cosserat, cujos autores provam que ele consegue produzir dobras sob forças de compressão. Discretizando espacialmente este modelo com a técnica das diferenças finitas, métodos explícitos são avaliados para solucionar as equações diferenciais ordinárias resultantes. Com base nestas avaliações, foi selecionado o método de Verlet e implementado um simulador da dinâmica de malhas retangulares provido de uma interface gráfica interativa. Isso viabilizou uma validação prática aprofundada do modelo, demonstrando a sua superioridade na produção de dobras em relação aos outros modelos existentes.

Palavras-chave: Computação Gráfica, Simulações Físicas, Simulação de Tecidos, Modelagem e Animação de Tecidos, Mecânica de Contínuos, Superfície de Cosserat.

Abstract

Currently, the physic models are very used for cloth simulations. They can be divided in two branches: particles mechanics and continuum mechanics. The particle mechanics is the most used today, having some advantages like an easy formulation and a high performance. The continuum mechanics is recognized to be a more precise branch in physic aspects, but it has a high computational cost. A lot of times, the low performance of continuum mechanics is related to the numerical solution that obtains cloth states along the time, because its formulation have differential geometric quantities. The solutions founded in the literature are the finite element and the finite differences techniques, with the semi-implicit and implicit integration, all with a non linear computational complexity. So, this work aims to analyze the suitability of apply explicit solutions that have a linear behavior, with a physic model founded on the theory of Cosserat surface, which the authors prove that it can produces naturally folds under pure compression forces. A spatial discretization is done with finite difference schema for evaluate explicit methods to solve the resulted ordinary differentials equations. Based on this evaluation, the Verlet method was selected and a rectangular mesh dynamics simulator implemented with an interactive graphics interface. This permits a practice validation of the cloth model, showing its superiority on production of folds compared with the others models.

Keywords: Computer Graphics, Physics Simulation, Cloth Simulation, Cloth Modeling and Animation, Continuum Mechanics, Cosserat Surface.

À minha mãe.

Agradecimentos

À minha mãe, Leda, pelo amor, suporte, carinho e paciência em todos os momentos.

À minha orientadora, Ting, pela ajuda e apoio intelectual e pela amizade conquistada nestes anos de pesquisa.

À professora Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno e aos professores Léo Pini Magalhães e Clésio Luis Tozzi, por aceitarem participar da banca examinadora desta dissertação. Em especial, agradeço ao professor Clésio pela atenção dedicada na fase dos créditos.

À minha namorada, Mariana, pelo amor, companheirismo e paciência durante a longa etapa dedicada a este mestrado.

Aos meus amigos do LCA, em especial ao Adler, Harlen, Jeremias e Alex.

Às pessoas que de algum modo contribuíram, por existirem.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

t	-	Instante de tempo
t_0	-	Instante de tempo inicial
Δt	-	Passo de tempo
$s(t)$	-	Superfície no instante t
$S = s(t_0)$	-	Superfície não deformada correspondente ao instante t_0
x^1 e x^2	-	Curvas coordenadas da superfície $s(t)$
$p = (x^1, x^2)$	-	Ponto localizado nas coordenadas (x^1, x^2) de $s(t)$
$\mathbf{r} = \mathbf{r}(p)$	-	Vetor-posição de um ponto p da superfície $s(t)$
$\mathbf{R} = \mathbf{R}(p)$	-	Vetor-posição de um ponto p da superfície S
m	-	Massa
μ	-	Densidade de massa por unidade de área da superfície $s(t)$
ϱ	-	Coeficiente de amortecimento do meio em que se encontra a superfície $s(t)$
$\mathbf{f} = \mathbf{f}(p)$	-	Forças internas de um ponto p da superfície $s(t)$
$\mathbf{F} = \mathbf{F}(p)$	-	Forças externas de um ponto p da superfície $s(t)$
$\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_1(p) = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x^1}(p)$	-	Vetor de base de um ponto p em relação à coordenada x^1
$\mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_2(p) = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x^2}(p)$	-	Vetor de base de um ponto p em relação à coordenada x^2
$\mathbf{a}^1 = \mathbf{a}^1(p)$ e $\mathbf{a}^2 = \mathbf{a}^2(p)$	-	Vetores de base recíprocos de um ponto p
$\mathbf{n} = \mathbf{n}(p)$	-	Vetor normal de um ponto p
$a_{\alpha\beta}$	-	Tensor de métrica de s
$A_{\alpha\beta}$	-	Tensor de métrica de S
$\varepsilon_{\alpha\beta}$	-	Deformação da métrica de s em relação à S
$a = det(a_{\alpha\beta})$	-	Determinante da matriz composta pelos elementos do tensor métrico
$b_{\alpha\beta}$	-	Tensor de curvatura
b^{α}_{β}	-	Símbolos de Weingarten
$\kappa_{\alpha\beta}$	-	Deformação da curvatura de s em relação à S
$\Gamma^{\lambda}_{\alpha\beta}$	-	Símbolos de Christoffel
$\mathbf{E}_{<tipo>}$	-	Energia associada ao tipo descrito no subíndice.
$\mathbf{v}$	-	Vetor de velocidades
$\mathbf{a}$	-	Vetor de acelerações
$\mathbf{fe}$	-	Vetor de forças externas
$\mathbf{fi}$	-	Vetor de forças internas
ϱ_D	-	Coeficiente de amortecimento do meio
ϱ_F	-	Coeficiente de densidade de fluido
$\frac{\delta \varepsilon(\mathbf{r},t)}{\delta \mathbf{r}}$	-	Variação da energia potencial em $\mathbf{r}$ no instante t
$\mathbf{N}^{\alpha}{}_{\|\alpha}$	-	Força elástica

Trabalhos Publicados Pelo Autor

1. L.P. Monteiro, S.T. Wu.“Simulação Realista de Tecidos”. In *Digital Prodeedings of the V Brazilian Symposium on Computer Games and Digital Entertainment* (SBGames 2006), p. 22.FP.C., Recife, Pernambuco, Brasil, Setembro 2006. URL http://www.cin.ufpe.br/ sbgames/proceedings/papers.htm.

Capítulo 1

Introdução

A simulação de tecidos é do interesse de diversas áreas de trabalho, como na propaganda e entretenimento, usando animações computadorizadas, e na indústria têxtil, auxiliando os profissionais da área de moda no projeto de vestuários e malhas em geral. Apesar de várias estratégias para modelagem e animação de tecidos por computador terem sido rapidamente desenvolvidas nas duas últimas décadas, o comportamento realista de sua dinâmica continua sendo um problema desafiador tanto para comunidade de computação gráfica quanto para a de engenharia têxtil. Enquanto os pesquisadores de computação gráfica estão mais interessados em um modelo estável e robusto numericamente para animar vestuários sobre personagens virtuais, os cientistas têxteis priorizam um modelo mecânico que relacione o comportamento de tecidos aos parâmetros de seu material.

Um dos grandes problemas relacionados à animação de tecidos é formular um modelo que agregue realismo e eficiência para atingir um comportamento natural de dobras sob forças de compressão. Fundamentado em superfícies elásticas de Cosserat [25], Wu e de Melo propuseram um modelo de superfície deformável que consegue representar várias características peculiares de tecidos, incluindo a formação natural de dobras sob compressão, através de um número relativamente pequeno de parâmetros [3]. Algumas simplificações foram necessárias para tornar o modelo computacionalmente factível. Embora tais simplificações não devam influenciar a dinâmica da simulação sob o ponto de vista teórico, as implementações disponíveis do modelo não permitem uma validação mais extensa. Esta dissertação apresenta uma alternativa de implementação, tornando os códigos mais modulares, como também viabilizando a validação prática das principais características do modelo.

Este capítulo está organizado da seguinte maneira: a seção 1.1 apresenta uma breve introdução sobre etapas e problemas envolvidos na simulação de tecidos; a seção 1.2 expõe o conteúdo deste trabalho, discutindo sua motivação, hipótese, foco, escopo e principais contribuições; por fim, a seção 1.3 descreve resumidamente como está organizado o restante desta dissertação.

1.1 Simulação de Tecidos

Os tecidos, em geral, possuem um comportamento bem característico, que é de se curvar com facilidade e se esticar com dificuldade. Esta característica faz com que eles sofram muitas deformações, as quais são governadas por leis físicas complexas do mundo real que devem ser levadas em consideração, em uma simulação computacional, para se obter resultados realistas. O paradigma de modelagem de tecidos é o que diferencia duas abordagens físicas: a mecânica de contínuos e a mecânica de partículas, as quais são resumidamente explicadas na subseção 1.1.1. Para simular a dinâmica de tecidos é preciso ainda obter as variações de sua geometria ao longo do tempo, o que pode ser feito basicamente de três formas: com uma integração implícita, semi-implícita ou explícita, conforme brevemente apresentado na subseção 1.1.2. A combinação de modelagem apropriada do comportamento de um tecido sob forças e da solução numérica das equações envolvidas resulta em uma seqüência de formas que o tecido pode assumir. Há, porém, alguns problemas relacionados à eficiência e à estabilidade numérica, que são discutidos na subseção 1.1.3.

1.1.1 Modelo de Tecido

Tecidos são estruturas compostas de fios, entrelaçados em um determinado padrão. Os fios são feitos de fibras, as quais determinam o material do tecido[1]. A composição, o padrão de entrelaçamento e o tratamento dado aos fios de um tecido determinam seu comportamento quando sujeito à ação de forças externas. Devido à diversidade de parâmetros que combinados resultam em um comportamento bastante peculiar, a modelagem de um tecido pode ser feita de diferentes formas. Pode-se classificar estas formas basicamente em dois tipos: os modelos físicos, como por exemplo nos trabalhos [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]; e os modelos geométricos, por exemplo [20, 21].

Os modelos geométricos não levam em consideração as propriedades físicas dos tecidos, utilizando entidades e transformações geométricas para descrever estados estacionários dos tecidos. Apesar da simplicidade, eles não são adequados para reproduzir o movimento de tecidos, pois se limitam em descrever suas formas usando um certo padrão pré-definido [21], desprezando os fenômenos naturais que ocorrem na realidade. Já os modelos físicos visam representar com maior fidelidade a complexidade envolvida no comportamento de tecidos, fazendo uso de um mecanismo que satisfaça leis físicas que vigoram na vida real e, portanto, atingem um realismo maior quando comparados aos modelos geométricos.

Os modelos físicos são reconhecidos por serem os mais adequados para produzir uma aparência natural da dinâmica de tecidos. Atualmente, os principais *softwares* gráficos comerciais, como o 3D Studio Max e Maya, utilizam modelos físicos dinâmicos para simular o movimento de tecidos.

[1]Estas fibras podem ser naturais como a lã e o algodão ou sintéticas como o elastano e o couro.

Terzopoulos et al. [18] propuseram modelar um tecido como uma superfície deformável cuja dinâmica é governada pela equação

$$\mu\frac{\partial^2\mathbf{r}(p)}{\partial t^2}+\varrho\frac{\partial\,\mathbf{r}(p)}{\partial t}+\mathbf{f}(p,t)=\mathbf{F}(p,t), \tag{1.1}$$

na qual $\mathbf{r}$ corresponde ao vetor-posição de um ponto p de uma superfície s em um instante de tempo t e as forças externas $\mathbf{F}(p,t)$ sobre cada ponto $p\in s(t)$ precisam ser balanceadas pela somatória de três elementos, da esquerda para a direita: força correspondente à energia cinemática, forças dissipativas e forças internas. É neste último termo, referente às forças internas de fricção que são geradas pela variação da energia potencial acumulada na superfície deformável, que se distinguem dois tipos de modelos físicos: os que utilizam a mecânica de partículas e os que utilizam a mecânica de contínuos.

Os modelos que utilizam a mecânica de partículas consideram uma superfície deformável como um conjunto de pontos discretos, que são as partículas, dispostos em uma grade na qual são conectados uns aos outros por molas lineares ou não-lineares, responsáveis pelo comportamento elástico de alguns tipos de tecido, como os feitos de elastano. Estas molas podem assumir diferentes estruturas de ligação entre as partículas, como, por exemplo, nas direções horizontal, vertical e diagonal, e se deformam dentro e fora do plano da superfície criando tensões, distensões, cisalhamentos e curvamentos que são calculados de acordo com a mecânica clássica, sendo o material do tecido aproximado pela rigidez das molas. As deformações das molas são então usadas para estimar a energia interna acumulada em cada partícula da superfície. Normalmente, a energia resultante de uma partícula é calculada pelas deformações das molas adjacentes a ela ou dentro de uma vizinhança pré-estabelecida.

Já os modelos baseados na mecânica de contínuos consideram o tecido como uma superfície deformável contínua sobre a qual são aplicadas teorias das cascas ou das placas para analisar os comportamentos de tensão, distensão, cisalhamento e curvamento nas deformações de um tecido. Estas deformações podem ser descritas como a variação da energia interna em relação aos elementos da geometria diferencial, como os tensores de métrica e de curvatura. A variação da energia interna de um ponto da superfície do tecido pode ser então obtida em função da variação dos coeficientes da primeira e da segunda forma fundamental em relação ao estado não deformado do tecido.

Os modelos baseados na mecânica de contínuos precisam ser discretizados no domínio espacial para serem computacionalmente implementáveis, de forma que ambas as abordagens de modelagem física de partículas e contínuos podem ter formulações similares, diferindo essencialmente nas equações constitutivas, as quais são responsáveis por descrever as forças internas $\mathbf{f}(p,t)$ causadas por deformações no tecido. As equações constitutivas são relações entre duas quantidades físicas, como a lei de Hooke, que relaciona a força elástica de forma diretamente proporcional ao produto do coeficiente de rigidez de uma mola pelo deslocamento sofrido por ela.

Existem três metas relacionadas à simulação de tecidos que são colocadas em primeiro plano dependendo da finalidade da aplicação: o **realismo**, em animações, como filmes, desenhos e propagandas; a **eficiência**, relevante nos jogos em geral, pois de nada adianta um jogo realista se sua interatividade ficar prejudicada por algum método custoso que, na prática, serve apenas para lhe dar um maior adereço; e a **precisão física**, importante para análise e simulação do comportamento de tecidos nas aplicações da Engenharia Têxtil. Neste sentido, não existe uma única forma correta de simular tecidos, pois a escolha de qual modelo de tecido usar depende das necessidades do projetista.

O realismo na dinâmica de tecidos está relacionado com o uso de modelos físicos. A mecânica de contínuos consegue atingir uma precisão física superior à mecânica de partículas, pois se baseia, em geral, em um modelo geometricamente exato considerando o tecido da forma mais real possível, ao invés de imaginá-lo com uma grade conectada por molas. Entretanto, esta maior precisão física resulta em uma formulação mais complexa, o que torna o modelo de tecido mais difícil de ser implementado e também menos eficiente computacionalmente em relação à mecânica de partículas. Atualmente, os modelos baseados na mecânica de contínuos são reconhecidos por melhor representarem as deformações dos tecidos, porém na prática os modelos baseados na mecânica de partículas são os mais utilizados pela simplicidade na formulação das forças internas e pela eficiência.

Em 2000, Breen e House editaram um livro que compara em um de seus capítulos duas implementações com abordagens físicas distintas [22]. Nesta comparação foi utilizado o modelo de partículas de Breen et al. [16] e o modelo baseado na mecânica de contínuos de Eischen et al. [15]. A conclusão foi de que quando uma alta precisão é requerida, um modelo baseado na mecânica de contínuos é a melhor opção, enquanto em termos de eficiência computacional é recomendado um modelo baseado na mecânica de partículas.

Desta forma, esta dissertação considera avaliar a utilização de um modelo baseado na mecânica de contínuos com uma implementação alternativa para simular tecidos que agregue realismo e precisão física junto com um comportamento linear na complexidade computacional em termos de desempenho. Para tanto, é necessário discretizar espacialmente o modelo baseado na mecânica de contínuos para que esta implementação fique clara.

A discretização espacial em modelos baseados na mecânica de partículas tem o objetivo de reduzir as soluções de equações diferenciais parciais, presentes na formulação do modelo, para equações diferenciais ordinárias em função do tempo. Estas equações são então solucionadas com um método numérico para obter diferentes estados do tecido ao longo do tempo, produzindo sua dinâmica. O processo numérico de encontrar diferentes formas seqüenciais do tecido ao longo do tempo é muitas vezes referenciado de integração temporal. A discretização espacial pode ser feita utilizando os métodos de diferenças finitas ou elementos finitos. O método de diferenças finitas possui uma formulação simples e com bom desempenho computacional, porém necessita do tratamento de problemas de contorno, que ocorrem quando não existem pontos adjacentes em determinadas direções nas fronteiras do tecido. Já o método dos elementos finitos não possui problemas de contorno, porém apresenta uma formulação mais complexa e demanda maior esforço computacional.

O método das diferenças finitas foi o escolhido para discretizar espacialmente o modelo elástico proposto por Terzopoulos et al., o qual era baseado na mecânica de contínuos e visava simular o comportamento de modelos elásticos deformáveis, incluindo os tecidos [18]. Inspirados nesta discretização, Wu e de Melo aplicaram um esquema similar para discretizar um modelo fundamentado na teoria de superfície de Cosserat, também baseado na mecânica de contínuos e formulado para simular a dinâmica de tecidos [3]. Já os elementos finitos foi a opção de Eischen et al., que utilizaram um modelo de casca [17] para o mesmo propósito [15]. Além deles, Etzmuss et al. usaram os elementos finitos mostrando que é possível obter eficiência computacional com esta técnica na simulação de tecidos [8]. Em um outro trabalho, Etzmuss et al. demonstraram que é possível derivar uma formulação baseada na mecânica de partículas a partir de uma baseada na mecânica de contínuos utilizando um esquema de diferenças finitas [23]. Com isso, mesmo utilizando um modelo baseado na mecânica de contínuos para representar um tecido, pode-se obter uma formulação similar a um modelo baseado na mecânica de partículas para obter-se maior eficiência computacional.

Portanto, visando explorar a alternativa de usar um modelo baseado na mecânica de contínuos para produzir a simulação de tecidos de forma eficiente, é interessante utilizar um modelo discretizado com as diferenças finitas para obter uma formulação similar àquela usada na mecânica de partículas. Neste sentido, foi selecionado o modelo proposto por Wu e de Melo, o qual, fundamentado na teoria de superfície de Cosserat, consegue reproduzir o comportamento natural de dobras que se formam nos tecidos sob apenas forças de compressão [3]. Este comportamento ocorre porque, diferentemente dos outros modelos, os autores incluíram um termo que relaciona as variações de métrica com as de curvatura, preservando a compatibilidade entre estas duas grandezas geométricas e assegurando a regularidade da superfície. Além disso, este modelo tem um controle intuitivo dos parâmetros do material do tecido.

1.1.2 Integração Temporal

Apesar das diferentes abordagens de modelagem física de tecidos, elas procuram solucionar o mesmo problema, que é encontrar de forma precisa e estável as novas formas do tecido, ao longo do tempo, quando sujeito a forças. Este processo, chamado de integração temporal, recai na solução da equação 1.1, que a partir de um instante t é usada para obter os pontos da superfície em $t + \Delta t$, sendo Δt chamado de passo de tempo. Existem muitos esquemas para solucionar esta equação, diferindo em características como estabilidade numérica, eficiência e precisão. Basicamente, estes esquemas podem ser divididos em três tipos de integração temporal: implícita, semi-implícita e explícita.

De forma similar à modelagem de tecidos, a escolha do método de integração temporal também depende da finalidade da aplicação. Para uma aplicação que priorize o realismo e a precisão física, os métodos implícitos combinados com modelos contínuos são os mais adequados. Já para uma aplicação em tempo real, como, por exemplo, nos jogos modernos, que precisam de um melhor desempenho, uma integração explícita junto com um modelo de partículas é o mais indicado. Naturalmente, à medida que o passo de tempo Δt se aproxima de 0, as soluções aproximadas dos novos pontos da superfície do tecido em cada instante de tempo $t + \Delta t$ tendem a ficar mais precisas, para qualquer método de integração temporal, devido a proximidade entre os valores dos elementos do modelo de tecido entre passos subseqüentes. Contudo, conforme o passo de tempo cresce, é possível notar a diferença de precisão e estabilidade numérica que cada tipo de integração consegue atingir.

A integração temporal implícita é a que obtém a solução aproximada com maior precisão numérica em relação à solução exata, pois nela os novos pontos da superfície do tecido são encontrados no instante $t + \Delta t$ com base nas forças do mesmo instante $t + \Delta t$. Além disso, este tipo de integração tem a vantagem de conseguir encontrar as soluções de forma estável com um passo de tempo maior do que os utilizados por esquemas semi-implícitos ou explícitos, embora tenha a desvantagem de precisar linearizar o modelo de tecido para torná-las computacionalmente solúveis.

Já na integração temporal explícita os novos pontos da superfície são encontrados em $t + \Delta t$ com base na energia interna armazenada ε no instante t, gerando um erro de aproximação proporcional ao tamanho do passo de tempo Δt, de forma que quanto menor for este valor, menor será o erro cometido. Por utilizar a energia interna do instante anterior t para encontrar as novas geometrias do tecido em $t + \Delta t$, esta técnica é menos precisa e também apresenta mais problemas de estabilidade numérica, principalmente para valores grandes de passo de tempo, pois depende muito da suavidade com que as energias variam entre dois instantes seguidos. Entretanto, este é o tipo de integração mais fácil de ser implementado e o que apresenta a melhor eficiência computacional.

Por último, a integração temporal semi-implícita é uma mistura dos dois esquemas, equacionando os novos pontos da superfície no instante $t + \Delta t$ com base em uma parcela de energia interna deste mesmo instante, que precisa ser formulada em função dos novos pontos, e também usando uma parcela de energia do instante anterior t. Desta forma, o esquema herda vantagens e desvantagens dos dois lados, sendo uma excelente opção que balanceia as características relacionadas a uma integração temporal.

Na literatura muito já foi pesquisado sobre as integrações temporais para a simulação de tecidos. Os métodos de integração explícita dominaram os trabalhos da década de 90 [2], até que, em 1998, Baraff e Witkin demonstraram a superioridade do esquema numérico de integração implícita em comparação à explícita, atingindo uma dinâmica de tecido estável com o passo de tempo mais largo [13]. Para aliviar o alto custo computacional deste esquema, os autores propuseram um método do gradiente conjugado modificado. Os resultados foram tão promissores que desde então uma série de trabalhos tem se dedicado a aprimorar este sistema [24, 10]. Contudo, estava claro que a prioridade deste trabalho era a eficiência computacional e a estabilidade, pois as imagens obtidas, principalmente em relação à formação de dobras sob forças de compressão, não possuíam grande realismo. Segundo Choi e Ko, o realismo deste modelo era prejudicado pela adição de forças artificiais fictícias para solucionar colisões, o que evitava ou mesmo eliminava a formação de dobras [11]. No modelo proposto por Wu e de Melo não há este tipo de problema, pois a compatibilidade geométrica que assegura um comportamento natural das dobras em um tecido está implícita no modelo [3, 4]. Entretanto, o método semi-implícito de integração temporal usado por estes autores é pouco eficiente devido à sua complexidade computacional. Este baixo desempenho está relacionado com a dificuldade em linearizar a equação 1.1 para solucioná-la como um sistema de equações lineares, que resulta em um procedimento não linear.

Desta forma, esta dissertação propõe avaliar as técnicas de integração explícita, as quais possuem um comportamento linear, para solucionar a equação 1.1 com o objetivo de contornar o problema de linearização das equações constitutivas sem sacrificar o realismo dos resultados visuais.

1.1.3 Problemas

Um dos problemas relacionados ao uso de uma integração temporal explícita refere-se à imposição em usar um passo de tempo pequeno. Esta imposição ocorre devido ao fato de se estimar as posições dos novos pontos da superfície do tecido em um instante $t + \Delta t$ usando as energias armazenadas do tempo t. Quanto menor for este passo de tempo, mais suave é a variação das energias acumuladas na superfície entre tempos subseqüentes e, conseqüentemente, menor é o erro de aproximação cometido. Normalmente, o passo de tempo de uma integração explícita gira em torno de $0.001s$. Esta limitação implica em outro problema, que diz respeito ao número de quadros que precisam ser gerados para uma animação com o intuito de atingir um determinado estado final. Assim, para se simular 10 segundos de uma simulação de tecidos que utiliza uma integração explícita, usando um passo de tempo de $0.001s$, são necessárias 10000 iterações, sendo cada uma delas correspondente a um novo estado do tecido, ao passo que uma integração implícita que agüente um passo de tempo de $0.01s$, precisaria de apenas 1000 iterações para simular o mesmo tempo total. Contudo, cada iteração de uma integração explícita, em geral, costuma ser computada mais rapidamente do que uma implícita.

Devido à existência de diversos métodos de integração explícita, os quais diferem em alguns aspectos como a precisão numérica e o número de passos usados na solução de cada iteração, é possível que exista diferença nos valores máximos do passo de tempo, bem como nos resultados visuais, quando aplicados para simular tecidos. Os métodos numéricos de integração explícita são usados, normalmente, para determinar o valor de um ponto aplicado a uma função sem saber sua formulação algébrica, porém conhecendo a expressão de sua derivada e ainda um valor inicial de um ponto da função. A maioria destes métodos baseia-se na expansão de série de Taylor, desprezando termos conforme a precisão que se deseja obter. No caso da simulação de tecidos, particularmente no modelo de tecido proposto por de Wu e de Melo, não se conhece a definição das derivadas, que em relação à posição dos pontos correspondem a sua velocidade e aceleração, dadas pelo cálculo de forças em uma iteração do modelo [4]. Desta forma, os métodos explícitos precisam ser ajustados ao modelo antes de serem aplicados ao longo do tempo para obter diferentes geometrias do tecido.

Um outro problema relacionado à simulação de tecidos é a definição das condições de contorno, quando se utiliza a técnica de diferenças finitas para a discretização espacial do modelo de tecido, como em [18, 4]. Este problema consiste no cálculo de alguns elementos do modelo, como tensores de métrica e curvatura, nas fronteiras da malha discreta, nas quais pontos adjacentes necessários para os cômputos podem não existir. No modelo de tecido selecionado é utilizada a mesma estratégia usada por Terzopoulos et al., que corresponde em zerar os elementos nos pontos em que não existirem os pontos adjacentes necessários [18]. Esta consideração pode provocar, em alguns tipos de simulação, um desequilíbrio das forças internas nos pontos zerados, causando problemas de instabilidade. Este trabalho apresenta uma solução para contornar este problema.

1.2 Conteúdo do Trabalho

Este trabalho tem como principal conteúdo explorar a aplicação de técnicas de integração explícita para obter as variações do modelo de tecido, proposto por Wu e de Melo [3], ao longo do tempo.

1.2.1 Motivação

A motivação deste trabalho é desenvolver uma simulação de tecidos utilizando uma abordagem alternativa, em relação aos trabalhos atuais, que consiste em combinar um modelo de tecido baseado na mecânica de contínuos com uma integração temporal explícita. Para tanto, é usado um modelo de superfícies deformáveis geometricamente exato, proposto por Wu e de Melo [3], que, derivado de uma teoria de cascas [25], se destaca dos demais modelos baseados na mecânica de contínuos por possuir um tratamento apropriado na formação de dobras sob forças de compressão. Neste modelo de tecido, o realismo dos resultados é obtido com precisão física, o que proporciona um controle intuitivo dos parâmetros do material do tecido. Contudo, em sua implementação original o modelo é integrado ao longo do tempo com um esquema semi-implícito, que possui um alto custo computacional. Assim, existe o interesse em verificar se este modelo pode ser implementado com um método de integração de melhor desempenho, porém sem perder realismo nos resultados visuais.

1.2.2 Hipótese

A natureza do modelo de tecido escolhido impõe o processo de linearização das equações envolvidas para poderem ser resolvidas por técnicas implícitas. Adotando métodos semi-implícitos, é necessário o uso de pequenos passos de tempo para garantir que a variação dos elementos geométricos ao longo do tempo seja suave. Desta forma, não é possível aproveitar uma das grandes vantagens de se usar os métodos implícitos, que é poder usar um passo de tempo mais largo. Este trabalho parte da hipótese de que, diferentemente da tendência dos trabalhos em curso, uma integração temporal explícita pode solucionar eficientemente a equação 1.1, gerando resultados realistas, desde que a variação entre as formas geométricas de dois passos de tempos subseqüentes seja suave. É esperado que o realismo esteja inerente ao modelo proposto por de Wu e de Melo [3], enquanto o uso de um método de integração explícita proporcione um ganho de simplicidade e eficiência em relação à integração semi-implícita feita na implementação original do modelo.

1.2.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é melhorar a eficiência computacional da solução da equação 1.1 com o termo ε estimado pelo algoritmo proposto no modelo de Wu e de Melo, investigando qual a melhor técnica de integração explícita que pode ser aplicada para integrá-lo ao longo do tempo. Como objetivos secundários, pretende-se apresentar uma validação prática mais aprofundada das principais características do modelo, mostrando através de resultados visuais de simulações de tecidos, geradas com o melhor método explícito avaliado, sua eficiência na criação de dobras com diversidade e em situações em que só existem forças de compressão.

Além disso, esta dissertação tem o objetivo de apresentar um simulador de tecidos com uma nova reestruturação da implementação feita por de Melo [4], com o intuito de tornar os códigos mais modulares para facilitar a integração de novos algoritmos, como os referentes ao tratamento de colisões. Neste *software* também é desenvolvida uma nova interface gráfica visando aumentar a facilidade do usuário para manipular os parâmetros do modelo e gerar animações.

1.2.4 Escopo

Faz parte do escopo deste trabalho a análise da adequabilidade de técnicas de integração explícita para solucionar a equação 1.1 no modelo proposto por Wu e de Melo [3] em termos de: expectativa visual, estabilidade numérica e eficiência computacional. Para tanto, assume-se que a topologia da superfície que representa o tecido é uma malha retangular, pois se adota o mesmo esquema de discretização espacial proposta por Terzopoulos et al. [18] para determinar as variações das equações constitutivas do modelo deformável. Está fora do escopo desta dissertação incorporar algoritmos de tratamento de colisões à simulação de tecidos, embora eles sejam considerados na modularização do código-fonte para que possam ser agregados facilmente em trabalhos futuros.

1.2.5 Contribuições

A principal contribuição desta dissertação é desenvolver uma implementação, eficiente computacionalmente, do modelo de tecido proposto por Wu e de Melo [3]. Para este propósito, as técnicas de integração explícita mais populares são implementadas para serem usadas como solução numérica do modelo de tecido ao longo do tempo, o qual é baseado na mecânica de contínuos. Assim, apesar do uso de métodos explícitos para simular tecidos não ser uma novidade, bem como utilizar o modelo de tecido escolhido para este mesmo propósito, a combinação destas técnicas de integração com este tipo de modelo é inédita na literatura.

Esta dissertação também contribui fornecendo um procedimento para especificar os parâmetros do material de um tecido, bem como os parâmetros de simulação, que juntos, determinam uma grande diversidade de dobras que podem ser formadas. Para tanto, um projeto de *software* é apresentado visando desenvolver uma nova estrutura de implementação para o modelo de tecido usado, criando uma interface lógica, com o intuito de facilitar a integração de novos algoritmos, e também uma interface gráfica, objetivando aumentar a usabilidade do usuário para produzir simulações de tecidos. Além disso, esta dissertação contribui com uma validação prática aprofundada do modelo, destacando os resultados visuais de suas principais características.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, os quais, com exceção desta introdução, são brevemente descritos nos parágrafos abaixo.

Capítulo 2 discute brevemente os trabalhos relacionados com a simulação de tecidos, destacando suas abordagens de modelagem e suas integrações temporais. Ao final deste capítulo, o modelo de superfície deformável usado neste trabalho é explicado de forma detalhada.

Capítulo 3 apresenta a discretização espacial do modelo de tecido, selecionado neste trabalho, para descrever de que forma os métodos explícitos mais conhecidos podem ser aplicados sobre ele. Após mostrar as formulações, vantagens e desvantagens, estes métodos são implementados sobre o modelo e seus resultados analisados. A escolha do método de Verlet perante os demais é justificada em termos de eficiência computacional, estabilidade numérica e qualidade das imagens produzidas.

Capítulo 4 descreve o projeto de *software* de um simulador de tecidos, provido de uma interface lógica e gráfica. Ao final, alguns exemplos de simulações de tecidos são apresentados para mostrar sua usabilidade.

Capítulo 5 mostra os resultados visuais obtidos com o simulador desenvolvido, focando a qualidade e a diversidade das dobras produzidas, bem como a precisão física do modelo de tecidos. Este capítulo mostra que a abordagem proposta de simular tecidos é viável, além de permitir uma validação prática mais aprofundada do modelo, constatando sua superioridade na produção de dobras em relação aos outros modelos existentes.

Capítulo 6 resume as principais conclusões desta dissertação, destacando as suas contribuições e limitações. Por fim, as possibilidades de trabalhos futuros são comentadas.

Capítulo 2

Simulações de Tecidos

Este capítulo apresenta um panorama dos trabalhos atuais relacionados à simulação de tecidos, destacando neles a combinação da modelagem de tecidos com a solução numérica adotada, com o objetivo de contextualizar a proposta desta dissertação em uma lacuna existente na literatura. Como este trabalho é voltado para uma nova abordagem de simular a dinâmica de tecidos, neste capítulo são discutidos apenas modelos físicos, tanto os baseados na mecânica de contínuos quanto na de partículas, deixando de fora os modelos puramente geométricos, como [20, 21], por eles serem voltados para a simulação de tecidos em um estado estático. Para melhor organizar a discussão dos modelos físicos, a seção 2.1, que descreve os modelos baseados na mecânica de partículas, e a seção 2.2, que descreve os baseados na mecânica de contínuos, estão divididas de acordo com a solução numérica usada para integrar temporalmente os modelos, ou seja, com subseções referentes às integrações implícitas, semi-implícitas e explícitas. Após os principais modelos serem comentados, eles são sintetizados e classificados de acordo com a abordagem física e o método numérico usado na seção 2.3.

Em seguida, este capítulo justifica a escolha e detalha o modelo físico usado neste trabalho, o qual é proposto por Wu e de Melo, baseado na mecânica de contínuos e discretizado no espaço com diferenças finitas [3]. Este modelo de superfície deformável é fundamentado em uma teoria de casca geometricamente exata, conhecida como superfície de Cosserat elástica [25]. O resultado é um comportamento apropriado do tecido quando submetido às forças de compressão e um controle intuitivo dos parâmetros do material por possuírem interpretações geométricas, que são aspectos diferenciais deste modelo em relação aos demais baseados na mecânica de contínuos. Desta forma, uma explicação aprofundada deste modelo é feita na seção 2.4, dividindo-a em subseções que discutem a teoria geral da superfície de Cosserat e as restrições feitas sobre ela no modelo de tecido usado nesta dissertação. Por fim, a seção 2.5 traz as considerações finais.

2.1 Modelos Físicos baseados na Mecânica de Partículas

Os modelos físicos que utilizam a mecânica de partículas representam os tecidos como uma grade de pontos interligados entre si com diferentes tipos de ligação. Conforme estes pontos ou partículas vão se deslocando devido a deformações, as forças exercidas sobre cada partícula são calculadas com base nas tensões existentes entre a ligação com as partículas adjacentes. O modelo mais conhecido é o modelo massa-mola, no qual cada partícula está ligada à outra por molas e as tensões são dadas pela lei de Hooke, que diz que a força elástica é igual ao produto entre o coeficiente de rigidez da mola e seu deslocamento a partir do ponto de repouso.

2.1.1 Integrações Explícitas

O trabalho precursor da mecânica de partículas é o trabalho de Haumann, que em 1987 desenvolveu o primeiro modelo massa-mola para modelar a dinâmica de uma superfície deformável, utilizando uma integração temporal explícita [1]. Neste modelo cada vértice da superfície possui uma massa e é conectado ao seu vizinho por uma mola, de forma que a cada duas faces triangulares, formadas por quatros pontos-massa, existe um outro tipo de ligação de mola, conforme a figura 2.1a. Incorporando forças aerodinâmicas como o vento e a resistência ao ar e, um algoritmo de detecção de colisões, o autor utilizou como solução numérica o esquema explícito de Euler para frente.

Em 1995, Provot incrementou o sistema de Haumann propondo o uso de três tipos de molas que conectam os pontos-massa da grade bidimensional: molas de estrutura, as quais são usadas entre todos os vizinhos imediatos nas direções horizontais e verticais; molas de flexão, usadas entre vizinhos espaçados de um ponto de distância também nas direções horizontais e verticais; e molas de cisalhamento, usadas entre vizinhos imediatos nas diagonais [2]. Assim, cada ponto-massa da grade de partículas pode ter sua tensão resultante estimada com pontos em uma vizinhança pré-estabelecida, como mostra a figura 2.1(b). Este trabalho conseguiu solucionar alguns dos principais problemas da época, que eram os efeitos de superelasticidade no tecido e instabilidade na simulação. O esquema explícito de Euler para frente foi aplicado para obter as soluções numéricas ao longo do tempo, partindo da segunda lei de Newton, que diz que a força resultante em um corpo é igual ao produto de sua massa pela aceleração adquirida, e utilizando as forças elásticas provocadas pelos deslocamentos das molas para encontrar a força resultante $\mathbf{F}$ e, com ela, encontrar a aceleração $(\mathbf{acel})$ e atualizar a velocidade $(\mathbf{vel})$ e posição $(\mathbf{r})$ de cada partícula (k, l), conforme as equações

$$\begin{aligned}
\mathbf{acel}_{k,l}(t+\Delta t) &= \mathbf{F}_{k,l}(t), \\
\mathbf{vel}_{k,l}(t+\Delta t) &= \mathbf{vel}_{k,l}(t) + \Delta t\, \mathbf{acel}_{k,l}(t+\Delta t), \\
\mathbf{r}_{k,l}(t+\Delta t) &= \mathbf{r}_{k,l}(t) + \Delta t\, \mathbf{vel}_{k,l}(t+\Delta t).
\end{aligned}$$