



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE COMUNICAÇÃO E EXPRESSÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Letícia Debastiani Frana

**Dinâmica de Tecidos para Figurinos em Animação: uma Abordagem Comparativa  
entre Captura de Movimentos Óptico e Simulação Digital**

Florianópolis  
2026

Letícia Debastiani Frana

**Dinâmica de Tecidos para Figurinos em Animação: uma Abordagem Comparativa  
entre Captura de Movimentos Óptico e Simulação Digital**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestra em Design.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Horn Vieira  
Coorientador: Prof. Dr. Flávio Andaló

Florianópolis

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

Frana, Letícia Debastiani

Dinâmica de Tecidos para Figurinos em Animação : uma Abordagem Comparativa entre Captura de Movimentos Óptico e Simulação Digital / Letícia Debastiani Frana ; orientador, Milton Luiz Horn Vieira, coorientador, Flávio Andaló, 2026.

88 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Comunicação e Expressão, Programa de Pós-Graduação em Design, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Design. 2. Simulação de tecidos. 3. Figurinos. 4. Animação 3D. 5. Captura de movimentos. I. Vieira, Milton Luiz Horn. II. Andaló, Flávio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Design. IV. Título.

Letícia Debastiani Frana

**Dinâmica de Tecidos para Figurinos em Animação: uma Abordagem Comparativa  
entre Captura de Movimentos Óptico e Simulação Digital**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 19 de fevereiro de 2026  
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Gabriel De Souza Prim, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nicholas Bruggner Grassi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Sergio Nesteriuk Gallo, Dr  
Universidade Anhembi Morumbi

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado  
adequado para obtenção do título de Mestra em Design.

---

Prof. Dr. Eugenio Andres Diaz Merino  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr. Milton Luiz Horn Vieira  
Orientador

Florianópolis, 2026.

Dedico este trabalho aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a todas as forças superiores que iluminaram e sustentaram meu caminho.

Aos meus pais, Salete e Claudimir, por todo o amor, incentivo e apoio; por estarem sempre presentes, mesmo à distância; e por me proporcionarem todas as oportunidades, inclusive as que não tiveram.

Ao meu namorado, Jonas, por todo o apoio, carinho e paciência.

Agradeço aos meus familiares e amigos, que compreenderam as ausências impostas pela distância e, mesmo assim, torceram por mim e permaneceram presentes com palavras de incentivo e afeto.

Ao meu orientador, Professor Dr. Milton Luiz Horn Vieira, agradeço pela confiança e pela orientação firme.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Flávio Andaló, agradeço pela disponibilidade, pela clareza didática e por seu acompanhamento atento e prestativo ao longo do trabalho.

Aos colegas do DesignLab, agradeço pelos momentos compartilhados. Em especial, Nicolas e Guilherme, pela generosidade em compartilhar conhecimentos e pela troca construtiva envolvendo os sistemas utilizados.

Por fim, agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), Edital 18/2024.

Muito obrigada.

## RESUMO

A pesquisa propõe e aplica um método de calibração da simulação digital de tecidos, baseado na comparação entre dados de captura de movimento óptica de tecidos reais e simulações digitais, visando à reprodução crível da dinâmica de figurinos em animações 3D. O estudo analisa o comportamento dinâmico de algodão, lã, linho e seda submetidos à excitação aerodinâmica controlada, registrando os deslocamentos tridimensionais dos materiais e identificando padrões de resposta relacionados às suas propriedades físicas e mecânicas. Os dados indicam que o eixo normal ao plano do tecido constitui o principal grau de liberdade excitado pelo vento, com amplitudes crescentes ao longo do comprimento livre e contribuições menores, porém relevantes, nas direções vertical e lateral para a caracterização do movimento tridimensional. Em seguida, os resultados experimentais subsidiam a calibração do modificador de simulação de tecidos do *Blender*, por meio do ajuste empírico de parâmetros adimensionais, tomando o algodão como referência para o campo de vento aplicado aos demais materiais. As simulações reproduzem de forma satisfatória o comportamento médio dos tecidos no regime permanente e a hierarquia de resposta entre eles, embora apresentem menores oscilações e variabilidade temporal em comparação aos dados físicos, evidenciando limitações na modelagem do vento. Tecidos mais leves e flexíveis, como a seda, demonstram maiores amplitudes e sensibilidade à excitação, enquanto materiais mais rígidos e densos como a lã, exibem respostas mais estáveis, reforçando a relação entre propriedades mecânicas e percepção visual de leveza, fluidez ou peso em figurinos animados. Apesar de restrições ligadas à instrumentação e à impossibilidade de mensuração direta de propriedades físicas, o estudo demonstra que a articulação entre captura de movimento e simulação digital constitui uma abordagem consistente para o controle do comportamento dinâmico de tecidos e para o desenvolvimento de figurinos com credibilidade visual em animações 3D realistas.

**Palavras-chave:** Simulação de tecidos; Figurino; Animação 3D; Captura de movimentos.

## ABSTRACT

This research proposes and applies a calibration method for digital cloth simulation based on the comparison between optical motion capture data of real fabrics and digital simulations, aiming to achieve a credible reproduction of costume dynamics in 3D animations. The study analyzes the dynamic behavior of cotton, wool, linen, and silk subjected to controlled aerodynamic excitation, recording the three-dimensional displacements of the materials and identifying response patterns related to their physical and mechanical properties. The results indicate that the axis normal to the fabric plane constitutes the main degree of freedom excited by the wind, with increasing amplitudes along the free length and smaller, yet relevant, contributions in the vertical and lateral directions for the characterization of three-dimensional motion. Subsequently, the experimental results support the calibration of the cloth simulation modifier in Blender through the empirical adjustment of dimensionless parameters, using cotton as a reference for the wind field applied to the other materials. The simulations satisfactorily reproduce the average behavior of the fabrics in the steady-state regime and the hierarchy of responses among them, although they present smaller oscillations and temporal variability compared to the physical data, highlighting limitations in wind modeling. Lighter and more flexible fabrics, such as silk, demonstrate greater amplitudes and sensitivity to excitation, while more rigid and dense materials, such as wool, exhibit more stable responses, reinforcing the relationship between mechanical properties and the visual perception of lightness, fluidity, or weight in animated costumes. Despite limitations related to instrumentation and the impossibility of directly measuring physical properties, the study demonstrates that the integration of motion capture and digital simulation constitutes a consistent approach for controlling the dynamic behavior of fabrics and for developing visually credible costumes in realistic 3D animations.

**Keywords:** Fabric simulation; Costume; 3D animation; Motion capture.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Colagem do Filme <i>Frozen 2</i> .....	27
Figura 2 - Colagem do Filme <i>Soul</i> .....	28
Figura 3 - Colagem do Filme <i>Encanto</i> .....	29
Figura 4 - Colagem do Filme <i>Divertida Mente 2</i> .....	30
Figura 5 - Predefinições tecidos <i>Blender</i> .....	42
Figura 6 - Linha do tempo <i>MoCap</i> .....	45
Figura 7 - Sistema de <i>MoCap</i> óptico.....	47
Figura 8 - Fluxo de produção de captura de movimentos.....	48
Figura 9 - Marcador utilizado.....	52
Figura 10 - Registros de algumas etapas do protocolo experimental final.....	53
Figura 11 - Protocolo final do experimento.....	54
Figura 12 - Linha do tempo procedimentos metodológicos.....	59
Figura 13 - Experimento 1.....	60
Figura 14 - Experimento 2.....	61
Figura 15 - Experimento 3.....	62
Figura 16 - Experimento 4.....	63
Figura 17 - Experimento 4: representação esquemática.....	64
Figura 18 - Balanço de incerteza.....	65
Figura 19 - Marcadores.....	66
Figura 20 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de algodão nos eixos x, y e z.....	67
Figura 21 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de lã nos eixos x, y e z.....	68
Figura 22 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de linho nos eixos x, y e z.....	68
Figura 23 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de seda nos eixos x, y e z.....	69
Figura 24 - Deslocamento relativo do marcador 2 no eixo x.....	69
Figura 25 - Deslocamento relativo do marcador 2 no eixo y.....	70
Figura 26 - Deslocamento relativo do marcador 2 no eixo z.....	70
Figura 27 - Configuração geral da simulação.....	71
Figura 28 – Malha.....	73
Figura 29 - Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de algodão.....	74
Figura 30 - Caracterização da excitação.....	75

Figura 31 - Forma deformada do tecido na simulação – Frame 1212 (10,1 segundos).....	76
Figura 32 - Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de lã.....	77
Figura 33 - Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de linho.....	77
Figura 34 - Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de seda.....	78
Figura 35 - Fluxograma macro do método proposto.....	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Trabalhos fichados sobre simulação de tecidos.....	35
Quadro 2 – Propriedades dos tecidos e comportamento dinâmico.....	37
Quadro 3 – Parâmetros adotados para cada material.....	79

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CAD	Computer Aided Design
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
FAPESC	Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina
MOCAP	Motion Capture (Captura de movimento, em português)
PPG	Programa de Pós-Graduação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Problemática .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>17</b>
1.3.1	Objetivo geral .....	17
1.3.2	Objetivos específicos .....	17
<b>1.4</b>	<b>Justificativa e motivação .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5</b>	<b>Aderência ao PPG e relevância .....</b>	<b>19</b>
<b>1.6</b>	<b>Delimitação da pesquisa.....</b>	<b>20</b>
<b>1.7</b>	<b>Caracterização geral da pesquisa.....</b>	<b>21</b>
<b>1.8</b>	<b>Estrutura da dissertação .....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>Revisão teórica .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>O uso dinâmico de figurinos na animação.....</b>	<b>23</b>
2.1.1	Aspectos históricos e culturais dos figurinos.....	24
2.1.2	Animações que se destacam pelo uso realista de figurinos .....	26
<b>2.2</b>	<b>Simulação de tecidos exemplos e processos .....</b>	<b>31</b>
2.2.1	Características dos tecidos que influenciam o comportamento dinâmico .....	36
2.2.2	Programas utilizados para simulações de tecidos .....	38
2.2.3	Simulação de tecido no software de código aberto <i>Blender</i> .....	41
<b>2.3</b>	<b>Captura de movimentos .....</b>	<b>44</b>
2.3.1	Funcionamento da captura de movimentos .....	46
<b>3</b>	<b>Procedimentos metodológicos .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Fase 1: Revisão teórica .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2</b>	<b>Fase 2: Pesquisa experimental.....</b>	<b>51</b>
3.2.1	Etapa 1 - Definição de materiais e equipamentos.....	51
3.2.2	Etapa 2 - Protocolo experimental final.....	53

3.2.3	Medição das massas e avaliação das incertezas.....	54
3.2.4	Processamento dos dados MoCap .....	55
3.2.5	Preparação da simulação no <i>Blender</i> .....	56
3.2.6	Método de calibração da excitação do vento.....	56
3.2.7	Critérios de comparação .....	58
<b>4</b>	<b>Resultados e discussão .....</b>	<b>60</b>
4.1	Experimentos exploratórios e ajustes do protocolo experimental .....	60
4.2	Protocolo experimental final e condições controladas de captura.....	62
4.3	Resultados da captura de movimento .....	65
4.4	Calibração do vento com algodão .....	71
4.5	Simulações com vento fixo nos demais tecidos .....	76
<b>5</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>82</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>84</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização do problema investigado, além de incluir a formulação da pergunta de pesquisa e a definição dos objetivos, geral e específicos do estudo. Em seguida, são expostas a justificativa e motivação para a realização deste trabalho e sua aderência e relevância no contexto do Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal de Santa Catarina (Pós-Design UFSC). Logo após, são descritas as delimitações do estudo e a caracterização geral da pesquisa. Por fim, apresenta-se a estrutura desta dissertação.

### 1.1 APRESENTAÇÃO

A evolução tecnológica tem desempenhado um papel crucial na transformação do cinema de animação, permitindo novas formas de produção e ampliando as possibilidades expressivas das narrativas visuais. Antes da computação gráfica, a animação era predominantemente bidimensional, utilizando técnicas tradicionais de desenho como quadro a quadro e *inbetweening*. Com o avanço da tecnologia digital, a animação tridimensional, que já era feita por stop motion passou também a ser feita com ferramentas como a captura de movimentos que une os conceitos de *motion*, que diz respeito ao deslocamento de posição de um corpo ao longo do tempo, e *capture*, que envolve o registro desse movimento (Resende, 2023). O *MoCap* tornou-se uma ferramenta essencial para diversas áreas, especialmente a animação por ampliar a capacidade das representações (Gomes, 2021; Sun, 2022).

No contexto da animação tridimensional, a busca por credibilidade visual não se restringe apenas aos personagens e cenários, mas também se estende ao comportamento dos tecidos em figurinos. A representação de roupas no passado era voltada à aparência das peças sem levar em conta muitos outros fatores (Huang; Huang, 2022). Com o avanço da computação gráfica, Peng *et al.* (2023), abordam o desenvolvimento de algoritmos de simulação física e que a dinâmica de tecidos se tornou uma área de estudo impulsionada por diversos campos, desde animações e videogames até realidade virtual e comércio online.

Empresas de animação como a Pixar têm investido na pesquisa e desenvolvimento

de estratégias para aprimorar a simulação de tecidos, visando alcançar um realismo cinematográfico cada vez maior (Tichauer, 2023). Além da contribuição visual, a simulação de vestuário também pode impactar na experiência sensorial do espectador (Dai; Hong, 2024).

A *MoCap* tem se consolidado como uma das principais tecnologias na produção de animações digitais. Sua capacidade de registrar e transferir movimentos em tempo real a torna uma ferramenta poderosa para a indústria do entretenimento, reduzindo o tempo de produção e a necessidade de grandes equipes, quando comparada à animação tradicional (Andaló, 2019).

No entanto, enquanto o uso da *MoCap* para a animação de corpos rígidos é consolidado, sua aplicação para a simulação de tecidos ainda apresenta desafios técnicos e metodológicos (Resende, 2023). A replicação realista da dinâmica de tecidos serve para produções artísticas que buscam alcançar detalhamento e coerência material.

Além da *MoCap*, softwares de código aberto como o *Blender* possuem ferramentas de simulação de tecidos para prever e gerar comportamentos realistas de tecidos, otimizando processos e reduzindo o tempo de produção. A combinação dessas tecnologias pode aprimorar a simulação de figurinos em personagens animados, permitindo precisão na interação dos tecidos com os movimentos do corpo (Costa; Costa; Jankowitsch, 2024).

Dessa forma, a dinâmica de tecidos para figurinos na animação emerge como um campo de estudo interdisciplinar, combinando princípios da física, computação gráfica e design para criar representações cada vez mais realistas. A contínua evolução dessa tecnologia reforça sua relevância não apenas para a indústria do entretenimento, mas também para outras áreas que demandam simulações precisas de vestuário e materiais.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

A representação realista de tecidos em figurinos de personagens constitui um desafio recorrente na animação 3D, especialmente em produções que buscam verossimilhança estética e coerência cultural, histórica ou material. Embora softwares de simulação física permitam animar tecidos digitalmente, a dinâmica resultante nem sempre reproduz com fidelidade o comportamento observado em tecidos reais, devido a simplificações físicas, parametrizações genéricas ou limitações na calibração de materiais. Essa discrepância pode comprometer a credibilidade visual do figurino e reduzir sua capacidade de comunicar características narrativas, simbólicas e sensoriais do personagem.

O problema torna-se mais relevante no contexto contemporâneo da animação, em que figurinos assumem papel expressivo e informacional na construção de identidades visuais e culturais, sendo utilizados para reforçar ambientação histórica, pertencimento social e materialidade narrativa. Animadores frequentemente dependem de ajustes empíricos e iterativos nas simulações, sem dispor de referências quantitativas do movimento real de tecidos que possam orientar ou validar a animação digital. Assim, observa-se uma lacuna metodológica entre o comportamento físico real dos tecidos e sua representação computacional na animação.

Nesse contexto, investiga-se: como a comparação entre o movimento real de tecidos, obtido por captura de movimento, e sua simulação digital pode auxiliar na representação realista da dinâmica de figurinos em animações 3D?

Os resultados desta pesquisa podem ser utilizados por animadores, modeladores 3D e diretores de arte como referência para a parametrização mais coerente de tecidos em softwares de simulação, reduzindo a dependência de ajustes empíricos e iterativos. A integração entre dados reais de movimento e simulação digital também pode contribuir para fluxos de trabalho em animação que buscam maior credibilidade material em figurinos, especialmente em produções com forte componente histórico, cultural ou estilístico. Além disso, o protocolo experimental proposto pode ser reproduzido em contextos acadêmicos e de produção audiovisual, ampliando o repertório metodológico disponível para o desenvolvimento de figurinos digitais.

### 1.3 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

#### 1.3.1 Objetivo geral

Propor e aplicar um método de calibração da simulação digital de tecidos, baseado na comparação entre dados de captura de movimento óptica de tecidos reais e simulações digitais, visando à reprodução crível da dinâmica de figurinos em animações 3D.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Diante do objetivo geral apresentado podem ser sumarizados os seguintes objetivos específicos:

- i) Compreender os princípios da dinâmica de tecidos em figurinos, bem como os fundamentos da captura de movimento aplicada à animação e da simulação digital de tecidos;
- ii) Definir os materiais, os equipamentos e as condições experimentais necessários para a realização da pesquisa;
- iii) Realizar experimentos de captura de movimento óptica com os tecidos selecionados, gerando dados de referência para análise;
- iv) Comparar os dados experimentais de captura de movimento com as simulações digitais de tecidos, avaliando a correspondência entre o movimento real e o simulado.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A indústria de animação, especialmente a cinematográfica, tem sido a principal responsável pelos avanços na simulação de tecidos. No entanto, muitas das tecnologias utilizadas são desenvolvidas internamente, tornando seu funcionamento pouco conhecido. Para facilitar a criação de animações com simulações físicas realistas, existem softwares que integram diversas tecnologias. Entre os mais notáveis estão o *Houdini*, utilizado em filmes da Disney como *Zootopia* (2016) e no *Homem-Formiga* (2018) da Marvel. E a ferramenta *Fizt*, da Pixar empregada em produções como *Coco* (2017), (Tichauer, 2023).

A presente dissertação justifica-se por ter o potencial de gerar contribuições significativas tanto para a academia quanto para a indústria. Na academia, pode abrir novos caminhos de pesquisa sobre a interseção entre *MoCap* e o software de código aberto *Blender* no campo do design e da animação digital. Na indústria, os resultados podem ser aplicados em setores diversos, desde cinema, jogos, moda e museus, proporcionando um método que poderá ser eficaz e inovador para designers e animadores para garantir

consistência material e sustentar a credibilidade visual do figurino animado.

A indústria de animação tem evoluído com o avanço das tecnologias digitais, buscando realismo e qualidade visual. Tichauer (2023), afirma que um dos desafios complexos enfrentados pelos profissionais da área é a simulação precisa de roupas que devem reagir de maneira natural a movimentos e condições ambientais diversas. Tradicionalmente, essas simulações dependem de modelos matemáticos e algoritmos que, embora avançados, ainda apresentam limitações em replicar a complexidade e a sutileza do comportamento dos tecidos na vida real (Dai; Hong, 2024).

O uso de equipamentos de captura de movimentos oferece uma oportunidade para capturar dados precisos sobre como diferentes tecidos se comportam sob várias condições. Há a possibilidade, segundo Costa, Costa e Jankowitsch (2024), dos dados obtidos serem comparados e integrados com simulações geradas em softwares, permitindo uma simulação fiel e detalhada das dinâmicas de tecidos. A combinação dessas tecnologias tem o potencial de aumentar a precisão das simulações e otimizar a etapa de design, reduzindo tempo e recursos.

A justificativa deste trabalho está alinhada com as motivações da pesquisadora, que, sendo designer de moda, conhece a capacidade representativa dos tecidos, e decidiu explorar novas formas de expressão desta no contexto da animação. O contato com o laboratório de captura de movimentos óptico despertou o interesse em unir essas áreas para desenvolver uma representação realista e imersiva dos tecidos, aprimorando a experiência visual em animações e demonstrações virtuais, que podem ser feitas em filmes, redes sociais, desfiles, museus e outros ambientes virtuais.

### 1.5 ADERÊNCIA AO PPG E RELEVÂNCIA

A presente pesquisa apresenta aderência à linha de pesquisa em Mídia do Programa de Pós-Graduação em Design da UFSC ao investigar o figurino animado como mídia material e simbólica no contexto da animação digital. No campo do Design, o figurino pode ser compreendido como mídia por atuar simultaneamente como suporte material, linguagem visual e veículo de significação. O tecido, enquanto suporte sensível e expressivo, atua como mediador de informações visuais, culturais e perceptivas do personagem. A simulação digital desse comportamento constitui, portanto, um processo de transcodificação da mídia material para a mídia computacional.

Ao integrar dados de captura de movimento de tecidos reais à simulação no

*Blender*, a pesquisa aborda a inter-relação entre mídia física e mídia digital, com foco na qualificação da comunicação visual do figurino em animação. Dessa forma, o estudo contribui para o aprimoramento das mídias aplicadas ao entretenimento e à produção audiovisual, em consonância com os objetivos da linha de Mídia do PPG Design-UFSC (Programa de Pós- Graduação em Design, 2022).

A relevância social desta dissertação está em utilizar e compartilhar os dados obtidos com o sistema de captura de movimentos óptico que para ser usado envolve alto custo, o que limita seu uso em contextos acadêmicos e produções independentes, além disso, realizar as simulações no *Blender* que é um software de código aberto, reforçando a aplicabilidade da pesquisa, pois o método pode ser replicado sem custo de licença. Costa, Costa e Jankowitsch (2024), explicam que ambas as tecnologias estão em constante evolução, trazendo novas possibilidades para a animação digital e o design de personagens. E que o estudo e a aplicação dessas ferramentas são fundamentais para acompanhar os avanços da área, explorar novas metodologias e aprimorar a fidelidade visual e física das animações.

A pesquisa caracteriza-se pela não trivialidade do tema, uma vez que a captura de movimento aplicada a tecidos ainda representa um desafio na animação, devido ao comportamento flexível e dinâmico desses materiais. Além disso, o alto custo dos sistemas de captura limita seu uso em contextos acadêmicos e produções independentes. Nesse sentido, o trabalho se destaca ao investigar a aplicação da captura de movimento como referência para a simulação digital de tecidos, contribuindo para a credibilidade visual em animações.

## 1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa delimita-se à investigação da calibração da simulação digital de tecidos em contexto de animação 3D, a partir de dados reais de captura de movimento óptico. O recorte metodológico prioriza tecnologias compatíveis com o fluxo de produção de figurinos digitais em animação, excluindo abordagens baseadas em simulação aerodinâmica completa ou modelagem por dinâmica dos fluidos computacional.

A escolha da captura de movimento óptica deve-se à sua capacidade de registrar o comportamento tridimensional dinâmico de materiais flexíveis com resolução temporal adequada à análise cinemática, permitindo a obtenção de trajetórias diretamente comparáveis à simulação digital. A opção pela captura de movimento também se apoia na

disponibilidade do equipamento no Grupo de Pesquisa TecMídia da UFSC, do qual a autora participa. Outras tecnologias de captura, como sistemas inerciais ou modelagem puramente física, não oferecem o mesmo nível de observação espacial contínua do movimento do tecido.

No âmbito da simulação, a pesquisa restringe-se ao uso do software *Blender*, versão 4.5, especificamente ao modificador *cloth*, por se tratar de ferramenta amplamente empregada no campo da animação e do design de personagens. Diferentemente de softwares voltados à engenharia ou à simulação aerodinâmica de alta fidelidade, o *Blender* opera com modelos físicos aproximados, orientados à plausibilidade visual e à eficiência computacional, características coerentes com o objetivo da animação de produzir movimento crível e expressivo, e não reprodução física absoluta.

Assim, a pesquisa não busca suprir limitações do software, mas investigar como dados reais podem qualificar a parametrização dentro de um ambiente de simulação representativo da prática profissional em animação. Softwares especializados em simulação têxtil de engenharia ou em dinâmica de fluidos foram excluídos por excederem o nível de fidelidade física necessário ao problema investigado e por não refletirem o fluxo de trabalho típico do desenvolvimento de figurinos animados.

Quanto ao recorte temporal, a pesquisa foi organizada em duas fases. A Fase 1, correspondente à Revisão Teórica, foi desenvolvida entre março de 2024 e fevereiro de 2025. A Fase 2, referente à Pesquisa Experimental, foi realizada entre junho de 2024 e dezembro de 2025.

Em relação ao escopo temático, o estudo limita-se à dinâmica de tecidos aplicados a figurinos, à captura de movimento para animação e figurino e à simulação digital de tecidos para animação. Considerando a revisão bibliográfica realizada e o tempo disponível para a execução do projeto, foram selecionados quatro tecidos historicamente relevantes, linho, lã, seda e algodão, para a realização dos experimentos e para a comparação entre os resultados obtidos por captura de movimento e simulação digital (Postrel, 2020).

## 1.7 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA PESQUISA

Esta pesquisa possui natureza aplicada, com abordagem qualitativa, e apresenta objetivos de caráter exploratório e descritivo. Os procedimentos técnicos foram organizados em duas fases. A Fase 1 corresponde à revisão teórica, desenvolvida por meio

de pesquisa bibliográfica a partir de livros e artigos científicos. A Fase 2 refere-se à pesquisa experimental, na qual os tecidos analisados foram submetidos a condições controladas, permitindo a observação e a comparação dos efeitos resultantes dessas intervenções, conforme a definição de pesquisa experimental apresentada por Gil (2008).

## 1.8 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento está dividido em cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 – Introdução: fornece a contextualização do problema de pesquisa e introduz o tema. Apresenta a pergunta central que a dissertação visa responder, junto com o objetivo geral e os objetivos específicos a serem atingidos, além da justificativa e motivação do estudo. Também aborda a relevância e a adequação do projeto ao Programa de Pós-Graduação, seguidas da delimitação e caracterização geral da pesquisa, finalizando com a descrição da estrutura da dissertação.
- O Capítulo 2 – Revisão Teórica: discorre sobre o uso dinâmico de figurinos na animação; simulação de tecidos exemplos e processos; captura de movimentos.
- O Capítulo 3 – Procedimento Metodológicos: expõe os procedimentos utilizados no decorrer da pesquisa, incluindo os métodos, técnicas, equipamentos e ferramentas empregadas em cada etapa.
- O Capítulo 4 – Resultados e Discussão: são apresentados os dados obtidos, discussão dos resultados, considerações finais do capítulo.
- O Capítulo 5 – Conclusão: apresenta-se uma visão geral de conclusão do trabalho, as contribuições da dissertação, as limitações, percepções da pesquisadora e possibilidades de estudos futuros.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma fundamentação teórica sobre os principais aspectos relacionados ao uso dinâmico de figurinos na animação. Inicialmente, são abordados os aspectos históricos e culturais dos figurinos, destacando sua evolução e influência no contexto da animação. Em seguida, são analisadas animações que se destacam pelo uso realista de figurinos e então discute-se a simulação de tecidos, explorando exemplos e processos utilizados na área, além das características dos materiais que afetam seu comportamento dinâmico e os principais programas empregados para essa finalidade. Na sequência, a técnica de *MoCap* é apresentada, o tópico revela sua história, utilização e funcionamento. O capítulo se encerra com uma síntese que correlaciona esses temas, evidenciando sua importância para o aprimoramento das técnicas de animação digital de figurinos.

### 2.1 O USO DINÂMICO DE FIGURINOS NA ANIMAÇÃO

A animação é um processo dinâmico. A incorporação dessa dinamicidade na representação dos figurinos contribui significativamente para o aumento do realismo e para uma experiência mais imersiva para o público (Williams, Serghides; Aristidou, 2024). De acordo com Ingham e Covey (2024), o figurino constitui um elemento central na construção narrativa das personagens, pois é um dos primeiros recursos visuais percebidos pelo público ao observar um ator em cena. A silhueta, a proporção e os detalhes das vestimentas são capazes de comunicar, de forma imediata, informações sobre período histórico, posição social, ocupação e personalidade do personagem.

Segundo Oliveira (2021), o figurino refere-se à vestimenta utilizada por um personagem em produções teatrais, cinematográficas, televisivas, entre outras, podendo ser concebido tanto fisicamente quanto digitalmente. Ele é composto, em sua maioria, por roupas, sapatos e acessórios. A origem etimológica do termo remonta ao latim *figura*, que significa "forma", destacando a função essencial do figurino: auxiliar na construção da identidade visual e na caracterização dos personagens.

Os figurinos, por sua vez, são confeccionados a partir de tecidos, os quais são produzidos a partir de fios compostos por fibras de diferentes origens, sejam naturais,

artificiais ou sintéticas. A composição e os processos de beneficiamento empregados na fabricação dos têxteis influenciam diretamente suas propriedades, por consequência, em seu comportamento cinético, resultando em uma ampla variedade de texturas, gramaturas, espessuras, cores, estampas e demais características que conferem versatilidade e distintos usos a esses materiais (Dai; Hong, 2024).

A simulação computacional é uma das tecnologias que podem ser utilizadas para representar figurinos animados, esta funciona por sistemas computacionais que recriam o comportamento de tecidos de forma realista. De acordo com Jingyu *et al.* (2021), a tecnologia de simulação permite que um sistema imite outro, gerando um ambiente virtual tridimensional onde objetos sólidos interagem e respondem a mudanças em tempo real. Essa reprodução pode representar tanto o mundo real quanto cenários imaginados, proporcionando uma representação detalhada e dinâmica dos figurinos na animação.

Essa exibição dinâmica de roupas permite não apenas evidenciar o design e a veracidade das peças, mas também possibilita uma visão mais detalhada do caimento dos tecidos e de suas características estilísticas. Além disso, elementos ambientais, como o vento, influenciam o movimento dos tecidos, tornando a representação mais autêntica e expressiva (Huang; Huang, 2022).

Mäntylä (2025) enfatiza que, para produções realistas, o vestuário dos personagens deve refletir as características reais das roupas: textura, peso, caimento e materialidade. A escolha do tecido e dos aviamentos é fundamental, pois influencia diretamente o caimento e a textura, principais atributos de um tecido segundo a autora. O primeiro atributo depende de fatores que compõem o tecido como elasticidade, peso e espessura, que vão influenciar na silhueta, deformação e caimento da roupa pronta. O segundo é visível na superfície do tecido, em itens como cores, padrões e rugosidade. Ela defende que a simulação em tempo real é a melhor opção para alcançar o realismo, embora apresente desvantagens como maior custo computacional e imprevisibilidade. Peças dinâmicas, como capas e vestidos, se beneficiam da simulação de tecidos; já roupas ajustadas, como calças e camisetas, podem ser animadas por *rigs* ou dinâmica óssea (Mäntylä, 2025).

### **2.1.1 Aspectos históricos e culturais dos figurinos**

Desde os primeiros registros dos figurinos, que eram utilizados nas peças teatrais na Grécia Antiga, no século VI a.C., pode-se notar que existiam diferenças nos tecidos para

cada personagem, essas retratavam as questões culturais e sociais daquele tempo. Mostrando-se como um elemento fundamental para a personalização dos personagens e desenvolvimento do teatro (Oliveira, 2021).

Os figurinos desempenham um papel fundamental na comunicação visual de uma narrativa, transmitindo informações sobre personagens, temas e ambientação. De acordo com Faria (2023), além de reforçar a expressão artística, eles refletem características essenciais, como classe social, idade, sexo e nacionalidade, ajudando a construir a identidade e a personalidade das figuras representadas. Os figurinos situam o espectador em um contexto histórico ou fictício, contribuindo para a imersão na narrativa e fortalecendo a suspensão da descrença.

Os meios digitais desempenham um papel fundamental também na preservação e apresentação do patrimônio cultural, especialmente no caso de coleções têxteis e de vestuário. A digitalização de acervos permite que peças históricas, muitas vezes frágeis e suscetíveis à deterioração, sejam documentadas e disponibilizadas para pesquisa e apreciação sem o risco de danos físicos. Museus como o *Metropolitan Museum of Art* e o *National Museum of American History* já utilizam plataformas online para oferecer acesso a coleções digitalizadas, exposições virtuais e materiais multimídia complementares, ampliando o alcance e a acessibilidade desse patrimônio para o público global (Faria, 2023).

Em seu artigo, Dvořák et al. (2024) analisa que a apresentação de coleções de roupas em museus acontece online por meio de fotografias 2D, sendo por tanto, representações que raramente capturam as propriedades dinâmicas dos tecidos, limitando-se a vídeos históricos ou recriações com réplicas físicas. Algumas iniciativas recentes exploram o uso de personagens virtuais, que interagem com o público e exigem vestimentas dinâmicas para refletir com mais fidelidade os trajes históricos. Isso destaca a importância de desenvolver novas abordagens para representar digitalmente a movimentação dos tecidos, considerando seu papel na expressão cultural e social de diferentes períodos.

Pesquisas recentes mostram avatares vestidos com trajes característicos de uma determinada cultura ao executarem uma dança, a análise mostra que a maioria dos participantes prefere os avatares usando o traje típico em detrimento de outras roupas, devido aos detalhes nos figurinos, suavidade na movimentação das peças e maior realismo na ambientação. Eles ressaltam que o traje reforça a tradição e contribui para a valorização do patrimônio cultural. Além disso, a animação 3D foi amplamente reconhecida como um

meio eficaz de preservação cultural (Williams; Serghides; Aristidou, 2024).

### 2.1.2 Animações que se destacam pelo uso realista de figurinos

Os filmes apresentados a seguir foram selecionados considerando o recorte temporal estabelecido na Fase 1 (item 3.1), delimitando a análise a produções lançadas entre 2019 e 2024. A escolha desses títulos se justifica pelo fato de que apresentam atenção ao figurino como componente visual e narrativo, seja pela construção estética dos trajes, pela forma como o tecido contribui para caracterização das personagens, ou pelo uso de técnicas de simulação que reforçam o movimento e a expressividade corporal. Assim, optou-se por analisar quatro filmes que evidenciam esse cuidado: *Frozen 2* (2019), *Soul* (2020), *Encanto* (2021) e *Divertida Mente 2* (2024). Além de se inserirem no período definido, esses filmes possuem material de apoio acessível, como livros de arte, entrevistas com equipes criativas e registros de produção, o que permite uma investigação fundamentada sobre as escolhas que envolvem o figurino. A relevância de cada obra para esta pesquisa será aprofundada na análise a seguir.

*Frozen 2* lançado em 2019 é um filme da franquia *Frozen* estreado em 2013 pela Walt Disney Animation Studios. O filme conta as aventuras de Elsa e sua irmã Anna na busca por entender o que aconteceu com seus pais e os poderes de Elsa. Os figurinos de *Frozen* foram desenvolvidos a partir da integração entre técnicas tradicionais de design e tecnologias digitais avançadas, como inteligência artificial e simulações físicas para se aproximar do comportamento real dos tecidos, incluindo seu movimento, dobras e interação com a luz (Julius, 2019; Frana, Carvalho e Vieira, 2024).

Julius (2019), apresenta no seu livro sobre o filme, um compilado de informações textuais e imagéticas sobre os cenários e personagens. Foram selecionadas algumas imagens do livro para criar a Figura 1, que mostra a versão digital de um dos figurinos das personagens Elsa, Anna e Yelana, estas foram escolhidas pois havia a descrição no livro sobre os materiais utilizados em seus trajes. E em conjunto com essas imagens, na colagem, estão capturas de tela de cenas em que essas personagens aparecem com o mesmo figurino no Filme *Frozen 2*.

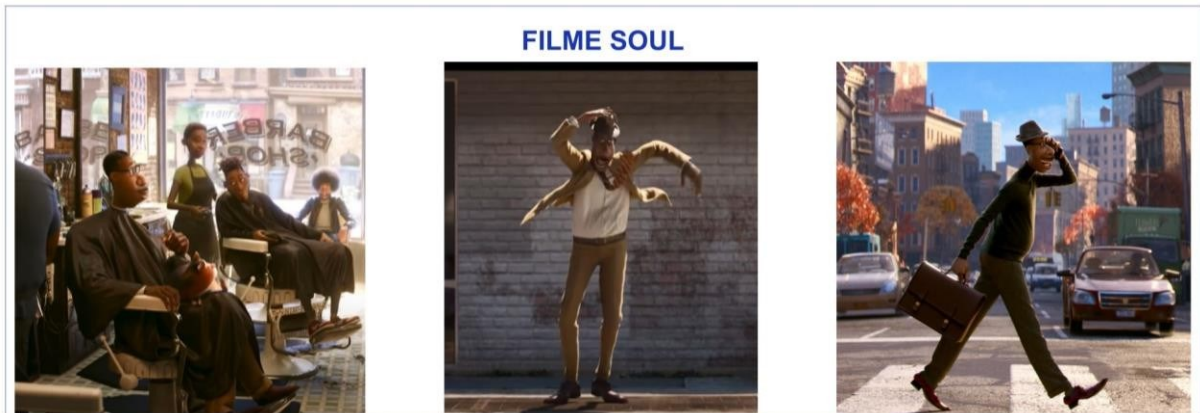
Figura 1 - Colagem do Filme *Frozen 2*.

Fonte: elaborada pela autora.

Na Figura 1, as imagens extraídas do livro sobre o filme estão posicionadas à esquerda da tela, junto com as imagens, no livro há uma descrição sobre os materiais que compõem cada figurino, Elsa usa um vestido de veludo branco com uma capa de organza; Anna possui um conjunto de diferentes tecidos em seu traje, como lã, veludo e seda; Yelena possui em seu figurino a lã como tecido principal, presente na blusa, calça e nas tiras na barra da calça, além de um casaco e cinto (Julius, 2019, tradução própria). A preocupação com a escolha e a representação dos materiais reforça a discussão apresentada nesta dissertação sobre a relevância dos tecidos em filmes que buscam credibilidade visual e a representação cultural, como é o caso de *Frozen*, que retrata elementos dos países nórdicos.

Em 2022, o filme *Soul* foi lançado pela Pixar Animation Studios. Ele retrata a busca por respostas para as questões mais profundas da existência. Conduzindo quem o assiste por um passeio pelas ruas de Nova York e pelos vastos reinos cósmicos, imagens dele estão presentes na Figura 2.

Figura 2 - Colagem do Filme Soul.



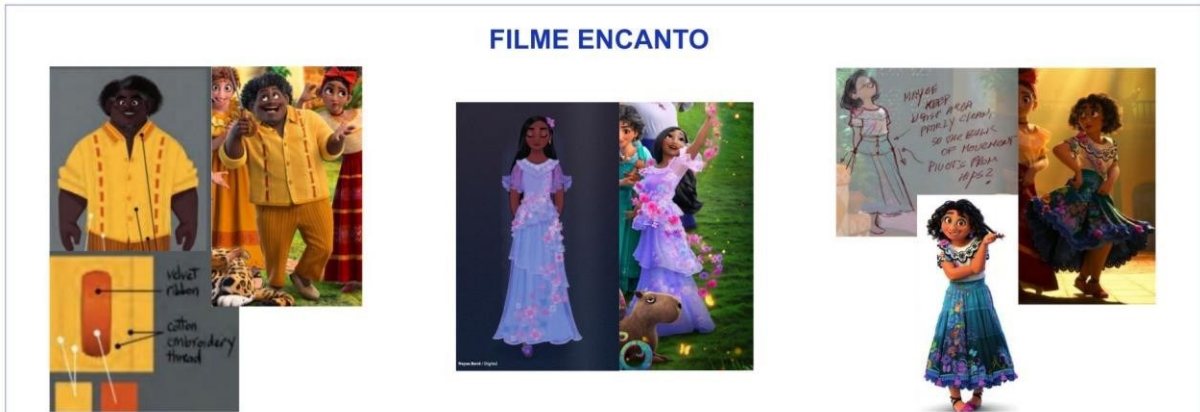
Fonte: elaborada pela autora.

*Soul* apresenta figurinos compostos por peças tradicionais do vestuário cotidiano, como ternos, gravatas, camisas, blusões, chapéus e calças, conforme ilustrado na colagem da Figura 2. O diferencial é que essas peças foram projetadas e animadas, refletindo o caimento, o peso e a movimentação do tecido de maneira coerente com o corpo e com a ação dos personagens. A análise de cenas específicas da colagem, como a capa que se acomoda sobre o corpo de Joe na barbearia, os movimentos do terno durante a dança ou o acompanhamento da calça quando ele caminha evidenciam o cuidado com o comportamento dinâmico do tecido, contribuindo para a expressividade corporal e para a construção da narrativa.

Segundo Kutt, Fong e Klohn (2021), a equipe de design de *Soul* buscou traduzir visualmente a energia improvisada do jazz, por meio de figurinos que apresentassem silhuetas vivas e dobras intencionalmente irregulares. Para alcançar esse resultado, foram realizados experimentos com o simulador de tecido, aumentando a resolução da malha, reduzindo rigidez e amortecimento, e ajustando o atrito entre roupa e corpo, permitindo que as peças criassem ondulações, amassados e rugas naturais. Dessa forma, *Soul* não apenas representa roupas cotidianas, mas as integra à dramaturgia, utilizando o movimento do tecido como elemento de caracterização e reforço narrativo.

*Encanto* é o nome do filme que estreou em 2021, uma produção da Walt Disney Animation Studios. Tendo a Colômbia como inspiração principal, ele conta sobre a família Madrigal e a magia que cerca sua casa e os integrantes de sua família que tem dons únicos, exceto por Mirabel, que mesmo sem apresentar essa magia, encara o perigo para salvar os poderes de sua família. Mirabel e outros personagens aparecem na Figura 3.

Figura 3 - Colagem do Filme Encanto.



Fonte: elaborada pela autora.

Como mostrado na Figura 3, o primeiro conjunto de imagens refere-se ao personagem Félix. As imagens em fundo cinza, retiradas do livro *The Art of Encanto* (2021), apresentam o design do personagem com indicações dos materiais utilizados em seu figurino, como o algodão (“cotton”). Ao lado, há um recorte do filme, permitindo observar seu figurino na versão final animada.

No segundo conjunto, referente à personagem Isabela, observa-se no registro do livro a descrição dos designers indicando o uso de organza de seda com chiffon de seda e acabamento em cetim. Na comparação com a imagem do filme, nota-se um caimento mais leve e fluido, distinto da estrutura mais encorpada do algodão utilizado no figurino de Félix.

Por fim, o conjunto referente à personagem Mirabel evidencia a preocupação com o caimento da saia já no processo de design, indicado por setas que mostram a direção prevista do movimento do tecido. A imagem digital finalizada apresenta o figurino em repouso, enquanto a imagem do filme demonstra o movimento da saia durante a dança. A representação do comportamento dos tecidos em movimento contribui diretamente para a expressividade visual do filme, reforçando traços culturais colombianos por meio de escolhas materiais e da simulação dinâmica do vestuário (Reyes Lancaster-Jones, 2022).

Em 2024, a Disney e a Pixar lançaram *Divertida Mente 2*, sequência do filme *Divertida Mente*, lançado em 2015. A animação acompanha a trajetória da jovem Riley e a transformação de suas emoções com a chegada da adolescência. Cada emoção é representada por um personagem cuja caracterização visual, incluindo cores, formas e texturas contribui para a construção da narrativa. Esses elementos podem ser observados na

Figura 4.

Figura 4 - Colagem do Filme Divertida Mente 2.



Fonte: elaborada pela autora.

Os figurinos em *Divertida Mente 2* desempenham um papel fundamental na construção visual dos personagens e no enriquecimento das cenas (Pixar, 2025). Figura 4, é possível observar alguns desses elementos em destaque. A colagem se inicia com o personagem Vergonha que é retratado vestindo um moletom, que ele ajusta ao máximo quando se sente constrangido, reforçando visualmente sua timidez. Riley, por sua vez, é mostrada praticando seu esporte favorito, evidenciando a riqueza de detalhes nos figurinos e as diferenças de caimento entre os materiais utilizados. Essa mesma atenção a representação do material têxtil pode ser observada na cena em que Riley está sentada, vestindo seu casaco azul.

A imagem mais afasta à direita da Figura 4 mostra a personagem Ansiedade, com sua blusa de gola alta, ajustada ao pescoço, que intensifica a sensação de angústia, a personagem puxa a gola da blusa e a mesma faz um movimento semelhante ao que acontece quando um tecido real é esticado. O mesmo ocorre com o caimento da manga que possui uma modelagem boca de sino, no braço que está erguido o tecido acompanha o movimento, enquanto no que está em repouso, o tecido permanece no lugar.

Em suma, os filmes de animação escolhidos para esta análise exemplificam o uso realista de figurinos no cinema animado, refletindo não apenas o avanço das tecnologias de animação, mas também uma crescente valorização da representação visual autêntica das roupas e tecidos. Esses filmes foram sucessos de bilheteria e oferecem uma amostra de como os figurinos podem desempenhar um papel crucial na construção de mundos imaginários, ao mesmo tempo que mantêm uma fidelidade estética e técnica aos materiais

e movimentos que compõem a vestimenta humana.

## 2.2 SIMULAÇÃO DE TECIDOS EXEMPLOS E PROCESSOS

A simulação de tecidos constitui um campo interdisciplinar que integra computação gráfica, modelagem física, captura de movimento e, mais recentemente, aprendizado de máquina. Diferentes abordagens têm sido propostas com objetivos variados, como prova virtual de roupas, animação de personagens, estimativa de parâmetros físicos, renderização de aparência e aplicações em realidade virtual. De modo geral, esses métodos podem ser organizados em três grandes grupos: (i) simulações baseadas em física, que modelam explicitamente forças e propriedades mecânicas dos tecidos; (ii) abordagens orientadas por dados e aprendizado de máquina, que aprendem deformações a partir de exemplos; e (iii) métodos híbridos, que combinam simulação física e captura de movimento ou redes neurais. Os trabalhos apresentados a seguir ilustram esse panorama, evidenciando avanços e limitações das diferentes estratégias de simulação de tecidos no contexto de vestuário digital e animação.

O projeto de Santesteban, Otaduy e Casas (2019), é um modelo para simular a prova virtual de roupas, as peças são animadas a partir de um banco de dados nutrido com simulações físicas de personagens vestidos, abrangendo diferentes formas corporais e animações. Em seguida, esse banco de dados é utilizado para treinar um modelo que aprende a reproduzir o caimento do tecido com base na forma e nos movimentos do corpo, permitindo uma representação realista do vestuário em ambientes virtuais.

*SimulCap* é um sistema proposto por Yu *et al.* (2019), que combina captura de movimentos e simulação baseada em física para rastrear, em tempo real, tanto o corpo humano quanto as roupas, utilizando uma única câmera. O sistema, emprega uma representação multicamadas que separa o movimento do tecido do corpo, garantindo que a dinâmica do vestuário respeite restrições físicas. Para a simulação, o método utiliza um modelo massa-mola baseado em força, que calcula a interação entre os vértices do tecido e forças externas como a gravidade.

Patel, Liao e Pons-Moll (2020), desenvolveram um modelo neural chamado de *TailorNet*, este prevê a deformação de roupas em 3D com base na pose, forma corporal e estilo da vestimenta, aprendendo a partir de simulações baseadas em física. Diferente das abordagens tradicionais, que exigem ajustes manuais e são computacionalmente caras, o *TailorNet* decompõe as deformações das roupas nesses três fatores, permitindo animações

contínuas e eficientes. Ele mantém os detalhes das rugas presentes nas simulações físicas, mas com um processamento mais rápido. Os resultados não modelam a dinâmica, dessa forma acabam sendo suaves e carecem de realismo.

O estudo de Ju e Choi (2020), propõe um método baseado em redes neurais para estimar parâmetros de simulação de tecidos a partir de drapeados estáticos, sem a necessidade de equipamentos caros. Utilizando variáveis de métodos empregados na indústria têxtil, a rede neural aprende a relacionar a forma do tecido com suas propriedades mecânicas, como elasticidade, cisalhamento e rigidez à flexão. Comparado a abordagens tradicionais de otimização, o método reduz significativamente o tempo de ajuste e demonstra alta precisão na simulação dos tecidos.

Jingyu *et al.* (2021), apresentam uma plataforma de simulação virtual para vestuário infantil, desenvolvida em parceria com a empresa Fantasy Engine e baseada em aprendizado de máquina. A tecnologia combina modelagem 3D, computação gráfica e realidade virtual para criar uma representação imersiva das roupas. O sistema utiliza um modelo físico que simula as propriedades elásticas e de flexão dos tecidos, enquanto um corpo humano virtual tridimensional é gerado a partir de escaneamento 3D. Com essa abordagem, é possível visualizar dinamicamente o caimento das roupas.

*Dynamic Neural Garments* é um método de Zhang *et al.* (2021), que propõe uma abordagem baseada em redes neurais para simular e renderizar dinamicamente a aparência de vestimentas em personagens 3D sem a necessidade de simulações físicas tradicionais. Utilizando dados de movimento das articulações do avatar, o sistema aprende a sintetizar deformações realistas em vestimentas soltas, conciliando o movimento geral com detalhes finos por meio de um renderizador neural. Após o treinamento, o modelo gera imagens em tempo real, reduzindo significativamente o tempo de processamento em comparação com outras ferramentas.

Bertiche, Madadi e Escalera (2022), apresentam um método para a animação de vestuário baseado em aprendizado profundo não supervisionado, eliminando a necessidade de dados reais e simulações físicas tradicionais. A abordagem propõe uma estrutura neural para simular a dinâmica de tecidos, garantindo realismo em tempo real e tornando-se uma alternativa eficiente para aplicações em videogames e realidade virtual/aumentada. O modelo aprende as características físicas das vestimentas, ajustando fatores como gravidade e rigidez do tecido, permitindo simulações mais rápidas e flexíveis.

*SNUG* é um método que permite o treinamento auto supervisionado de vestimentas neurais 3D dinâmicas sem a necessidade de dados reais, utilizando um modelo

de deformação baseado em física reformulado como um problema de otimização. Essa abordagem substitui a tradicional simulação quadro a quadro por um processo de aprendizado eficiente, acelerando o tempo de treinamento. O método combina princípios físicos e técnicas de aprendizado para capturar deformações dinâmicas e rugas finas com alta fidelidade, ajustando parâmetros do material para obter comportamentos realistas do tecido. Permitindo modelos mais simples, menores e precisos para aplicações em design, experimentação virtual e jogos (Santesteban; Otaduy; Casas, 2022).

O modelo *PGN-Cloth* proposto por Peng *et al.* (2023), utiliza redes neurais de grafos para simular tecidos 3D de forma mais realista, combinando aprendizado profundo baseado em física com modelos massa-mola. Essa abordagem busca corrigir limitações de métodos anteriores, que geravam animações implausíveis e com problemas de penetração. Para isso, o *PGN-Cloth* emprega restrições físicas, garantindo maior precisão na dinâmica dos tecidos. O modelo apresenta melhor desempenho em roupas ajustadas, enfrentando desafios com vestimentas mais soltas devido à complexidade da física envolvida, ele reduz significativamente a incidência de erros e melhora a eficiência do treinamento.

Um outro estudo investigou métodos para captura e simulação de tecidos em animação 3D, destacando as limitações da fotogrametria na digitalização de vestimentas tradicionais devido à dificuldade em separar camadas e animá-las de forma independente. Como alternativa, os autores optaram pela modelagem e simulação baseada em física no *Autodesk Maya*, que permite maior controle sobre as propriedades dos tecidos, como elasticidade e comportamento dinâmico. Essa abordagem resultou em trajes virtuais mais realistas, superando desafios como colisões e deformações complexas. Além disso, a animação do traje exigiu técnicas de pós-processamento para simular adequadamente o movimento do tecido (Williams; Serghides; Aristidou, 2024).

O método apresentado por Dvořák *et al.* (2024), combina fotogrametria e simulação de tecido para criar modelos 3D digitais de roupas e objetos históricos, permitindo sua exibição em movimento sem a necessidade de manipulação física. Inicialmente, centenas de fotos são capturadas para gerar um modelo estático, que é então refinado no *Marvelous Designer* para ajuste e simulação do comportamento do tecido. A animação ocorre no *Unreal Engine 5*, onde a física do tecido é otimizada por meio de modelos *proxy*, detecção de colisão e máscaras de restrição de movimento. O aplicativo *Virtual Wardrobe* permite a inspeção detalhada das peças com realismo dinâmico, enquanto o *Virtual Mirror* veste visitantes virtualmente por meio de câmeras de profundidade, promovendo interatividade e imersão na experiência museológica.

Um outro método combina otimização global e redes neurais para estimar parâmetros de simulação de tecido de forma mais eficiente. Enquanto a otimização global oferece flexibilidade na definição de variáveis e funções objetivas, seu alto custo computacional a torna impraticável. Já as redes neurais permitem estimativas rápidas, mas apresentam desafios como a necessidade de grandes conjuntos de dados. Para superar essas limitações, o método substitui a simulação tradicional por uma rede neural pré-treinada que infere os resultados da simulação e reconstrói rapidamente a forma 3D de cortinas. Essa abordagem reduz significativamente o tempo de computação, tornando a simulação de tecidos mais acessível e eficiente (Ju et al., 2024).

Os métodos tradicionais baseados em física conseguem simular as características das vestimentas, como elasticidade e gravidade, garantindo animações realistas. No entanto, seu alto custo computacional dificulta a aplicação em tempo real. Já as abordagens baseadas em dados aprendem a partir de deformações pré-existentes e geram animações rapidamente, mas enfrentam dificuldades para capturar variações sutis e manter o realismo dos movimentos (Miao et al., 2024).

O Quadro 1 foi elaborado a partir da análise dos trabalhos revisados nesta seção, com o objetivo de sintetizar e comparar as principais abordagens de simulação de tecidos aplicadas ao vestuário digital e à animação. Foram considerados estudos representativos publicados entre 2019 e 2024 que apresentam métodos computacionais para modelagem, deformação ou simulação dinâmica de roupas ou tecidos em ambientes tridimensionais. Para cada trabalho, identificaram-se: o tipo de abordagem adotada (baseada em física, orientada por dados ou híbrida), o objetivo principal da pesquisa, o grau de ênfase na dinâmica realista do tecido e as limitações relatadas pelos próprios autores ou observadas na análise comparativa. Essa sistematização permitiu evidenciar tendências metodológicas na área, bem como lacunas relacionadas à integração entre dados reais de movimento de tecidos e simulação aplicada ao figurino animado, aspecto que fundamenta a proposta desta pesquisa.

Quadro 1 – Trabalhos fichados sobre simulação de tecidos.

<b>Métodos de simulação de tecidos em vestuário digital e animação</b>				
<b>Trabalho</b>	<b>Abordagem</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Dinâmica realista</b>	<b>Limitações</b>
Santesteban et al. (2019)	Baseado em dados + simulação física	Prova virtual de roupas	Alta	Dependência de banco de dados
Yu et al. (2019) – SimulCap	Física + MoCap	Rastreamento corpo-tecido em tempo real	Alta	Modelo massa-mola simplificado
Patel et al. (2020) – TailorNet	Aprendizado de máquina	Deformação de roupas por pose	Média	Não modela dinâmica
Ju & Choi (2020)	Rede neural	Estimar parâmetros de tecido	Indireta	Baseado em drapeado estático
Zhang et al. (2021) – Dynamic Neural Garments	Neural	Aparência dinâmica	Média	Dependência de treino
Jingyu et al. (2021)	Aprendizado de máquina + modelagem 3D + realidade virtual	Vestuário virtual infantil	Alta	Plataforma proprietária
Bertiche et al. (2022)	Aprendizado profundo	Dinâmica em tempo real	Alta	Sem dados reais
Santesteban et al. (2022) – SNUG	Neural + física	Vestimentas dinâmicas	Alta	Complexidade
Peng et al. (2023) – PGN-Cloth	GNN + física	Simulação realista	Alta	Dificuldade em roupas soltas
Williams et al. (2024)	Física (Maya)	Trajes 3D animados	Alta	Pós-processamento
Dvořák et al. (2024)	Fotogrametria + física	Roupas históricas	Alta	Pipeline complexo
Ju et al. (2024)	Neural + otimização	Cortinas	Alta	Dados extensos

Fonte: elaborada pela autora, com base em Santesteban et al. (2019); Yu et al. (2019); Patel et al.

(2020); Ju e Choi (2020); Zhang et al. (2021); Jingyu et al. (2021); Bertiche et al. (2022); Santesteban et al. (2022); Peng et al. (2023); Williams et al. (2024); Dvořák et al. (2024); Ju et al. (2024).

Observa-se que, embora existam avanços significativos na simulação de vestimentas, grande parte dos métodos prioriza aplicações como prova virtual, jogos ou reconstrução visual, havendo menor ênfase na comparação direta entre movimento real de tecidos e simulação física aplicada à animação. Nesse contexto, a presente pesquisa se insere ao investigar a correspondência entre dados de captura de movimento de tecidos reais e sua simulação em ambiente 3D, com foco na credibilidade do figurino animado.

### **2.2.1 Características dos tecidos que influenciam o comportamento dinâmico**

As propriedades físicas e mecânicas dos tecidos estão entre as características que desempenham um papel fundamental na aparência e no comportamento dinâmico das vestimentas. Huang e Huang (2022), destacam entre os parâmetros físicos utilizados para simulação, o alongamento, o cisalhamento, a flexão, o enrugamento e a densidade, sendo esta última especialmente relevante, pois o peso do material afeta diretamente o drapeado. A densidade de um material pode ser calculada pela relação entre sua massa e área, e tecidos com maior densidade ou menor rigidez tendem a apresentar uma queda mais acentuada (Ju; Choi, 2020).

Bertiche, Madadi e Escalera (2022), reiteram que a rigidez do tecido também influencia o grau de alongamento na direção da gravidade, com materiais menos rígidos apresentando maior deformação. Além disso, roupas mais soltas, como saias e vestidos, exibem uma dinâmica física complexa no decorrer do movimento, tornando-se um desafio para métodos estáticos que não conseguem modelar com precisão esse tipo de comportamento (Peng et al., 2023). Portanto, a combinação entre propriedades físicas e mecânicas é essencial para a criação de simulações que representem fielmente a interação entre o tecido e o movimento do corpo.

As propriedades mecânicas dos tecidos são influenciadas por diversos fatores, incluindo o material da fibra bruta, a estrutura do fio e do tecido, além de tratamentos químicos ou mecânicos aplicados ao material. Essas características diferenciam os tecidos planos dos tecidos de malha, devido às particularidades em sua fabricação, na forma e no movimento dos fios, bem como na maneira como eles se entrelaçam. Essas distinções

resultam em variações na aparência e no desempenho dos materiais (Pezzolo, 2021).

Outros parâmetros que podem ser analisados são tensão uniaxial e biaxial, cisalhamento sob tensão, flexão pura, compressão lateral e longitudinal, flambagem, rugosidade da superfície e atrito. O atrito, embora relevante para interações entre o tecido e outros materiais durante a animação, tem impacto limitado na definição do caimento de uma vestimenta (Dai; Hong, 2024).

As características físicas e mecânicas dos tecidos que influenciam seu comportamento dinâmico podem ser organizadas em parâmetros estruturais, de massa e de rigidez/deformação, os quais são utilizados em modelos de simulação de vestimentas. O Quadro 2 sistematiza essas propriedades, suas definições e formas usuais de mensuração na literatura têxtil e de computação gráfica.

Quadro 2 – Propriedades dos tecidos e comportamento dinâmico.

<b>Propriedades dos tecidos que influenciam o comportamento dinâmico em vestuário e simulação</b>			
<b>Propriedade</b>	<b>Definição</b>	<b>Influência no comportamento dinâmico</b>	<b>Forma de mensuração</b>
Densidade superficial (massa/área)	Massa por unidade de área do tecido	Determina peso e caimento	Pesagem e cálculo massa/área
Rigidez à flexão	Resistência à curvatura	Controla dobras e ondulações	Ensaio de flexão
Rigidez ao cisalhamento	Resistência à deformação angular	Afeta torção e deformação lateral	Ensaio de cisalhamento
Alongamento (tração)	Deformação sob tensão	Influencia extensão sob peso/vento	Ensaio de tração
Compressibilidade	Redução de espessura sob pressão	Afeta volume e enrugamento	Ensaio de compressão
Atrito superficial	Resistência ao deslizamento	Interação entre camadas	Ensaio de atrito
Estrutura do tecido	Organização dos fios	Define a mobilidade	Análise estrutural
Tipo de fibra	Natureza do material	Elasticidade, massa e flexibilidade	Identificação material

Fonte: adaptado de Huang e Huang (2022); Ju e Choi (2020); Bertiche et al. (2022); Pezzolo (2021).

Pezzolo (2021), explica que os tecidos naturais possuem propriedades físicas e sensoriais que influenciam seu comportamento visual e dinâmico. O linho, com fibras longas e pouco elásticas, é firme, mas pode romper sob tensão. O algodão combina resistência e flexibilidade, proporcionando movimentos suaves. A lã varia conforme a fiação: tecidos cardados são mais macios, enquanto os penteados são mais lisos e com menor propensão a amassar em comparação a outros têxteis. Já a seda, distingue-se por sua finura, leveza, elasticidade e flexibilidade, podendo apresentar diferentes comportamentos táteis e visuais. Ressalta-se ainda que, diferentemente das demais fibras naturais, predominantemente curtas, a seda é formada por fibras contínuas, o que contribui para suas propriedades singulares.

### 2.2.2 Programas utilizados para simulações de tecidos

O desenvolvimento de figurinos deixou de se restringir aos métodos tradicionais de desenho, uma vez que os softwares passaram a possibilitar tanto a criação quanto a replicação digital dos esboços. Com a ampla difusão dos computadores e de programas específicos para modelagem e edição em ambientes bidimensionais e tridimensionais, os meios digitais tornaram-se ferramentas essenciais para o design de figurinos. A popularização dos softwares 3D para simulação de tecidos e figurinos também acompanhou o avanço dos efeitos visuais na indústria cinematográfica, especialmente a partir da década de 1990, consolidando seu uso na produção digital de vestimentas (Oliveira, 2021).

A indústria de animação, especialmente a cinematográfica, tem sido a principal responsável pelos avanços na simulação de tecidos. No entanto, muitas das tecnologias utilizadas são desenvolvidas internamente, tornando seu funcionamento pouco conhecido. Para facilitar a criação de animações com simulações físicas realistas, existem softwares que integram diversas tecnologias. Entre os mais notáveis estão o *Houdini*, utilizado em filmes da Disney como *Zootopia* (2016) e no *Homem-Formiga* (2018) da Marvel. E a ferramenta *Fizt*, da Pixar empregada em produções como *Coco* (2017), (Tichauer, 2023).

Jingyu *et al.* (2021), em seu trabalho sobre “*Simulação virtual de vestuário infantil design imersivo e show baseado em aprendizado de máquina*” apresentou uma tabela na qual listou os softwares mais utilizados pela indústria para o design de vestimentas. São eles: *Dressing SIM* do Japão; *Clo3D* da Coreia; *Marvelous Designer* da

Coreia; *STYLE3D* da China; *Optitex* de Israel; *Assyst GmbH Vidya* da Alemanha; *Browzwear* de Singapura e *Vsticher* dos Estados Unidos. Na sequência do texto pode-se conhecer mais a fundo sobre os softwares acima que também se destacam na utilização pela indústria de entretenimento.

O software *Clo3D* criado na Coreia se destaca atualmente por ser um dos mais integrados para simulação virtual do vestuário em animações, jogos e na área da moda. Lançado em 1992, o software tridimensional permite visualizar de forma dinâmica as alterações que ocorrem nos tecidos das roupas. Uma de suas principais funcionalidades é a digitalização do tecido que permite a definição das propriedades que o compõem. Ele também possibilita a configuração de cenários virtuais, incluindo ajustes de fundo, iluminação e contraste, criando um ambiente realista para simulação (Jingyu et al., 2021).

O processo de design dentro do software de acordo com Huang e Huang (2022), ocorre em quatro fases: a primeira é a de *layout* estrutural, na sequência acontece a costura 3D, após o enchimento de tecido e por fim a exibição dinâmica. Sua tecnologia permite a rápida modificação das propriedades físicas e texturais dos tecidos, gerando variações de figurinos em tempo real. O *Clo3D* também funciona como um sistema de *Computer Aided Design* (CAD), combinando ferramentas de desenho de padrões e ajuste virtual dentro de uma única interface. No entanto, apesar de sua capacidade de gerar simulações de alta qualidade, a obtenção de deformações realistas da roupa em tempo real ainda representa desafios técnicos.

O *Clo3D* apresenta algumas limitações que impactam sua usabilidade. O software possui um número reduzido de tecidos predefinidos, exigindo tempo e ajustes manuais para obter resultados mais precisos. Além disso, a captura de texturas por meio de fotos permite apenas o mapeamento difuso, limitando a fidelidade visual. Outro ponto de melhoria é o modelo padrão do software, considerado pouco atraente, o que demanda a importação de modelos 3D externos, exigindo dos designers conhecimento prévio em outros softwares de modelagem (Jingyu et al., 2021).

Zhang *et al.* (2021), explicam que o software *Marvelous Designer* foi desenvolvido pela mesma empresa do *Clo3D*, mas é utilizado principalmente na criação de figurinos para animação, videogames e computação gráfica. Se destacando por sua integração com softwares de modelagem 3D, como *3DMax*, *Maya* e *Blender*, além de oferecer recursos específicos para otimização de malha e aprimoramento da superfície dos modelos tridimensionais. Seu fluxo de trabalho busca a similaridade com o mundo real, desde a modelagem baseada em padrões de costura reais até a simulação física e

renderização. No entanto, alcançar o realismo pode ser um processo demorado e caro, exigindo precisão na modelagem e na simulação dos tecidos.

O *Marvelous Designer* tem sido uma ferramenta essencial para profissionais que desejam criar roupas digitais de maneira rápida e intuitiva. A interface do software permite que até mesmo usuários sem conhecimento avançado em design de vestuário produzam figurinos básicos em poucos minutos. No entanto, ele possui limitações quando comparado ao *Clo3D*, destaca-se as diferenças nos ajustes e na renderização. Embora a estrutura das roupas geradas pelo software nem sempre seja totalmente realista, sua capacidade de simular a física dos tecidos e restaurar propriedades de caimento com precisão faz dele uma ferramenta poderosa para a criação de vestuário digital (Van Dyk, 2024).

Outros programas que merecem aparecer neste tópico e serão apresentados no decorrer do texto, são o *Unity* e o *Unreal Engine*, ambos possuem formas de uso gratuitas e um conjunto essencial de ferramentas, embora limitado, para simulação de tecidos baseado no modelo de massa e mola (Tichauer, 2023).

O *Unity* é um ambiente para desenvolvimento e gerenciamento de conteúdo interativos tridimensionais em tempo real. Atualmente, o *Unity3D* é amplamente utilizado na simulação de vestuário e no ajuste virtual de roupas (Jingyu et al., 2021).

Desenvolvido pela Epic Games, o *Unreal Engine* a partir da análise de Van Dyk (2024), é um dos programas gráficos mais avançados para a criação de videogames. Com o passar dos anos, o software expandiu seu uso para diversas indústrias, como cinema, TV, arquitetura e automotiva, tornando-se uma ferramenta versátil, considerada por muitos a mais potente para a criação de conteúdo interativo em 3D em tempo real. O *Unreal Engine* conta com um sistema de física robusto, permitindo simulações detalhadas de iluminação, sombras e materiais, o que o diferencia de outros programas de modelagem e renderização, como *3D Studio Max* e *Maya*.

Na área de simulação de tecidos, o *Unreal Engine* possui ferramentas básicas e permite a integração de plugins externos, como o *uDraper*, que viabiliza que simulações de tecidos sejam feitas de forma instantânea. A possibilidade de aprimorar a simulação física com sistemas externos permite que desenvolvedores e designers explorem novas formas de representação e interatividade em projetos de figurino digital (Tichauer, 2023). Com a chegada do *Unreal Engine 5*, Dvořák et al. (2024), expressam que o software passou a oferecer renderização com mais detalhes, permitindo a criação de simulações realistas de tecidos, tornando-o adequado para ser empregado em vestuário dentro de ambientes interativos e dinâmicos.

### 2.2.3 Simulação de tecido no software de código aberto *Blender*

O *Blender* é um software de código aberto, o que, segundo Villar (2021), significa que seu código é disponibilizado de forma gratuita para todos que desejam colaborar com o desenvolvimento da ferramenta. Isso foi possível graças ao seu criador, Ton Roosendaal, que desde o início, na década de 1990, arrecadava doações de usuários com o intuito de tornar o software livre, isso foi concretizado em 2002. Ao longo dos anos, novas versões do *Blender* foram lançadas, otimizando cada vez mais sua capacidade de desenvolvimento.

De acordo com a documentação técnica do *Blender*, a simulação de tecido é descrita como um processo complexo, uma vez que sofre influências tanto de interações ambientais (como o vento) quanto internas (colisões com outros objetos). Segundo o Manual do *Blender* (2025), o sistema de simulação atual é resultado de anos de pesquisa e pode ser aplicado a objetos ou roupas. O tecido é definido como uma malha, aberta ou fechada, à qual se atribui o modificador *Cloth*. O manual ressalta que simulações mais precisas são obtidas com malhas fechadas, especialmente para corpos moles. As opções de simulação podem ser acessadas na guia de propriedades físicas (Blender, 2025).

No *Blender*, encontram-se predefinições preenchidas para cinco tipos de tecidos, são eles: algodão, denim, couro, borracha e seda. Pode-se acessá-las clicando em “tecido” e depois em “predefinições de tecido” dentro do guia de propriedades físicas. Não há no manual ou site informações sobre como essas predefinições foram elaboradas. O usuário pode realizar alterações nos valores presentes nos campos. A Figura 5 foi criada a partir da captura de tela dos valores principais de cada tecido e é possível visualizar a diferença entre eles.

Figari Barberis (2020), em sua dissertação, implementou um fluxo de simulação de cabelos e tecidos em uma animação independente, descrevendo os principais parâmetros físicos do *Blender*: massa, viscosidade do ar, modelo de dobra, grupo de pinos, rigidez, costura, fator de encolhimento, malha dinâmica e colisões. Além disso, citou os complementos como o *Modeling Cloth* (simulação avançada com *Python*) e o *Cloth Weaver* (voltado à criação de roupas, mais utilizado para design do que simulação física).

Figura 5 - Predefinições tecidos *Blender*.

Fonte: elaborada pela autora.

No Manual 5.0 do *Blender* (2025), a descrição da simulação da física dos tecidos no sistema, diz que a mesma se dá a partir de um conjunto de quatro molas virtuais que fazem a conexão dos vértices da malha principal, controlando as dobras do tecido. Cada mola possui uma função que é aplicada no tecido, a mola de tensão faz o controle da rigidez, a mola de compressão determina a força que precisa ser aplicada para comprimir o mesmo. A mola de cisalhamento possui função similar à de compressão, mas controla como os ângulos são deformados. O controle da resistência do material em características como amassar e dobrar é feita pela mola de dobra angular. Esses e outros requisitos se encontram no painel de propriedades físicas e podem ser manipulados de forma individual. Existe a necessidade de pontuar que esses processos precisam de um computador potente para um bom desempenho.

A simulação de tecidos no *Blender*, de acordo com Villar (2021), permite criar desde lençóis até roupas complexas, possibilitando o controle do movimento do tecido sob a ação da gravidade ou de obstáculos. O sistema reage em tempo real, permitindo, por exemplo, que o usuário interaja diretamente com o tecido durante a reprodução. Caso seja necessário que o objeto mantenha rigidez, é possível combiná-lo com o sistema de corpos rígidos. A principal diferença entre corpos rígidos e macios é que os últimos podem se deformar.

Figari Barberis (2020) esclarece que a simulação de tecidos pode ser feita por corpos macios, já que estes são empregados na simulação de itens deformáveis, podendo

interagir com eles mesmos ou com outros objetos e reagir a forças externas. Ela ainda fala sobre a diferença na aplicação das forças, os vértices recebem a aplicação da gravidade e as arestas da aerodinâmica, como a força do vento. A dinâmica dos tecidos envolve molas virtuais que simulam o comportamento físico do material, esticando e comprimindo o tecido conforme necessário.

Kogut (2023) explica que, no *Blender*, a simulação pode ser acessada tanto pela guia física e nela há uma seção chamada de tecido, quanto pelo painel de modificadores e lá também estará a simulação de tecidos. O autor destaca que os métodos de integração numérica estão divididos em quatro categorias: implícito, explícito, alta ordem e baixa ordem e que a escolha deste método é determinante para o desempenho e a qualidade que a simulação vai ter, mas que até o momento dos testes os softwares não permitem que os usuários escolham qual método será utilizado. Uma das escolhas que os softwares permitem fazer é a do número de etapas que a simulação terá, o autor explica que na maioria dos casos, as simulações com mais etapas, oferecem resultados mais precisos, por consequência, o tempo de cálculo será mais lento.

O controle da forma do tecido pode ser feito por grupos de vértices fixos, definidos por áreas de pintura de peso. Outro método é o sistema de costura, que utiliza molas para conectar vértices de diferentes partes da malha, simulando costuras realistas. A malha dinâmica é uma ferramenta que possibilita animar a forma que resta do tecido por meio de chaves ou modificadores. Recomenda-se o uso dela para a construção de cenas realistas (Blender, 2025).

Lotter (2022) apresenta fluxos de produção que envolvem simulações, rastreamento e geometria no *Blender*. O autor enfatiza a importância da simulação de tecidos para agregar realismo às cenas 3D, dedicando um capítulo específico ao tema. Ele destaca a necessidade de explorar os parâmetros e salvar o projeto continuamente, pois pequenas alterações podem gerar resultados expressivos. Lotter observa ainda que o aumento da quantidade de polígonos melhora a qualidade da simulação, embora torne o processo mais lento.

Kubista et al. (2024) desenvolveram um fluxo de trabalho para réplicas digitais de vestes históricas no Museu da Cidade de Praga. Os autores destacam que representar o movimento realista das roupas auxilia na compreensão do contexto histórico. O software *Blender* foi utilizado pela sua capacidade de modelagem 3D, manipulação de texturas, mapas e topologias, e pela ferramenta de pintura de tecido, que permite definir máscaras de distância entre o corpo e a roupa, otimizando o cálculo físico. Foram simuladas apenas as

peças mais soltas, como saias e capas, enquanto as demais seguiram a animação do corpo.

Ao analisar a simulação de tecidos do *Blender* e seus principais recursos, comparando-o com outros softwares do mercado, Kogut (2023) conclui que os recursos do *Blender* são equivalentes aos de programas pagos. Ele observa que a simulação física é essencial para alcançar efeitos realistas, mas depende de hardware potente. Várias experiências foram feitas e alguns resultados principais foram: o tempo da execução varia conforme a densidade da malha e o número de polígonos, quanto maior a densidade, maior o cache e o tempo de cálculo. O pesquisador também aponta que o *Blender* permite controlar parâmetros internos como amortecimento, rigidez, flexão e compressão, além de oferecer materiais predefinidos e modelos de flexão, semelhantes aos do *Autodesk*. As simulações são armazenadas em cache e recalculadas automaticamente após modificações.

Com base nas funcionalidades e avanços apresentados, o *Blender* demonstra ser um exemplo de como o desenvolvimento colaborativo pode resultar em tecnologias sofisticadas e acessíveis. A simulação de tecidos dentro do software permite explorar relações entre materialidade, forma e movimento, aproximando os processos digitais da experiência física do tecido real. Além de ser uma ferramenta técnica, o *Blender* se configura como um meio de experimentação estética e científica, permitindo compreender como diferentes propriedades têxteis podem ser traduzidas em linguagem visual e dinâmica. Assim, o uso do software neste estudo reforça a importância de integrar ferramentas abertas às investigações em design, especialmente na busca por representações mais fiéis e expressivas dos figurinos em animação.

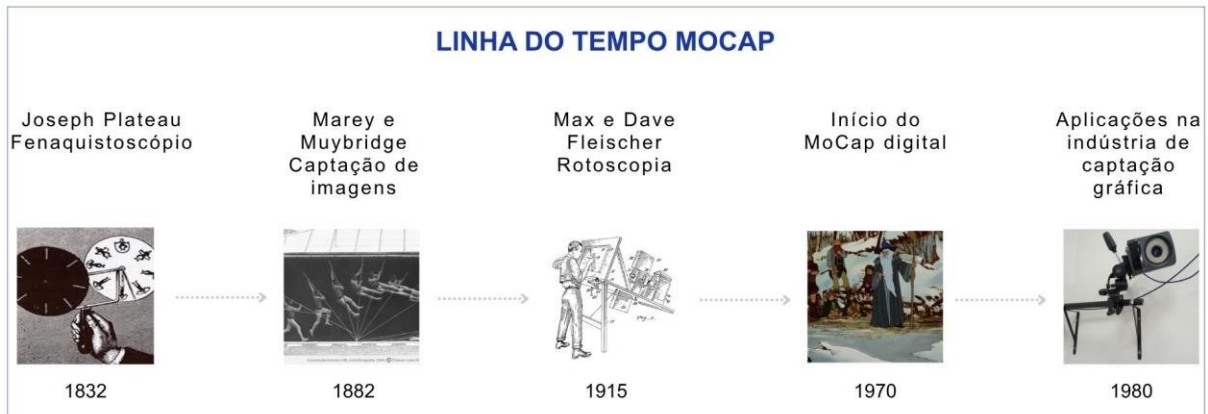
### 2.3 CAPTURA DE MOVIMENTOS

A captura de movimentos é uma tecnologia que surge da necessidade humana de registrar e replicar o movimento, um desejo presente desde as representações pré-históricas nas paredes das cavernas até as mais avançadas técnicas digitais (Resende, 2023).

Essa técnica de computação gráfica de acordo com Proetti e Del Vecchio (2020), permite transferir movimentos reais para personagens ou objetos digitais, ampliando as possibilidades narrativas e estilísticas na indústria do entretenimento e de outros campos que dependem da simulação realista do movimento. Seu principal intuito é criar animações mais naturais ao registrar e codificar o movimento de um corpo em tempo real, independentemente de sua aparência visual. Essa tecnologia pode ser adaptada conforme a necessidade de processamento ou análise, tornando-se uma ferramenta versátil para

diferentes aplicações. Na Figura 6 é possível acompanhar uma linha do tempo da tecnologia.

Figura 6 - Linha do tempo *MoCap*.



Fonte: elaborada pela autora.

Com o intuito de visualizar a evolução do *MoCap*, a Figura 6 aborda os marcos temporais mais relevantes, com informações como ano, imagens ligadas aos acontecimentos e descrições do que ocorreu em cada período. A linha tem início no século XIX onde se tem os primeiros registros históricos e vai até a década de 1980, após esse período a *MoCap* foi utilizada nas mais diversas áreas do conhecimento, como é explicado na sequência dos parágrafos.

Em 1832, o belga Joseph Plateau, em sua tese de doutorado, demonstrou que imagens estáticas organizadas em sequência, quando exibidas com uma determinada frequência de intermitência, podiam criar a ilusão de movimento (Resende, 2023). Em 1882, por conta de Marey e Muybridge, que por meio de uma câmera capturaram imagens em placas de vidro e, posteriormente, filme de papel, sendo pioneiros na captura de movimentos. Muybridge é considerado o pai da captura de movimentos, definindo-o como uma sequência de imagens que criam a ilusão de movimento (Gomes, 2021).

No século XX ocorreram muitos progressos na área, em 1915 os irmãos Max e Dave Fleischer criaram a rotoscopia, técnica capaz de criar desenhos a partir de conteúdos previamente registrados, quadro a quadro por intermédio de um aparelho denominado de rotoscópio. A rotoscopia foi utilizada em muitos estúdios por trazer realismo aos movimentos, permitindo uma maior interação entre personagens animados e atores reais. Proetti e Del Vecchio (2020), citam o exemplo do Estúdio Disney, que utilizou a

rotoscopia no clássico *Snow White* (1937).

A década de 1970 ficou marcada pelo avanço da computação, o que possibilitou o início da captura de movimentos em ambiente digital. Nesse período, os principais interessados no desenvolvimento da tecnologia eram os setores médico e militar, embora o cinema também continuasse a incorporá-la em suas produções. Na década de 1980, essa expansão se intensificou com a entrada da indústria de produção gráfica, que passou a utilizar o recurso em modelagem e animação (Gomes, 2021).

A partir da década de 1990, a captura de movimentos se diversificou ainda mais, sendo aplicada em áreas como esportes e biomecânica, especialmente para otimização de desempenho e reabilitação (Resende, 2023). Nesse mesmo movimento, a tecnologia também foi incorporada às ciências fisioterapêuticas, à ergonomia, às artes e aos videogames, o que contribuiu para a sua popularização. Exemplos dessa variedade de aplicações podem ser observados em estudos como o de Prim (2016), que utilizou *MoCap* para analisar o equilíbrio de usuários com prótese transtibial, e o de Romeiro (2023), que investigou a relação entre captura de movimentos, realidade virtual e performance de atores para animação.

### **2.3.1 Funcionamento da captura de movimentos**

A captura de movimentos é realizada por meio de sistemas que possuem equipamentos que registram os dados de movimentação do corpo em análise. Esses sistemas variam desde versões sofisticadas, utilizadas em produções cinematográficas e pesquisas avançadas, até alternativas mais acessíveis, que oferecem soluções econômicas para diferentes necessidades (Resende, 2023).

Os sistemas de *MoCap* mais conhecidos e utilizados conforme Andaló (2019), são: sistema mecânico, foi o primeiro desenvolvido, aplicado atualmente na animação de fantoches digitais. Sistema magnético opera por meio de ondas magnéticas e sensores, aplicado atualmente na área médica, pode sofrer com problemas de interferência. O sistema óptico, representado na Figura 7, opera com câmeras e marcadores, maior precisão na captura, é o mais caro. Sistema inercial, atua com sensores, é portátil, flexível e versátil, mas pode ter imprecisões causadas pelo desvio do sensor. Sistemas híbridos, combinam dois ou mais sistemas distintos operando simultaneamente, buscando melhor resultado de captura.

Figura 7 - Sistema de *MoCap* óptico.

Fonte: elaborada pela autora.

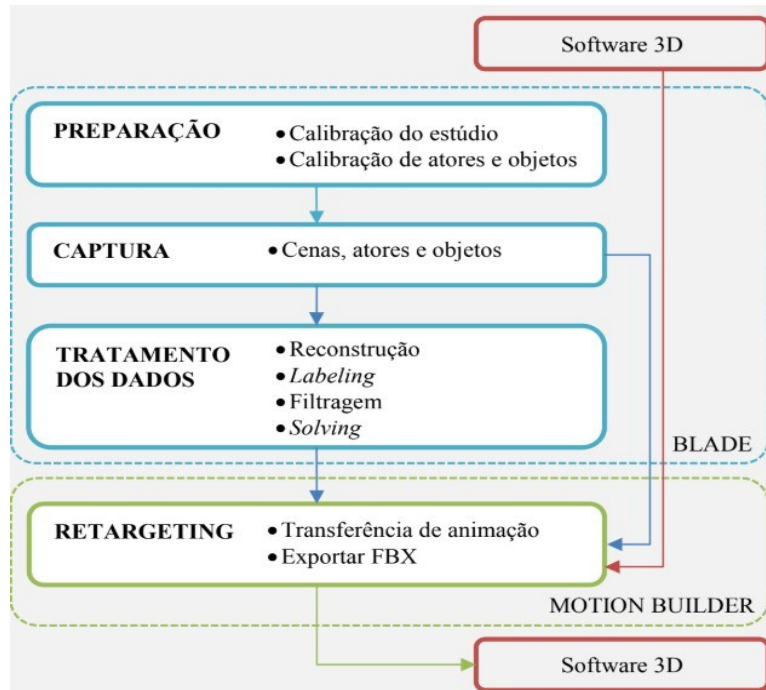
O sistema de *MoCap* óptico foi utilizado nesta pesquisa pela disponibilidade de acesso e capacidade de captação, por isso, merece destaque. Segundo Williams, Serghides e Aristidou (2024), trata-se de uma tecnologia avançada, baseada em marcadores de referência fixados próximo das articulações humanas, cuja posição tridimensional é determinada pela triangulação de múltiplas câmeras de captura rápida. Existem dois tipos principais: passivos, como VICON e OptiTrack, que usam marcadores retrorrefletivos, precisos e sem cabos e ativos, como PhaseSpace e Qualisys, que utilizam LEDs identificáveis individualmente, melhorando a distinção dos marcadores, porém exigindo cabos e fonte de energia.

A escolha do sistema de captura de movimentos envolve uma série de fatores, como custo, complexidade técnica, necessidade de equipe especializada e características específicas dos sensores, como o uso de marcadores e formatos de exportação. Além da potência dos dispositivos, a estrutura do ambiente de captação e o planejamento adequado são essenciais para a obtenção de resultados precisos. Independentemente da tecnologia utilizada, a captura de movimentos exige uma abordagem estratégica, desde a preparação até a pós-produção, garantindo a fidelidade dos dados e a qualidade da animação (Resende, 2023; Gomes, 2021).

O processo de captura de movimentos é normalmente estruturado em três etapas: preparação, captação e pós-processamento dos dados. A fase preparatória envolve a calibração do sistema, a aplicação dos marcadores nos atores e objetos a serem capturados, seguida da calibração desses elementos. Durante a captura, os movimentos são registrados conforme a organização das cenas e a participação de atores e objetos. Por fim, o pós-processamento garante o refinamento e a adequação dos dados capturados para sua

utilização final (Andaló, 2019). Na Figura 8 se encontra o fluxo de produção de captura de movimentos recomendado e elaborado por Andaló (2019), em sua tese de doutorado sobre “*Desenvolvimento de procedimentos para utilização da captura de movimentos aplicada em personagem 3D*”.

Figura 8 - Fluxo de produção de captura de movimentos.



Fonte: Andaló (2019, p.72).

O fluxo de trabalho de Andaló (2019, p.72), presente na Figura 8, apresenta os passos para a produção da captura de movimentos. Contornados em vermelho está a necessidade do uso do software 3D no início e fim do processo. As etapas de preparação, captura e tratamento de dados são contornadas de azul. O contorno verde ficou para a etapa de *retargeting*. Esse fluxo de trabalho foi adaptado para ser utilizado na presente dissertação e se encontra no item 3.2.2, Etapa 2 - condições experimentais e realização do experimento dos Procedimentos Metodológicos.

Os pesquisadores Williams, Serghides e Aristidou (2024), acrescentam que nos dias atuais a captura de movimentos foi incluída no desenvolvimento das capacidades do aprendizado profundo, permitindo o rastreamento corporal por meio de uma ou várias câmeras. Tecnologias como *Deep Motion* e *MoveAI* exemplificam esse progresso, utilizando redes neurais para analisar e mapear movimentos com maior precisão. Um dos métodos mais populares é o *OpenPose*, que emprega inteligência artificial para identificar com exatidão as articulações do corpo em imagens e vídeos, ampliando as aplicações do

MoCap em diversas áreas, como animação, esportes e reabilitação.

Em síntese, a fundamentação teórica apresentada evidencia que a compreensão histórica, cultural e estética dos figurinos, aliada ao estudo das técnicas contemporâneas de simulação de tecidos e às possibilidades oferecidas pela captura de movimentos, constitui um conjunto com potencial para o desenvolvimento de figurinos mais coerentes, expressivos e tecnicamente refinados na animação digital. A análise de animações que se destacam pelo uso realista de figurinos demonstra a relevância da materialidade e do comportamento dinâmico dos tecidos. De forma integrada, esses elementos fundamentam a abordagem metodológica adotada neste trabalho, oferecendo suporte conceitual e técnico para a comparação entre tecidos animados por dados reais de movimento e aqueles produzidos por simulação digital, reforçando a pertinência da pesquisa no avanço das práticas de design e animação.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, apresentando de forma organizada as etapas seguidas desde a revisão teórica até a realização dos experimentos e das simulações digitais. A metodologia foi estruturada em duas fases principais: a Fase 1, dedicada à revisão teórica dos temas relacionados à dinâmica de tecidos, simulação digital e captura de movimento; e a Fase 2, voltada à pesquisa experimental, que contempla a definição dos materiais e equipamentos, o protocolo de captura de movimento, o processamento dos dados obtidos e a aplicação desses resultados em simulações de tecidos no software *Blender*, estabelecendo os critérios utilizados para a posterior análise e comparação dos resultados.

#### 3.1 FASE 1: REVISÃO TEÓRICA

A Fase 1, Revisão Teórica, tem como finalidade compreender os conceitos e bases teóricas relacionados à dinâmica de tecidos em figurinos para animação e o uso de *MoCap* na animação. Essa etapa busca contextualizar e embasar a pesquisa, fornecendo uma visão clara dos temas essenciais para o desenvolvimento do estudo.

Para esse propósito, realiza-se uma revisão bibliográfica em livros, dissertações, teses, artigos e demais trabalhos publicados, tanto em formato físico quanto em repositórios online, considerando o recorte temporal de 2019 a 2024.

Os critérios utilizados para inclusão e exclusão dos materiais analisados são: data de publicação (trabalhos publicados nos últimos 5 anos). Relevância para o tema da dissertação. Acessibilidade (disponibilidade para consulta ou acesso completo gratuito).

A busca é realizada de forma abrangente em bases de dados acadêmicas, incluindo *Scopus*, *Google Scholar*, *Web of Science*, *IEEE Xplore*, *ACM Digital Library*, *ScienceDirect*, *Wiley Online Library* e Catálogo de Teses e Dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). As palavras-chave utilizadas são selecionadas com base nos temas centrais da pesquisa: Dinâmica de tecidos; Simulação de tecidos; Física de tecidos; Figurino para animação; *Blender*; Simulação de tecido no *Blender*; captura de movimentos; Também se utilizou das mesmas traduzidas para o inglês visando mais resultados: *Fabric dynamics*; *Fabric simulation*; *Fabric physics*; *Costume for animation*; *Blender*; *Fabric Simulation in Blender*; *Motion capture*.

Após a coleta dos resultados, os trabalhos são filtrados com base nos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos. O processo de filtragem ocorre em três etapas: inicialmente são excluídos os trabalhos duplicados, na sequência, são selecionados com base na leitura de títulos, resumos e palavras-chave e, posteriormente, é feita a análise do conteúdo completo dos textos. Ao final dessas etapas, obtém-se um total de 47 trabalhos relevantes fichados e utilizados.

Os resultados da revisão são avaliados e sintetizados qualitativamente, com foco na discussão temática. Essa etapa culmina na apresentação dos resultados da revisão, que já foi exposta no Capítulo 2, destacando tendências, lacunas e possíveis direções futuras de pesquisa, além de justificar a relevância de novas investigações na área.

Com base na revisão realizada, o item 3.1 é estruturado: (2.1) O uso dinâmico de figurinos na animação. (2.1.1) Aspectos históricos e culturais dos figurinos. (2.1.2) Animações que se destacam pelo uso realista de figurinos. (2.2) Simulação de tecidos exemplos e processos. (2.2.1) Características dos tecidos que influenciam o comportamento dinâmico. (2.2.2) Programas utilizados para simulação de tecidos. (2.2.3) Simulação de tecido no software de código aberto *Blender*. (2.3) Captura de movimentos. (2.3.1) Funcionamento da captura de movimentos.

## 3.2 FASE 2: PESQUISA EXPERIMENTAL

A Fase 2, Pesquisa Experimental, tem como objetivo planejar e executar os procedimentos experimentais necessários para a captura de movimento de tecidos reais e sua posterior aplicação em simulações digitais no software *Blender*. Nessa etapa, são definidos os materiais, os equipamentos, as condições experimentais e o protocolo de captura, garantindo a padronização e a reprodutibilidade dos ensaios.

### 3.2.1 Etapa 1 - Definição de materiais e equipamentos

A seleção dos tecidos fundamentou-se na revisão da literatura, que identifica o linho, a lã, a seda e o algodão como materiais de relevância histórica e representatividade no vestuário, destacando-se entre as primeiras fibras têxteis empregadas pela humanidade na confecção de vestes e permanecendo em uso até o período contemporâneo (Postrel, 2020).

Os tecidos utilizados nos experimentos foram adquiridos no comércio têxtil, todos

com composição 100% fibra natural, conforme especificação do fornecedor. As amostras correspondem a tecidos planos, lisos e tintos, sem padronagens ou beneficiamentos estruturais adicionais, de modo a reduzir interferências visuais e mecânicas não relacionadas à natureza fibrosa do material. Não foram consideradas tipologias comerciais específicas (como tricoline, sarja ou crepe), nem propriedades mecânicas certificadas, uma vez que o objetivo da pesquisa não consiste na caracterização físico-mecânica absoluta dos materiais, mas na análise comparativa de seu comportamento dinâmico sob excitação de vento e sua correspondência com a simulação digital aplicada ao figurino animado.

Dessa forma, os tecidos foram tratados como amostras representativas de categorias fibrosas distintas, permitindo observar diferenças de massa, flexibilidade e resposta ao escoamento relevante para a dinâmica visual do movimento em figurinos de animação.

A captura de movimento foi realizada por meio de um sistema óptico da VICON, disponível no Grupo de Pesquisa TecMídia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O sistema é composto por 16 câmeras e utiliza o software *Blade* para aquisição e processamento dos dados de movimento.

Buscando minimizar a interferência dos marcadores no comportamento natural dos tecidos, foram inicialmente avaliadas alternativas ao uso de marcadores convencionais, como a aplicação de tinta spray transparente e reflexiva e o uso de fita refletiva. No entanto, essas soluções apresentaram desempenho insuficiente para a detecção adequada pelas câmeras do sistema. Diante dessas limitações, optou-se pela utilização dos marcadores esféricos de 17 milímetros, Figura 9.

Figura 9 - Marcador utilizado.



Fonte: elaborada pela autora.

A simulação digital dos tecidos foi realizada no *software* de código aberto *Blender*, escolhido por sua compatibilidade com arquivos no formato *fbx* provenientes da

captura de movimento, pela ampla disponibilidade em ambientes acadêmicos e por sua aplicação consolidada em produções de animação e jogos.

### 3.2.2 Etapa 2 - Protocolo experimental final

A Etapa 2 compreende a definição das condições experimentais e a execução dos ensaios, Figura 10 com o objetivo de assegurar a padronização e a confiabilidade dos dados obtidos. Os experimentos foram realizados no estúdio de captura de movimento do Grupo de Pesquisa TecMídia, onde as condições ambientais são controladas para reduzir interferências externas.

Figura 10 – Registros de algumas etapas do protocolo experimental final.



Fonte: elaborada pela autora.

Em todos os ensaios, foram mantidos os mesmos elementos experimentais, incluindo a estrutura de fixação dos tecidos, os marcadores e a fonte de excitação por vento, garantindo a consistência entre as capturas. O procedimento experimental adotado segue o protocolo apresentado, Figura 11.

Após cada captura, realizou-se uma verificação preliminar da qualidade dos dados, a fim de assegurar sua adequação antes do processamento final. Esse procedimento permitiu a obtenção de informações confiáveis sobre o comportamento dinâmico dos tecidos, servindo de base para as análises posteriores.

Figura 11 - Protocolo final do experimento.



Fonte: elaborada pela autora.

### 3.2.3 Etapa 3 - Medição das massas e avaliação das incertezas

A confiabilidade dos valores utilizados nas simulações foi assegurada por meio da avaliação das incertezas associadas à medição das massas dos tecidos e dos marcadores. O procedimento seguiu as diretrizes do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (INMETRO, 2012), considerando as principais fontes de incerteza que podem influenciar o processo de medição.

No contexto deste experimento, as fontes de incerteza consideradas foram a resolução da balança utilizada, a repetição das medições, as variações associadas aos materiais têxteis e a presença dos marcadores. Essas contribuições foram quantificadas individualmente e posteriormente combinadas para a obtenção da incerteza total da medição.

A avaliação das incertezas foi conduzida por meio dos métodos de Tipo A e Tipo B. A incerteza do Tipo A está associada à variabilidade estatística das medições repetidas e foi obtida a partir do desvio padrão da média, conforme a Equação 2,

$$u_a = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

1)

onde  $s$  é o desvio padrão amostral e  $n = 5$  o número de medições.

A incerteza do Tipo B está relacionada à resolução da balança utilizada no experimento. Considerando que a menor divisão do instrumento é de  $a = 0,01 \text{ g}$  e assumindo uma distribuição retangular, a incerteza padrão do Tipo B foi calculada conforme a Equação 2,

$$u_b = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad 2)$$

resultando em  $u_b \cong 0,289 \text{ g}$ .

As incertezas dos Tipos A e B foram combinadas por meio da raiz da soma dos quadrados, conforme a Equação (3), resultando na incerteza combinada,

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad 3)$$

Por fim, a incerteza expandida foi determinada pela multiplicação da incerteza combinada pelo fator de cobertura  $k = 2$ , correspondente a um nível de confiança de aproximadamente 95%, conforme a Equação 4,

$$U = k \cdot u_c. \quad 4)$$

### 3.2.4 Etapa 4 - Processamento dos dados MoCap

Nesta etapa, os dados de movimento capturados são processados e organizados para posterior aplicação nas simulações digitais de tecidos. O software *Blade*, da VICON, é utilizado para o tratamento dos dados, permitindo a identificação, o acompanhamento e a

verificação das trajetórias dos marcadores ao longo do tempo. Na exportação, os parâmetros utilizados foram: padrão de código de tempo em 30 Hz; taxa de quadros de 120.000 fps; e formato de arquivo fbx.

Os dados processados servem como base para a aplicação do movimento real aos figurinos no ambiente de simulação, garantindo a correspondência temporal e espacial entre a captura de movimento e a simulação digital.

### **3.2.5 Etapa 5 - Preparação da simulação no *Blender***

Nesta etapa, os dados provenientes da captura de movimento são importados para o software *Blender*, que permite a aplicação dessas informações às simulações digitais de tecidos no mesmo ambiente. Essa integração possibilita a comparação direta entre o movimento capturado dos tecidos reais e o comportamento obtido na simulação.

Para cada tecido analisado, é gerado um registro visual que apresenta, de forma paralela, o movimento capturado e a simulação correspondente no *Blender*. Esses resultados visuais constituem a base para a etapa seguinte, dedicada à avaliação e à comparação das simulações.

### **3.2.6 Etapa 6 - Método de calibração da excitação do vento**

A calibração da excitação de vento na simulação teve como objetivo reproduzir, no ambiente digital, o comportamento dinâmico observado nos tecidos durante a captura de movimento, de modo a garantir correspondência física e perceptiva entre o movimento real e o simulado. No experimento físico, a excitação dos tecidos foi gerada por um ventilador operando sob condições controladas e constantes ao longo de todos os ensaios, aplicada de forma equivalente aos diferentes materiais analisados.

No software *Blender*, o campo de força do tipo *Wind* não permite a inserção direta de parâmetros físicos do escoamento, como velocidade do ar, vazão ou campo de pressão. Em vez disso, o sistema adota parâmetros fenomenológicos, como intensidade, fluxo, ruído e decaimento, que controlam a resposta dinâmica da malha de forma empírica, conforme o modelo interno do simulador. Assim, a velocidade do ar medida experimentalmente não pode ser diretamente convertida em valores de entrada do campo de vento, exigindo um procedimento de calibração baseado na resposta do tecido simulado.

Diante dessa característica do simulador, adotou-se uma calibração empírica

orientada por correspondência dinâmica, na qual os parâmetros do vento foram ajustados até que o movimento do tecido digital apresentasse comportamento compatível com o tecido real capturado por MoCap, especialmente quanto à amplitude de oscilação, posição média sob vento e padrão de deformação nas regiões associadas aos marcadores. O tecido de algodão foi utilizado como referência inicial por apresentar propriedades mecânicas previamente definidas no modificador *cloth* do *Blender* e comportamento intermediário entre os materiais analisados, permitindo estabelecer um ponto de calibração estável para o sistema de simulação.

Embora o *Blender* não implemente explicitamente um modelo de escoamento baseado na mecânica dos fluidos, buscou-se manter coerência física com o fenômeno real por meio da observação de possíveis relações com a força de arrasto aerodinâmico. Ressalta-se que a força de vento aplicada pelo campo *Wind* no *Blender* não corresponde diretamente à força de arrasto expressa analiticamente, não sendo esta a excitação física efetivamente imposta ao tecido na simulação.

Ainda assim, a expressão da força de arrasto foi utilizada como uma referência conceitual para avaliar a ordem de grandeza das respostas observadas, funcionando como um critério qualitativo de verificação. A força de arrasto aerodinâmico pode ser expressa pela Equação 5,

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad 5)$$

em que  $F_d$  é a força de arrasto,  $\rho$  é a densidade do ar,  $C_d$  é o coeficiente de arrasto,  $A$  é a área do tecido exposta ao escoamento e  $v^2$  é a velocidade do ar.

Nesse contexto, a equação foi empregada como um “teste de ordem de grandeza”, permitindo verificar se aumentos ou reduções nos parâmetros empíricos do vento no *Blender* resultavam em tendências compatíveis com o comportamento físico esperado, especialmente no que se refere à sensibilidade da resposta dinâmica do tecido em relação à intensidade do escoamento. Dessa forma, a calibração adotada não busca reproduzir um escoamento aerodinâmico completo, mas sim estabelecer uma excitação digital fisicamente coerente e perceptivamente credível para o contexto de simulação de figurinos em animação.

### 3.2.7 Etapa 7 - Critérios de comparação

A comparação entre os resultados obtidos por meio da captura de movimento e das simulações digitais no software *Blender* foi realizada a partir de critérios quantitativos e qualitativos, com o objetivo de avaliar a correspondência entre o comportamento dinâmico dos tecidos reais e o movimento reproduzido no ambiente virtual.

Do ponto de vista quantitativo, estabeleceu-se correspondência espacial entre os marcadores físicos posicionados sobre o tecido real e vértices equivalentes da malha do tecido simulado no ambiente 3D. Para isso, considerou-se a disposição dos marcadores em um grid regular aplicado ao tecido real, o qual foi replicado na malha do modelo digital, permitindo a comparação de pontos equivalentes entre os dois sistemas. A partir dessa correspondência, foram analisados os deslocamentos dos marcadores ao longo do tempo nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  obtidos por meio da MoCap e os deslocamentos dos vértices correspondentes na simulação. Esses dados foram comparados graficamente, considerando aspectos como amplitude de oscilação, frequência aparente do movimento e sincronização temporal, de modo a verificar a similaridade espaço-temporal do comportamento dinâmico entre tecido real e simulado.

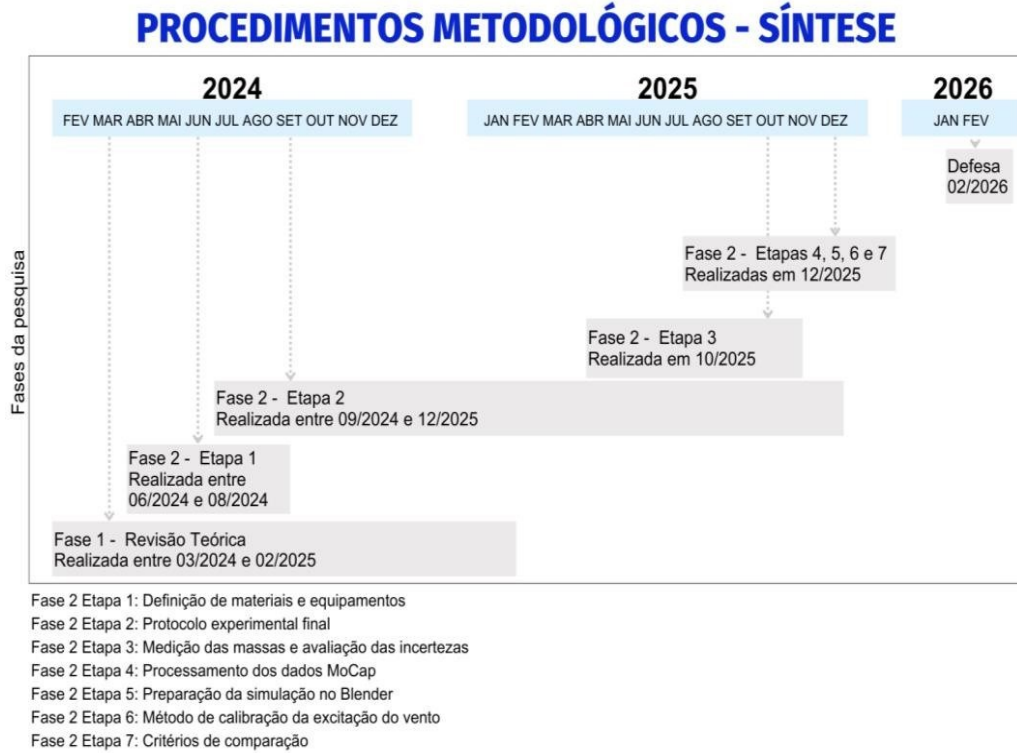
Sob o aspecto qualitativo, a avaliação considerou a coerência visual do movimento dos tecidos, fundamentada na percepção do comportamento físico esperado para materiais têxteis em movimento. Foram observados atributos como caimento, fluidez, atraso de resposta à excitação do vento, formação de dobras e comportamento das regiões mais livres do tecido. Essa análise visual buscou identificar se a simulação reproduz características perceptualmente reconhecíveis do tecido real em movimento, especialmente quanto à propagação das deformações e à interação entre diferentes regiões do pano, conforme observado nos registros experimentais.

Adicionalmente, a comparação foi conduzida mantendo constantes as condições de excitação do vento e o protocolo experimental para todos os tecidos, de modo que as diferenças observadas fossem atribuídas predominantemente às propriedades físicas de cada material e à capacidade do modelo de simulação em reproduzi-las. Dessa forma, os critérios adotados permitem uma avaliação consistente, tanto métrica quanto perceptiva, da correspondência entre a dinâmica dos tecidos capturados experimentalmente e sua representação no ambiente digital.

Para facilitar a visualização dos procedimentos metodológicos desta pesquisa,

é elaborada uma linha do tempo, apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Linha do tempo procedimentos metodológicos.



Fonte: elaborada pela autora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais e das simulações descritos no capítulo anterior. São analisados os dados provenientes da captura de movimento dos tecidos reais e os resultados das simulações realizadas no software *Blender*, considerando tanto aspectos quantitativos quanto qualitativos do comportamento dinâmico dos materiais. A discussão busca relacionar os resultados observados com os critérios de comparação estabelecidos, destacando similaridades, diferenças e limitações do método adotado, bem como suas implicações para a representação de tecidos em figurinos de animação.

### 4.1 EXPERIMENTOS EXPLORATÓRIOS E AJUSTES DO PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Os Planos Experimentais 1 e 2 tiveram caráter exploratório e foram fundamentais para a identificação das limitações associadas à aplicação de materiais refletivos alternativos ao uso de marcadores ópticos convencionais. No Plano Experimental 1, ilustrado na Figura 13, foram realizadas a aquisição dos materiais, a preparação e o corte dos tecidos, a delimitação do espaço experimental e a aplicação de spray refletivo sobre os tecidos, seguida de testes de captura no software *Blade*.

Figura 13 – Experimento 1.



Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados desse primeiro experimento indicaram que o spray refletivo não foi adequadamente detectado pelas câmeras do sistema de captura de movimento, impossibilitando o reconhecimento confiável dos pontos refletivos. Essa limitação está associada à baixa eficiência de reflexão do material sob iluminação infravermelha, utilizada pelo sistema óptico.

Em razão disso, foi desenvolvido o Plano Experimental 2, apresentado na Figura 14, no qual se avaliou o uso de fita refletiva cortada em formato esférico, buscando aproximar-se da geometria dos marcadores tradicionais de MoCap. Embora tenha sido possível detectar a fita em determinadas condições, observou-se que a captação era restrita e dependente do alinhamento direto com as câmeras, o que comprometeu a continuidade e a qualidade dos dados registrados. Esse comportamento é atribuído ao caráter bidimensional da fita refletiva, em contraste com os marcadores tridimensionais utilizados nos sistemas ópticos.

Figura 14 - Experimento 2.



Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados obtidos nesses dois experimentos evidenciaram a incompatibilidade dos materiais alternativos testados com o sistema de captura de movimento empregado. Ainda assim, esses achados contribuíram para a compreensão das exigências técnicas do método e para a definição de um protocolo mais adequado, evitando retrabalho e otimizando etapas futuras da pesquisa.

Com base nos resultados dos experimentos exploratórios, foi desenvolvido o Plano Experimental 3, ilustrado na Figura 15, no qual se adotou o uso dos menores marcadores ópticos disponíveis no laboratório, visando minimizar a interferência do peso adicional no comportamento dinâmico dos tecidos. Nessa etapa, realizou-se a pesagem individual dos tecidos e dos marcadores, permitindo avaliar a influência relativa desses elementos sobre a movimentação observada.

Figura 15 - Experimento 3.



Fonte: elaborada pela autora.

Como é possível observar na terceira imagem da Figura 15, colou-se os marcadores ao longo do tecido com uma fita dupla-face, depois com a mesma fita, o tecido foi posicionado em uma placa, a qual serviu de estrutura para que o pano ficasse suspenso e possibilitou repetir o experimento de forma padrão com todos os tecidos testados. Analisando como foi feita a captura, mesmo tendo medido e marcado a distância dos passos e procurado seguir exatamente o mesmo padrão para todos os tecidos, entende-se que a replicabilidade entre os tecidos pode não ter sido tão precisa por questões de erro humano, como tremor no braço, mão, que estava suspendendo a placa na captura de movimentos.

#### 4.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL FINAL E CONDIÇÕES CONTROLADAS DE CAPTURA

A partir da necessidade de maior controle e reprodutibilidade, foi implementado o Plano Experimental 4, apresentado na Figura 16, que estabeleceu um protocolo

experimental fixo e padronizado. Esse plano incluiu a montagem de uma estrutura estática para sustentação dos tecidos, garantindo posicionamento consistente em todas as capturas, conforme detalhado na Figura 17.

Figura 16 - Experimento 4.



Fonte: elaborada pela autora.

No protocolo final, definiu-se que cada tecido teria 80 cm de comprimento livre, com a aplicação de quatro marcadores distribuídos a cada 20 cm a partir da extremidade inferior. A estrutura de suporte apresentou altura total de 96 cm, assegurando que o tecido não entrasse em contato com o solo durante os ensaios.

A excitação aerodinâmica foi gerada por um ventilador de 30 cm, 6 hélices, 3 velocidades, 52 W de potência, posicionado a 60 cm do tecido, com altura de 57 cm em relação ao solo, resultando em uma velocidade média do vento de 1,5 m/s, medida por meio de um anemômetro.

Figura 17 - Experimento 4: representação esquemática.

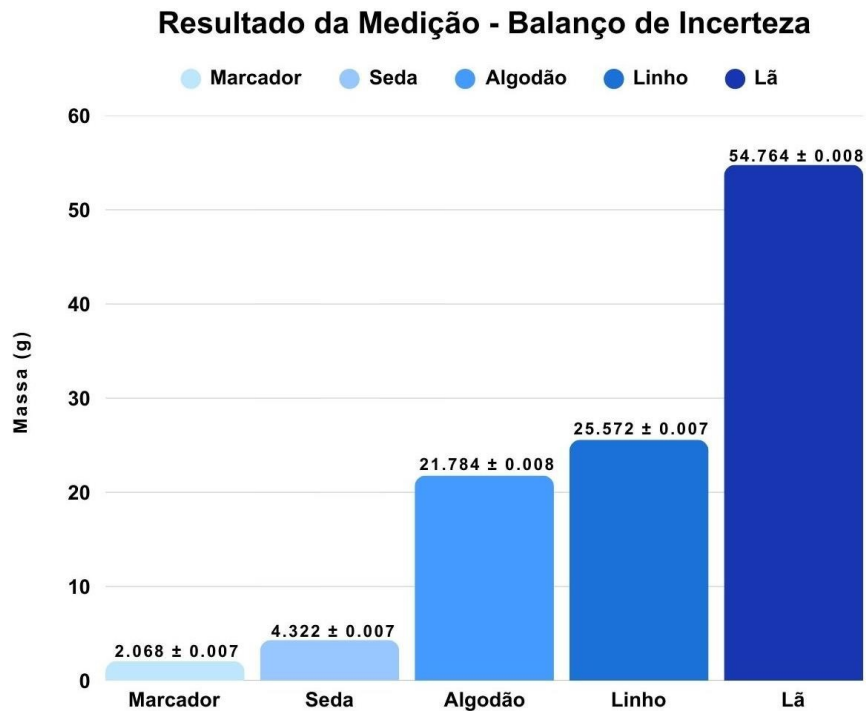


Fonte: elaborada pela autora.

O procedimento de captura seguiu uma sequência padronizada para todos os tecidos: medição e posicionamento dos marcadores, fixação do tecido na estrutura, início da gravação no sistema de MoCap, acionamento do ventilador na velocidade definida (3) e encerramento da captura após 15 segundos. Ao final de cada ensaio, os arquivos foram salvos e posteriormente exportados no formato *fbx* para uso nas simulações digitais.

Como parte do controle experimental, as massas dos tecidos e dos marcadores foram determinadas e apresentadas juntamente com suas respectivas incertezas de medição, conforme mostrado na Figura 18. As massas médias obtidas foram de 4,322 g para a seda, 21,784 g para o algodão, 25,572 g para o linho e 54,764 g para a lã, com incertezas entre 0,007 g e 0,008 g. O marcador apresentou massa média de 2,068 g, com incerteza de 0,007 g. Esses valores foram incorporados a simulação, assegurando a correta representação dos efeitos inerciais.

Figura 18 - Balanço de incerteza.



Fonte: elaborada pela autora.

Assim, o protocolo experimental final estabeleceu condições controladas e comparáveis entre os materiais, servindo de base para as simulações no software *Blender* e para as análises apresentadas nas seções seguintes.

#### 4.3 RESULTADOS DA CAPTURA DE MOVIMENTO

A captura de movimento dos tecidos foi realizada por meio de um sistema óptico de MoCap, com quatro marcadores distribuídos ao longo do comprimento livre de cada tecido. As aquisições foram feitas a 120 fps, garantindo resolução temporal adequada para a análise do comportamento dinâmico. Os ensaios contemplaram os quatro tecidos analisados algodão, seda, linho e lã, seguindo o protocolo experimental definido no Experimento 4.

Os dados obtidos correspondem às trajetórias temporais dos marcadores nas direções x, y e z, expressas em termos de deslocamentos relativos sob a ação do vento. Os gráficos, organizados por marcador e por eixo, permitem comparar o comportamento dinâmico dos diferentes materiais. Os resultados experimentais para o algodão, a lã, o linho

e a seda são apresentados, respectivamente, na Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23, e servem de base para a comparação com as simulações realizadas no software *Blender*.

Os marcadores foram distribuídos ao longo do comprimento livre do tecido, Figura 18, com o Marcador 1 posicionado a 20 cm abaixo da barra fixa e os Marcadores 2, 3 e 4 dispostos sequencialmente até a extremidade inferior, conforme mostrado na Figura 19. Essa configuração permite analisar a variação do comportamento dinâmico do tecido ao longo de sua extensão, desde a região mais restrita até a região de maior liberdade de movimento.

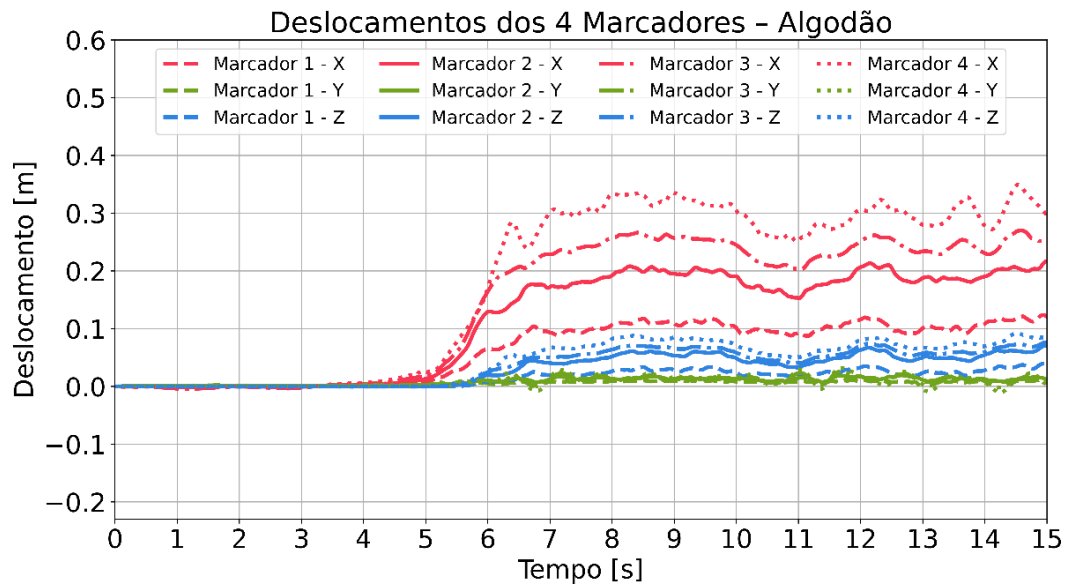
Figura 19 - Marcadores.



Fonte: elaborada pela autora.

O eixo  $x$ , associado à direção normal ao plano do tecido (espessura), concentra as maiores amplitudes de deslocamento e representa o principal grau de liberdade excitado pela ação do vento. Nessa direção, torna-se evidente o estabelecimento de uma posição de equilíbrio deslocada, resultante da ação média do escoamento sobre o tecido. Até aproximadamente  $t = 4$  s, os deslocamentos permanecem próximos de zero, indicando a ausência de excitação, uma vez que o ventilador ainda não estava em funcionamento. Após o acionamento do vento, observa-se um regime transiente entre  $t = 6$  s e  $t = 8$  s, no qual o tecido se desloca progressivamente até atingir uma nova posição média. A partir desse intervalo, o movimento passa a oscilar em torno dessa posição de equilíbrio, caracterizando o regime permanente da resposta dinâmica.

Figura 20 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de algodão nos eixos x, y e z.



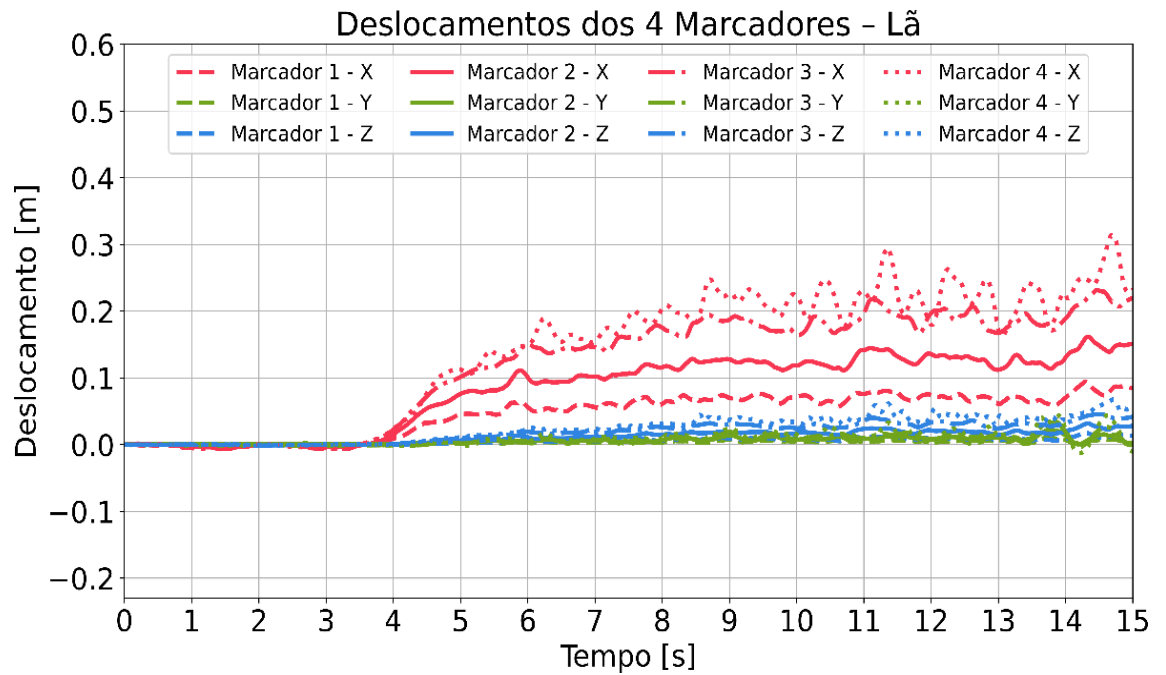
Fonte: elaborada pela autora.

De forma geral, observa-se um aumento progressivo da amplitude dos deslocamentos do Marcador 1 para o Marcador 4, especialmente no eixo x, refletindo a maior liberdade de movimento da extremidade livre do tecido. Esse comportamento é esperado, uma vez que a região próxima à barra fixa apresenta restrições cinemáticas mais significativas, enquanto a extremidade inferior está mais suscetível à excitação aerodinâmica.

O eixo z, correspondente à direção vertical, evidencia deslocamentos associados ao levantamento e à oscilação do tecido sob a ação do escoamento. Embora as amplitudes nessa direção sejam menores quando comparadas ao eixo x, elas permanecem relevantes para a caracterização do movimento tridimensional. Assim como observado no eixo x, essas variações tornam-se mais pronunciadas nos marcadores mais distantes da fixação, indicando maior flexibilidade e resposta dinâmica nessa região.

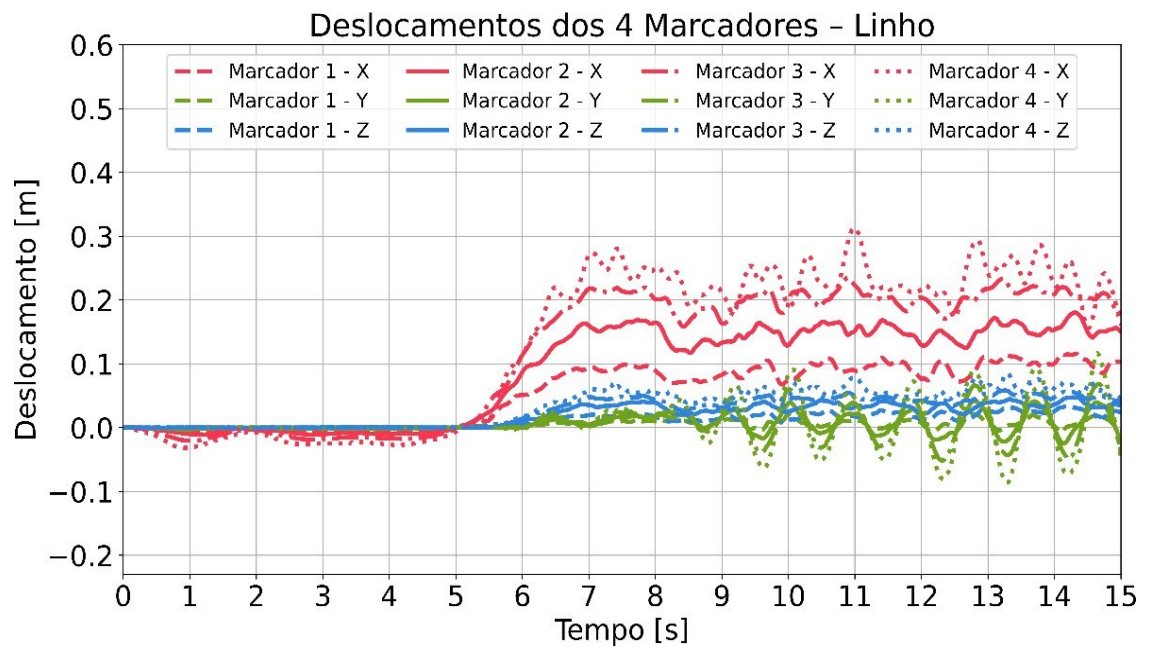
No eixo y, que representa o deslocamento na direção da largura do tecido, as amplitudes observadas são significativamente menores em relação aos eixos x e z. Esse resultado indica que o movimento lateral do tecido possui contribuição secundária no ensaio realizado, sendo o comportamento global governado predominantemente pela flexão na direção perpendicular ao vento e pelas oscilações verticais induzidas pelo escoamento.

Figura 21 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de lã nos eixos x, y e z.



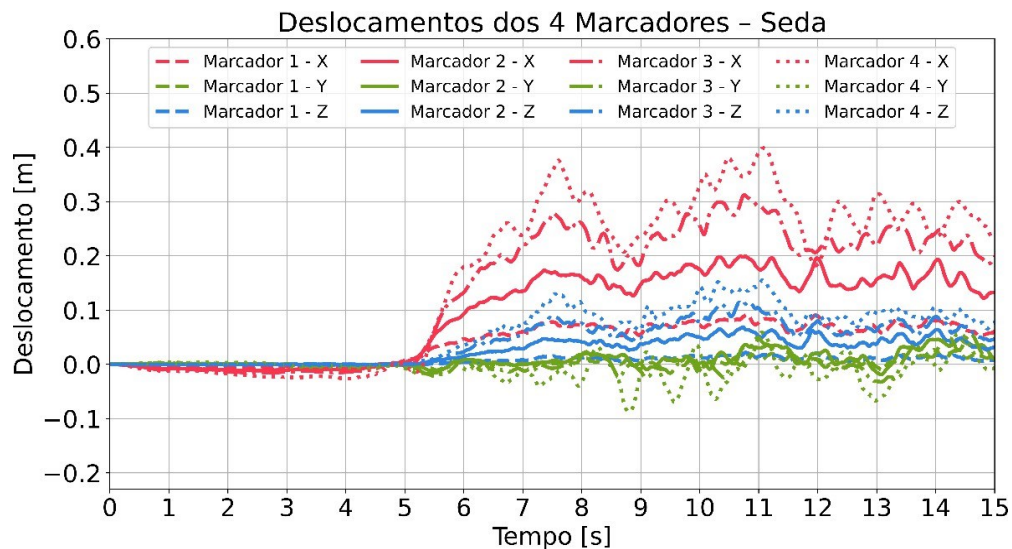
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 22 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de linho nos eixos x, y e z.



Fonte: elaborada pela autora.

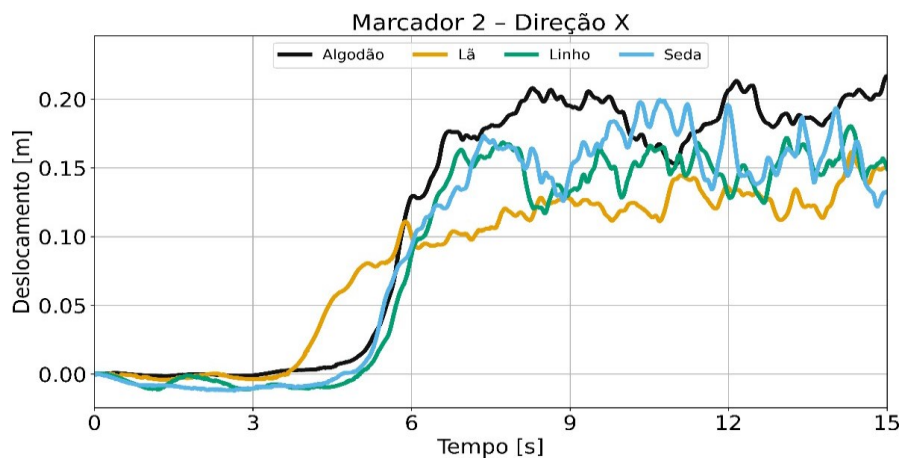
Figura 23 - Deslocamentos relativos dos marcadores do tecido de seda nos eixos x, y e z.



Fonte: elaborada pela autora.

A análise dos deslocamentos relativos nas direções x, y e z evidencia diferenças claras entre os tecidos, refletindo suas distintas propriedades físicas. Na direção x, Figura 24, associada ao movimento na espessura do tecido e diretamente influenciada pela ação do vento, observa-se que materiais mais leves e flexíveis, como a seda, apresentam maiores amplitudes e flutuações mais irregulares. Em contraste, tecidos mais pesados ou com maior rigidez, como a lã, exibem deslocamentos mais contidos e respostas mais suaves, indicando maior resistência à excitação aerodinâmica.

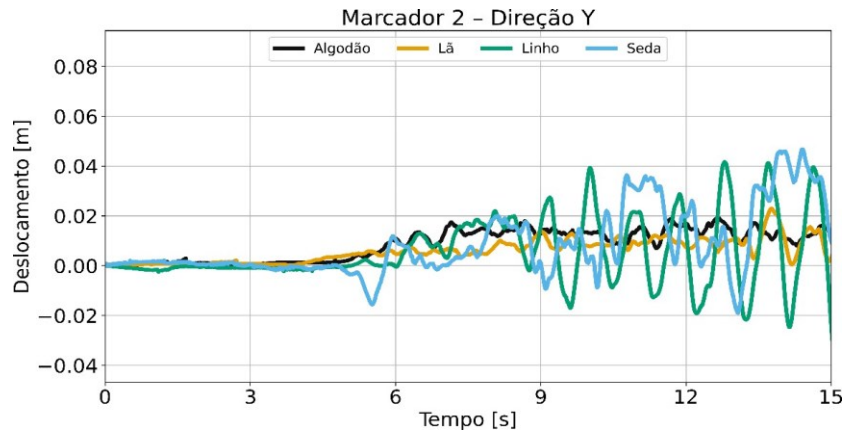
Figura 24 - Deslocamento relativo do marcador 2 no eixo x.



Fonte: elaborada pela autora.

Na direção y, Figura 25, correspondente ao deslocamento lateral na largura do tecido, as amplitudes são significativamente menores para todos os materiais, embora ainda se percebam diferenças no padrão de oscilação. Tecidos como o linho e a seda apresentam maior variabilidade lateral, enquanto o algodão e a lã demonstram comportamento mais estável nessa direção.

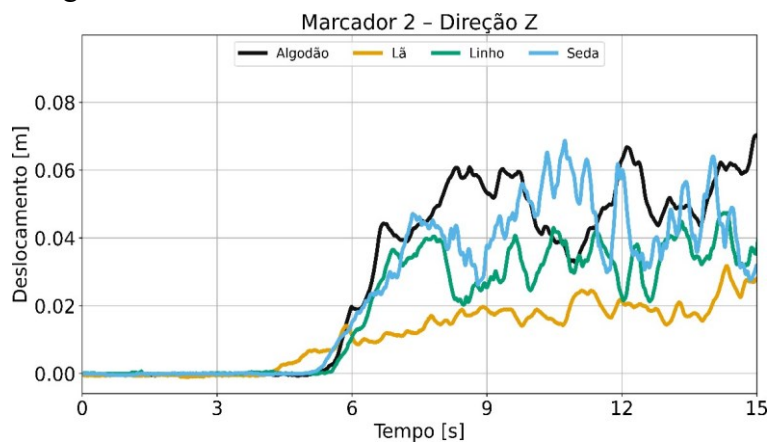
Figura 25 - Deslocamento relativo do marcador 2 no eixo y.



Fonte: elaborada pela autora.

Já na direção z, Figura 26, associada ao deslocamento vertical, nota-se que a resposta dos tecidos combina efeitos de flexão, peso próprio e interação com o escoamento. Novamente, a seda apresenta oscilações mais acentuadas, enquanto a lã mostra comportamento mais estável. Essas diferenças indicam que a resposta tridimensional do tecido não é governada por um único parâmetro, mas pelo conjunto de propriedades mecânicas e pela interação com o vento.

Figura 26 - Deslocamento relativo do marcador 2 no eixo z.

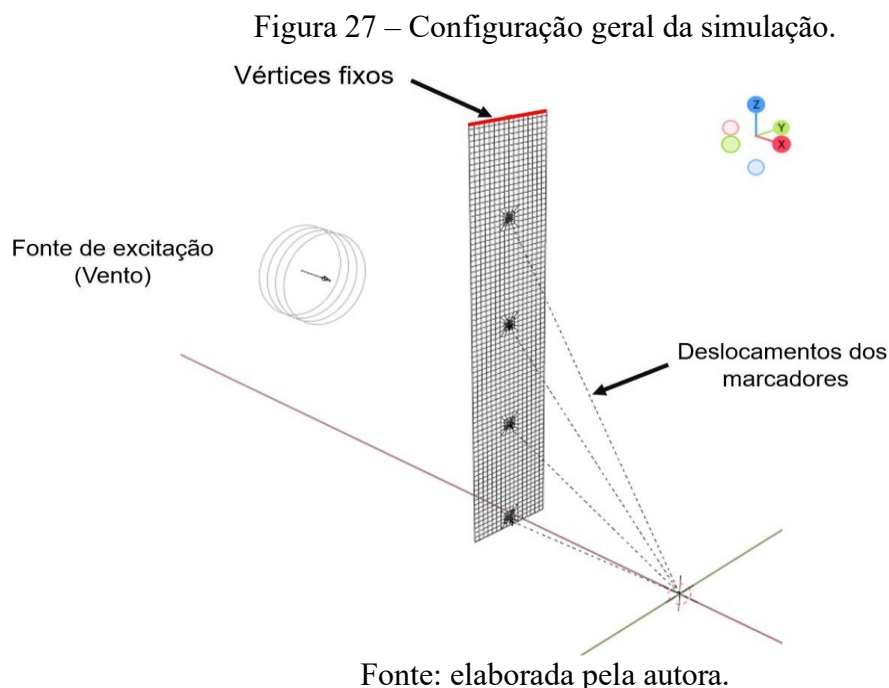


Fonte: elaborada pela autora.

Do ponto de vista da animação digital, essas variações dinâmicas têm impacto direto na percepção da coerência material. Tecidos que apresentam maiores amplitudes e irregularidades tendem a transmitir leveza, fluidez e movimento orgânico, características frequentemente associadas a materiais como a seda. Por outro lado, tecidos com resposta mais contida contribuem para a sensação de peso e rigidez, como observado na lã. Assim, a análise do Marcador 2 evidencia como diferenças físicas entre os tecidos se traduzem em comportamentos visuais distintos, reforçando a importância de parâmetros adequados de simulação para a apresentação de figurinos animados.

#### 4.4 CALIBRAÇÃO DO VENTO COM ALGODÃO

Na simulação de tecidos realizada no software *Blender*, não é possível definir diretamente a velocidade do escoamento do ar em unidades físicas, como m/s, no campo de força do tipo *Wind*. Dessa forma, a intensidade do vento deve ser ajustada de maneira indireta, por meio de parâmetros adimensionais. Considerando que a solicitação experimental envolveu a aplicação de um mesmo nível de excitação para todos os tecidos analisados, adotou-se uma estratégia de calibração prévia do vento, a qual foi posteriormente aplicada de forma idêntica nas simulações dos demais materiais. A configuração geral da simulação, incluindo a fonte de excitação e as condições de contorno, é ilustrada na Figura 27.



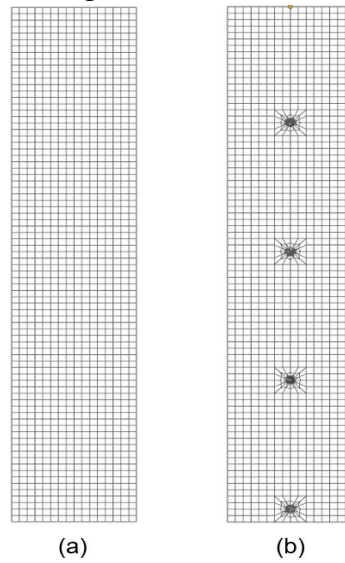
A calibração foi realizada utilizando o tecido de algodão, uma vez que o *Blender* dispõe de propriedades físicas previamente definidas para esse material, o que facilita a obtenção de uma resposta dinâmica estável e coerente. Os parâmetros do campo de vento foram ajustados até que os deslocamentos simulados apresentassem comportamento compatível com os resultados experimentais, especialmente em termos de amplitude e regime de oscilação. Durante esse processo, a posição da fonte de excitação (ventilador) e as dimensões do tecido foram modeladas de forma equivalente às condições do experimento físico.

Como condição de contorno, o tecido foi modelado na forma de uma malha plana, com os vértices localizados na borda superior completamente fixos, representando a região de engastamento na barra rígida do experimento físico. A discretização da malha foi mantida constante em todas as simulações, sendo utilizada uma malha base composta por 369 vértices, Figura 28 (a), de modo a garantir consistência numérica entre os diferentes casos analisados.

Na região correspondente à posição dos marcadores experimentais, foi realizado um refino local da malha, com o objetivo de aumentar a densidade de vértices nesses pontos. Essa estratégia permitiu representar, de forma indireta, a presença da massa adicional associada aos marcadores. O número total de vértices da malha foi ajustado de modo que a massa distribuída no modelo fosse equivalente à soma da massa do tecido com a massa dos quatro marcadores utilizados no experimento, conforme ilustrado na Figura 28 (b).

Essa abordagem foi necessária devido à limitação do *Blender* em representar diretamente a interação entre a física do tecido (*Cloth*) e corpos rígidos pendurados ou acoplados ao mesmo. Assim, a concentração de massa foi modelada por meio do refinamento local da malha, garantindo que os efeitos inerciais dos marcadores fossem incorporados à dinâmica do sistema de forma aproximada, porém consistente.

Figura 28 – Malha.

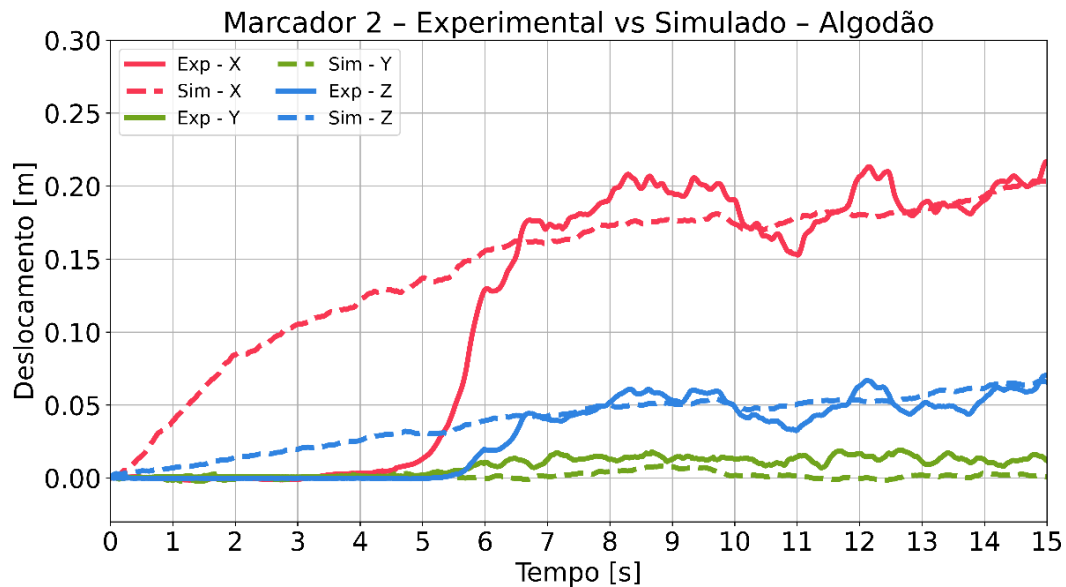


Fonte: elaborada pela autora.

Para a comparação entre os resultados experimentais e numéricos, foram analisados os deslocamentos do Marcador 2, posicionado aproximadamente na região central do comprimento livre do tecido. A escolha desse marcador permite avaliar o comportamento global do tecido, reduzindo a influência direta das restrições impostas pela fixação superior e das não linearidades mais intensas associadas à extremidade livre.

A Figura 29 apresenta a comparação entre os deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de algodão, nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Observa-se que, no regime permanente, a simulação reproduz adequadamente a posição média de equilíbrio observada experimentalmente, especialmente na direção  $x$ , associada ao deslocamento na espessura do tecido e diretamente influenciada pela ação do vento. No entanto, a resposta simulada apresenta amplitudes de oscilação inferiores às registradas experimentalmente.

Figura 29 – Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de algodão.



Fonte: elaborada pela autora.

Observa-se, nos sinais experimentais, uma diferença temporal inicial em relação aos dados simulados, decorrente do protocolo de excitação do vento. No experimento físico, o ventilador foi acionado aproximadamente em  $t = 4$  s, o que gera um regime transiente visível entre cerca de  $t = 6$  s e  $t = 8$  s, período no qual o tecido passa de sua posição inicial para uma nova posição média sob a ação do escoamento de ar. Já na simulação, a excitação do vento foi aplicada desde o início da cena, resultando em deslocamentos progressivos desde  $t = 0$  s, conforme indicado pelas curvas simuladas no gráfico.

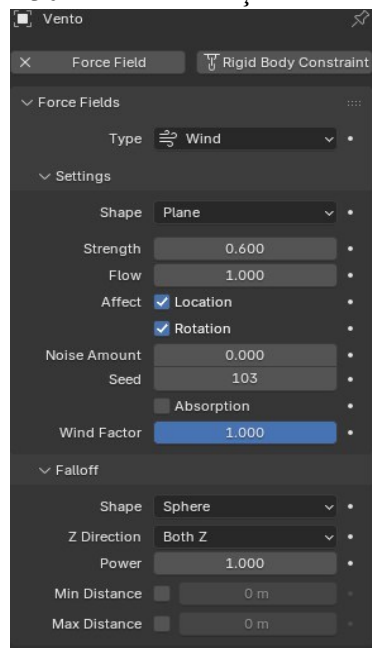
Considerando essa diferença de condição inicial, a comparação entre os movimentos experimental e simulado foi realizada a partir de  $t \geq 8$  s, intervalo no qual ambos os sistemas já se encontram em regime quase-estacionário, caracterizado por oscilações em torno de uma posição média aproximadamente constante. Dessa forma, assegura-se a comparabilidade entre os sinais, uma vez que a análise passa a considerar apenas o comportamento dinâmico do tecido sob vento contínuo, independentemente do instante de acionamento da excitação.

A Figura 30 ilustra os parâmetros utilizados para a caracterização da fonte de excitação aerodinâmica no software *Blender*, incluindo a definição do campo de vento e seus principais parâmetros de intensidade e atuação. Esses parâmetros foram mantidos constantes após a calibração, garantindo consistência entre as simulações realizadas para

diferentes materiais.

Com o objetivo de contextualizar fisicamente a intensidade dessa excitação aerodinâmica, realizou-se uma estimativa auxiliar da força de arrasto, Equação (5), atuante sobre o tecido. Considerou-se a densidade do ar  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ , correspondente a condições atmosféricas padrão de laboratório, e um coeficiente de arrasto  $C_d = 1,28$ , valor típico adotado para placas planas normais ao escoamento, utilizado aqui como aproximação conservadora para representar o comportamento médio de um tecido deformável. Para uma área exposta de  $A = 0,14 \text{ m}^2$  e velocidade do ar  $v = 1,5 \text{ m/s}$ , a aplicação da equação clássica de arrasto resulta em uma força da ordem de  $10^{-1} \text{ N}$ , aproximadamente  $0,25 \text{ N}$ . Na simulação numérica, a excitação foi representada por meio do campo *Wind* do *Blender*, com intensidade (*Strength*) fixada em  $0,650$ , valor definido a partir da calibração com o tecido de algodão. Embora não exista correspondência direta entre esse parâmetro e a força aerodinâmica analítica, essa estimativa fornece uma referência física da ordem de grandeza associada à excitação aplicada, reforçando a coerência das respostas dinâmicas observadas.

Figura 30 – Caracterização da excitação.

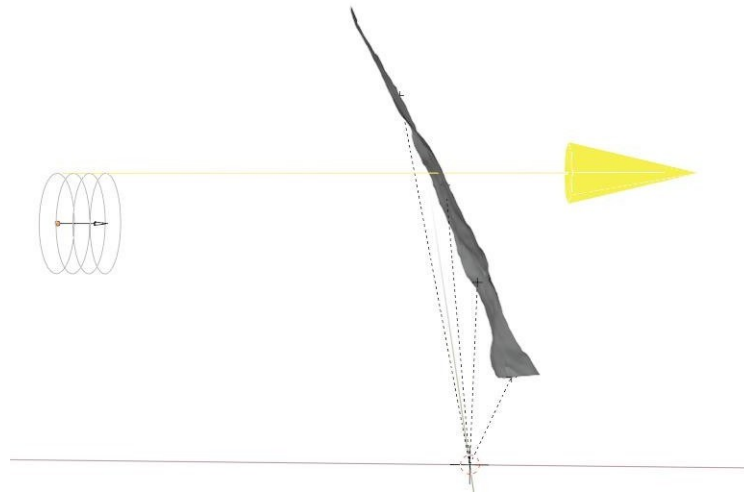


Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 31 apresenta uma ilustração da forma deformada do tecido na simulação, permitindo observar a distribuição espacial dos deslocamentos ao longo do comprimento e a coerência da forma global com o comportamento experimental dos quatro marcadores.

Essa representação confirma que, embora o modelo apresente menor nível de oscilação, a excitação aerodinâmica aplicada foi capaz de reproduzir de forma adequada o efeito global do vento sobre o tecido.

Figura 31 – Forma deformada do tecido na simulação – Frame 1212 (10,1 segundos).



Fonte: elaborada pela autora.

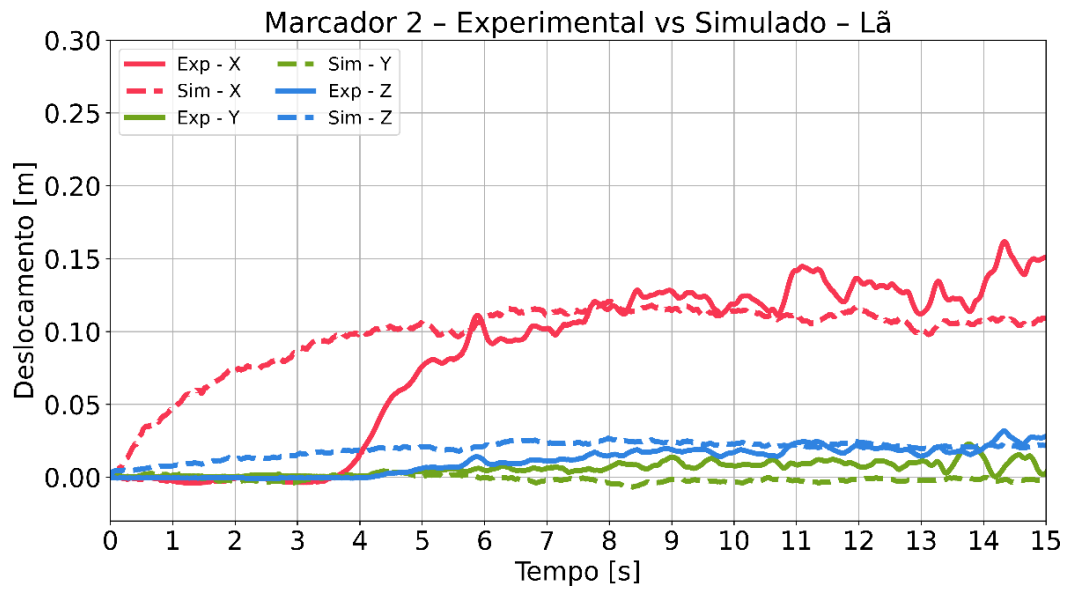
Dessa forma, os parâmetros adotados para a caracterização da fonte de excitação mostraram-se apropriados, validando o método para a análise comparativa entre os diferentes materiais estudados.

#### 4.5 SIMULAÇÕES COM VENTO FIXO NOS DEMAIS TECIDOS

A calibração da excitação aerodinâmica foi realizada com o tecido de algodão e, a partir dessa definição, os mesmos parâmetros do campo de vento foram mantidos constantes nas simulações dos demais materiais. Assim, a sollicitação aerodinâmica permaneceu fixa, sendo modificadas apenas as propriedades físicas associadas a cada tecido no modelo do *Blender*.

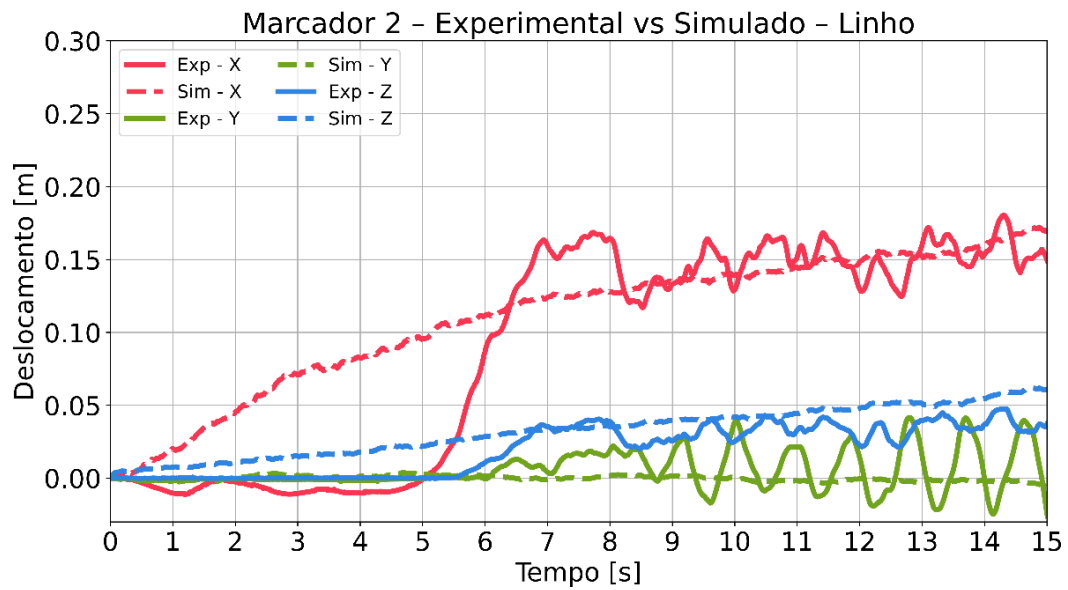
A comparação entre resultados experimentais e simulados foi baseada no Marcador 2, localizado na região central do comprimento livre do tecido, por representar um ponto menos influenciado pelas condições de contorno. A Figura 32, Figura 33 e Figura 34 apresentam as comparações para os tecidos de lã, linho e seda, respectivamente, considerando os deslocamentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Figura 32 – Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de lã.



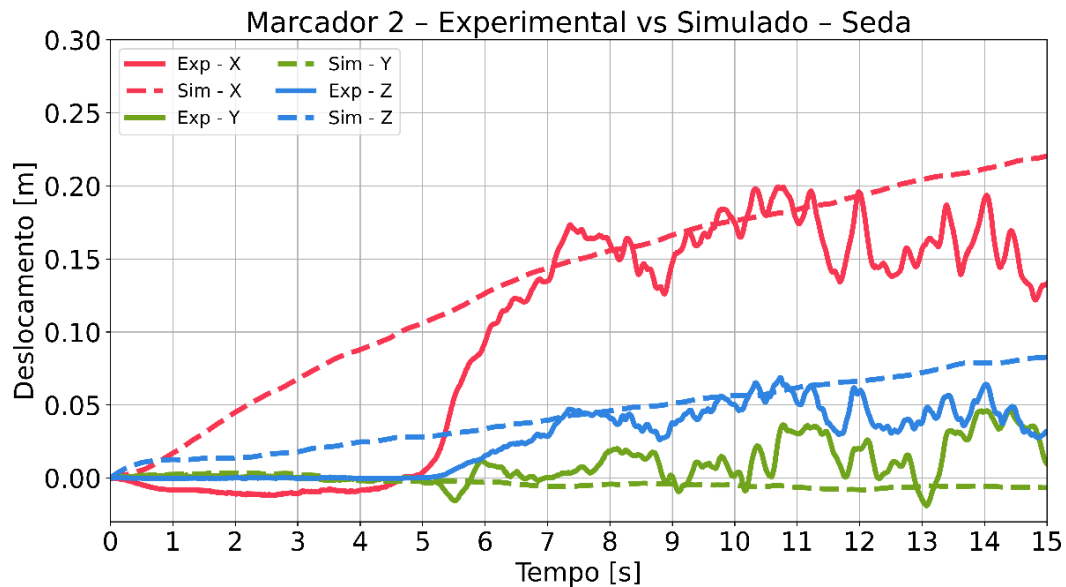
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 33 – Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de linho.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 34 – Deslocamentos experimentais e simulados do Marcador 2 para o tecido de seda.



Fonte: elaborada pela autora.

De modo geral, a simulação reproduz adequadamente o nível médio de deslocamento e a posição de equilíbrio no regime permanente, especialmente no eixo x, associado à direção principal de atuação do vento. Em comparação com os dados experimentais, observa-se menor flutuação dinâmica nas simulações, com oscilações mais suavizadas ao longo do tempo.

Entre os materiais analisados, a lã apresentou a melhor concordância entre experimento e simulação, tanto em amplitude média quanto em estabilidade do regime permanente. A seda, por sua vez, apresentou a maior discrepância, com diferenças mais acentuadas na amplitude e na variabilidade temporal dos deslocamentos, indicando maior sensibilidade a efeitos não representados na simulação.

Essas diferenças estão associadas às simplificações do modelo de vento do *Blender*, que não resolve explicitamente o escoamento nem suas flutuações turbulentas. Ainda assim, em termos macroscópicos, o modelo foi capaz de reproduzir as tendências globais observadas experimentalmente, incluindo a ordem de grandeza dos deslocamentos e a hierarquia de resposta entre os tecidos.

Registra-se que a seda foi utilizada neste trabalho para se ter o resultado de movimento de um tecido mais leve do que os outros utilizados, porém, devido ao peso dos marcadores serem maiores do que o peso próprio do material, não se indica considerar os parâmetros obtidos para ela em projetos futuros, nos quais o ideal seria encontrar um

método de registrar o movimento da mesma sem um peso tão expressivo como o dos marcadores influenciando no resultado.

O Quadro 3, apresenta os parâmetros de rigidez (*stiffness*) e amortecimento (*damping*) adotados para cada material.

Quadro 3 – Parâmetros adotados para cada material.

<b>Parâmetros e valores utilizados nos tecidos</b>				
<b>Parâmetros</b>	<b>Algodão</b>	<b>Lã</b>	<b>Linho</b>	<b>Seda</b>
Rigidez - Tensão	15	15	13	14
Rigidez - Compressão	15	15	13	14
Rigidez - Cisalhamento	15	15	13	14
Rigidez - Flexão	0.50	0.50	0.40	0.06
Amortecimento - Tensão	5	5	6	0
Amortecimento - Compressão	5	5	6	0
Amortecimento - Cisalhamento	5	5	6	0
Amortecimento - Flexão	0.50	0.50	0.40	0.30

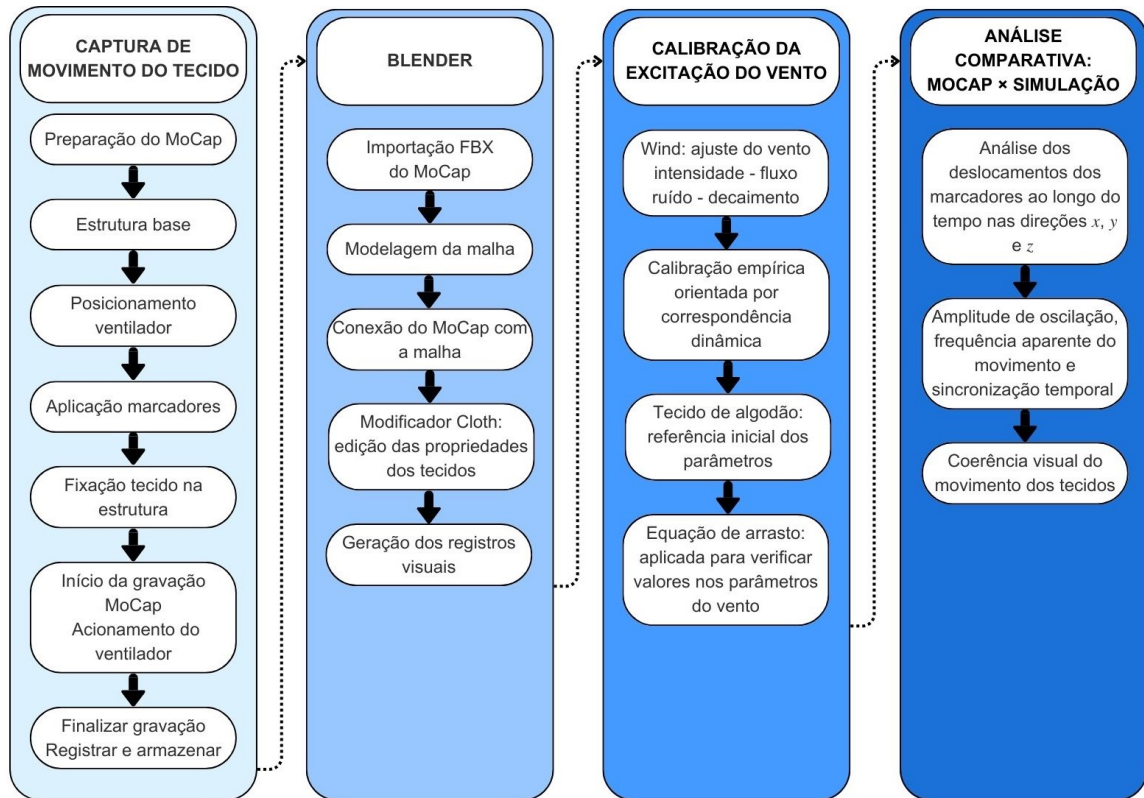
Fonte: elaborada pela autora.

A escolha desses parâmetros fundamenta-se no fato de que, no modelo físico implementado pelo modificador *cloth* do *Blender*, a dinâmica do tecido é predominantemente governada pelos termos de elasticidade estrutural (rigidez) e dissipação de energia (amortecimento), os quais controlam a deformação, a formação de dobras e a atenuação das oscilações ao longo do tempo. Assim, embora o simulador não utilize propriedades têxteis completas em termos de engenharia de materiais, esses parâmetros constituem os descritores dinâmicos centrais disponíveis no ambiente de simulação, sendo diretamente responsáveis pelo comportamento do tecido sob excitação de vento. Dessa forma, sua adoção é coerente com o objetivo da pesquisa de reproduzir e comparar o movimento dinâmico de figurinos em ambiente digital.

O algodão foi utilizado como referência para a calibração inicial. A lã manteve parâmetros semelhantes, refletindo seu comportamento mais estável e a boa concordância com os resultados experimentais. Para o linho, adotaram-se valores ligeiramente inferiores de rigidez, compatíveis com sua maior flexibilidade observada nos ensaios. A seda exigiu ajustes específicos, com maior rigidez efetiva e menor amortecimento no modelo, de modo a preservar o comportamento macroscópico e a estabilidade numérica, mesmo sob a influência significativa da massa dos marcadores.

A Figura 35 apresenta uma visão macro do método proposto, sintetizando as etapas do experimento físico de captura do movimento do tecido, sua integração ao ambiente de simulação no *Blender*, o procedimento de calibração empírica da excitação do vento e a análise comparativa entre os dados de MoCap e a simulação, constituindo o fluxo metodológico da pesquisa.

Figura 35 – Fluxograma macro do método proposto.



Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados obtidos, tanto nos ensaios experimentais quanto nas simulações numéricas, demonstram que o método proposto foi eficaz para caracterizar e comparar o comportamento dinâmico dos tecidos sob ação do vento. A correspondência entre as tendências observadas, como a hierarquia de amplitudes e a influência das propriedades físicas sobre a resposta tridimensional, confirma a validade do modelo adotado e a adequação da calibração realizada no *Blender*. Esses achados reforçam a relação direta entre propriedades materiais, resposta dinâmica e credibilidade visual.

## 5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo propor e aplicar um método de calibração da simulação digital de tecidos, baseado na comparação entre dados de captura de movimento óptica de tecidos reais e simulações digitais, visando à reprodução crível da dinâmica de figurinos em animações 3D. Para isso, analisou-se o comportamento dinâmico de diferentes tecidos: algodão, lã, linho e seda, por meio da captura de movimento óptico e de sua posterior reprodução em simulação computacional no software *Blender*, com foco na aplicação em figurinos para animação. A partir dos ensaios experimentais com excitação aerodinâmica controlada e da análise dos deslocamentos tridimensionais dos tecidos, foi possível identificar padrões de resposta distintos, diretamente relacionados às propriedades físicas e mecânicas de cada material.

Os resultados da captura de movimento evidenciaram que o eixo normal ao plano do tecido (direção x) constitui o principal grau de liberdade excitado pela ação do vento, concentrando as maiores amplitudes de deslocamento e revelando a formação de uma posição média de equilíbrio no regime permanente. Observou-se ainda um aumento progressivo das amplitudes ao longo do comprimento livre do tecido, do marcador mais próximo à fixação até a extremidade inferior, comportamento coerente com as restrições cinemáticas impostas pela condição de engastamento. As direções vertical (z) e lateral (y) apresentaram amplitudes menores, porém relevantes para a caracterização do movimento tridimensional e da expressividade dinâmica dos tecidos.

A comparação entre os materiais revelou diferenças significativas de comportamento, tecidos mais leves e flexíveis, como a seda, apresentaram maiores amplitudes, flutuações mais irregulares e maior sensibilidade à excitação aerodinâmica, enquanto materiais mais pesados ou com maior rigidez e amortecimento, como a lã, exibiram respostas mais contidas e estáveis. Esses resultados reforçam a relação direta entre propriedades físicas dos tecidos e sua percepção visual de leveza, fluidez ou peso, aspecto fundamental para a construção de figurinos animados realistas.

No ambiente de simulação, a calibração do vento a partir do tecido de algodão permitiu estabelecer uma referência comum de excitação aerodinâmica para os demais materiais. Embora o motor de simulação de tecidos do *Blender* opere com parâmetro empíricos e adimensionais, sem correspondência direta com grandezas físicas do

Sistema Internacional, a simulação foi capaz de reproduzir adequadamente o comportamento médio dos tecidos no regime permanente, especialmente no eixo x. De forma geral, as simulações apresentaram respostas mais amortecidas do que as observadas experimentalmente, com menor variabilidade temporal, evidenciando as limitações do modelo de vento do software, que não resolve explicitamente o escoamento nem suas flutuações turbulentas.

Ainda assim, a simulação mostrou-se eficaz na reprodução das tendências globais e da hierarquia de resposta entre os tecidos, com destaque para a boa concordância obtida no caso da lã e para as maiores discrepâncias observadas na seda, material mais sensível a efeitos não linearizados na simulação. Esses achados confirmam que, apesar das simplificações, a simulação fornece subsídios relevantes para a compreensão e o controle do comportamento dinâmico de tecidos em animação, desde que interpretada de forma crítica e contextualizada e pode ser utilizada em bibliotecas de dados.

Entre as limitações do estudo, destacam-se as dificuldades técnicas enfrentadas durante a captura de movimento, como a baixa legibilidade do spray refletivo e da fita refletiva, além da indisponibilidade técnica do equipamento de MoCap após o Plano Experimental 3, o que impactou o cronograma da pesquisa e restringiu o tempo disponível para exploração aplicada dos resultados. Soma-se a isso a impossibilidade de medir diretamente propriedades físicas como rigidez e amortecimento, que precisaram ser tratadas de forma qualitativa e ajustadas empiricamente no ambiente de simulação. Por fim, ressalta-se que a pesquisa concentrou-se no comportamento físico e dinâmico dos tecidos, não contemplando uma avaliação sistemática de aspectos visuais e perceptivos, como textura, brilho ou acabamento.

Apesar dessas limitações, o estudo contribui para a academia pelo caráter interdisciplinar da pesquisa, por articular conhecimentos de diferentes áreas para resolver um problema projetual específico, ampliando o acesso a técnicas de calibração física e criando uma ponte metodológica entre comportamento físico e expressão visual. Para a indústria, as contribuições estão nos parâmetros oferecidos que podem ser usados pelos animadores como ponto de partida, permitindo que o animador ganhe consciência do comportamento físico dos materiais e decida conscientemente quando estilizar ou exagerar o movimento, em vez de trabalhar apenas por tentativa e erro. Portanto, o método amplia o espectro de possibilidades expressivas, especialmente em produções que exigem maior coerência material.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramento desta pesquisa, estudos futuros podem aprofundar a aplicação dos dados experimentais obtidos na criação de figurinos completos para personagens de animação, utilizando os parâmetros ajustados a partir da captura de movimento. Esses figurinos podem ser submetidos à avaliação de especialistas em animação, designers de moda e direção de arte, com o objetivo de verificar o grau de verossimilhança entre o comportamento simulado e a percepção do tecido no mundo real.

Sugere-se também a ampliação do aparato experimental, com a utilização de equipamentos capazes de medir quantitativamente propriedades físicas como rigidez, amortecimento e coeficientes de atrito dos tecidos, permitindo uma calibração mais precisa dos parâmetros de simulação. Da mesma forma, a incorporação de modelos computacionais mais avançados de vento, incluindo a simulação de escoamentos turbulentos ou o acoplamento com ferramentas de dinâmica dos fluidos, pode contribuir para reduzir as discrepâncias observadas entre os dados experimentais e numéricos.

Outra possibilidade de continuidade consiste na análise integrada entre comportamento dinâmico e aparência visual dos tecidos, considerando aspectos estéticos e perceptivos relevantes para a animação, como textura, brilho, transparência e resposta à iluminação. Por fim, recomenda-se a aplicação do método proposto a outros tipos de tecidos e configurações de figurino, bem como a investigação do impacto desses parâmetros no processo criativo e produtivo da animação digital.

## REFERÊNCIAS

- ANDALÓ, Flávio. **Desenvolvimento de procedimentos para utilização da captura de movimentos aplicada em personagens 3D**. 2019. 207 p. Tese (Doutorado em Design) – Programa de pós-graduação em Design, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- BERTICHE, Hugo; MADADI, Meysam; ESCALERA, Sergio. **Neural cloth simulation**. ACM Transactions on Graphics, v. 41, n. 6, artigo 220, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2212.11220>. Acesso em: 04 mar 2024.
- BLENDER. **Simulação de tecidos** — *Blender Manual*. Disponível em: <https://docs.blender.org/manual/pt/2.80/physics/cloth/index.html>. Acesso em: 10 mar 2025.
- COSTA, N. A. C.; COSTA, R. A. T.; JANKOWITSCH, J. **O dilema da inteligência artificial na produção de animações: um debate entre prós e contras**. Revista Portuguesa Interdisciplinar, v. 4, n. 2, p. 74-86, 2023. Disponível em: <https://revistas.editoraenterprising.net/index.php/rpi/article/view/706>. Acesso em: 10 mai 2024.
- DAI, Xiaoqun; HONG, Yan. **Fabric mechanical parameters for 3D cloth simulation in apparel CAD: A systematic review**. Computer-Aided Design, v. 167, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2023.103638>. Acesso em: 04 fev 2025.
- DISNEY. **Divertidamente 2**. Disponível em: <https://www.disney.com.br/filmes/divertidamente-2>. Acesso em: 08 jan 2025.
- DISNEY. **Encanto**. Disponível em: <https://www.disney.com.br/filmes/encanto>. Acesso em: 08 jan 2025.
- DISNEY. **Soul**. Disponível em: <https://www.disney.com.br/disneyplus/soul>. Acesso em: 08 jan 2025.
- DVOŘÁK, T.; KUBIŠTA, J.; LINHART, O.; MALÝ, I.; SEDLÁČEK, D.; UBIK, S. **Presentation of historical clothing digital replicas in motion**. IEEE Access, v. 12, p. 13310-13326, 2024. DOI: <10.1109/ACCESS.2024.3355049>. Acesso em: 04 fev 2025.
- FARIA, Clara Fernandes Pache de. **Museus e a digitalização de trajes: da preservação à realidade aumentada**. 2023. Dissertação (Mestrado em Design de Moda) – Universidade Beira Interior, Portugal, 2023.
- FIGARI BARBERIS, Nicola. **Cloth and hair simulation workflow analysis for an independent animation product**. 2020. Tese de Doutorado. Politecnico di Torino.
- FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 724 p.
- FRANA, Leticia Debastiani; CARVALHO, Diego Moreau de; VIEIRA, Milton Luiz Horn.

**A integração da inteligência artificial no desenvolvimento de figurinos para animação.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 15., 2024, Manaus. Anais [...]. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/5457226.1-347>. Acesso em: 04 fev 2025.

**FROZEN II**; Direção: Chris Buck e Jennifer Lee. Produção: Walt Disney Animation Studios. Estados Unidos: Walt Disney Pictures, 2019.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2008. 200 p.

GOMES, Nuno Miguel Conceição. **O motion capture no cinema de animação - um estudo de caso sobre o filme Aventuras de Tintin: O Segredo do Licorne**. 2021. 95p. Dissertação (Mestrado em Audiovisual e Multimídia) – Escola Superior de Comunicação Social, Lisboa, 2021.

HUANG, Shuxian; HUANG, Li. **CLO3D-based 3D virtual fitting technology of down jacket and simulation research on dynamic effect of cloth**. Application of Neural Network in Mobile Edge Computing, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/5835026>. Acesso em: 04 mar 2024.

JINGYU, Dai; HONGYU, Dai; JIANXING, Wang; XUANZI, Wang. **Children's clothing virtual simulation immersive design and show based on machine learning**. Mobile Information Systems, v. 2021, 9 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/5835026>. Acesso em: 04 mar 2024.

INGHAM, Rosemary; COVEY, Liz. **The Costume Designer's Handbook: A Complete Guide for Amateur and Professional Costume Designers**. Londres: Laurence King Publishing, 2024. E-book.

JU, Eunjung; CHOI, Myung. **Estimating cloth simulation parameters from a static drape using neural networks**. IEEE Access, v. 8, p. 195113-195121, 2020. Disponível em: [10.1109/ACCESS.2020.3033765](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033765). Acesso em: 18 jun 2024.

JULIUS, Jessica. **The art of Frozen 2**. San Francisco: Chronicle Books, 2019. 160 p.

KOGUT, Wojciech. **The analysis of Blender open-source software cloth simulation capabilities**. Journal of Computer Sciences Institute, v. 26, p. 83-87, 2023.

KUBISTA, Jiří et al. **Workflow for creating animated digital replicas of historical clothing**. IEEE Access, v. 12, p. 83707-83718, 2024.

KUTT, Aimei; FONG, Donald; KLOHN, Tiffany. **Adding style, folds, and energy to the costumes of Soul**. In: ACM SIGGRAPH 2021 Talks. 2021. p. 1-2.

LOTTER, Ruan. **Taking Blender to the Next Level: Implement advanced workflows such as geometry nodes, simulations, and motion tracking for Blender production pipelines**. Packt Publishing Ltd, 2022.

MÄNTYLÄ, Otto Eemeli. **Modelling realistic clothing for 3D game characters**. 2025.

MIAO, Jiazhe et al. **GarTemFormer**: temporal transformer-based for optimizing virtual garment animation. *Graphical Models*, v. 136, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2024.101235>. Acesso em: 02 fev 2025.

OLIVEIRA, Rita da Mota. **Desenho de figurinos em videogames**: função versus estética. 2021. Dissertação (Mestrado em Desenho) – Universidade de Lisboa, Faculdade de Belas Artes, Lisboa, 2021.

PATEL, Chaitanya; ZHOUYINGCHENG, Liao; PONS-MOLL, Gerard. **TailorNet**: Predicting clothing in 3D as a function of human pose, shape and garment style. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020. Disponível em: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_CVPR\\_2020/papers/Patel\\_TailorNet\\_Predicting\\_Clothing\\_in\\_3D\\_as\\_a\\_Function\\_of\\_Human\\_CVPR\\_2020\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/papers/Patel_TailorNet_Predicting_Clothing_in_3D_as_a_Function_of_Human_CVPR_2020_paper.pdf). Acesso em: 18 jun 2024.

PENG, Tao et al. **PGN-Cloth**: Physics-based graph network model for 3D cloth animation. *Displays*, v. 80, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2023.102534>. Acesso em: 18 jun 2024.

PEZZOLO, Dinah Bueno. **Tecidos**: história, tramas, tipos e usos. Editora Senac São Paulo, 2021. 328 p.

PIXAR. **Inside Out 2**. Disponível em: <https://www.pixar.com/inside-out-2>. Acesso em: 08 jan 2025.

POSTREL, Virginia I. **The fabric of civilization**: how textiles made the world. First edition. | New York: Basic Books, 2020. 320 p.

PRIM, Gabriel de Souza. **Modelo de análise de equilíbrio utilizando sistema de captura de movimentos**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Programa de Pós-graduação em Design, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM DESIGN. **Mestrado e Doutorado em Design**. Florianópolis, [2024]. Disponível em: <http://www.posdesign.ufsc.br/doutorado-em-design/>. Acesso em: 10 dez 2024.

PROETTI, S. G.; DEL VECHIO, G. H. **A captura de movimento como tecnologia para dar fluidez natural aos movimentos de personagens e objetos 3D**. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 1, p. 82–94, 2020. DOI: <10.31510/infa.v17i1.752>. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/752>. Acesso em: 04 mar 2024.

RESENDE, Fellipe Santos. **Quando o Mocap Dança**: a captura de movimento na documentação e criação coreográficas. 2023. Tese (Doutorado em Artes Cênicas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

REYES LANCASTER-JONES, Juan Pablo. **The Art of Encanto**. Prefácio de Jennifer Lee; “Foreword” de Jared Bush, Byron Howard e Charise Castro Smith. São Francisco: Chronicle Books, 2022.

ROMEIRO, Nicolas Canale. **Criação de cena para a utilização da Realidade Virtual para o auxílio de atores na captura de movimentos**. 2023. 68p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Comunicação e Expressão, Programa de Pós-graduação em Design, Florianópolis, 2023.

SANTESTEBAN, Igor; OTADUY, Miguel A.; CASAS, Dan. **Learning-based animation of clothing for virtual try-on**. arXiv, v. 38, n. 2, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1903.07190>. Acesso em: 04 mar 2024.

SUN, Li. **Research on the application of 3D animation special effects in animated films: taking the film Avatar as an example**. Hindawi Scientific Programming, v. 2022, art. ID 1928660, 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/1928660>. 04 mar 2024.

TICHAUER, Sebastián Alejandro Vega. **Simulación de telas representadas por triángulos: teoría e implementación**. 2023. (Título de Ingeniero Civil en Computación) – Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ciencias de la Computación, Santiago de Chile, 2023.

VAN DYK, Colby. **Developing fashion for video games: exploring design processes integrating Browzwear, Clo, and Unreal Engine**. 2024. Dissertação (Mestrado em Apparel Merchandising and Textiles) - Washington State University, Department of Apparel, Merchandising, Design and Textiles, Pullman, 2024.

VILLAR, Oliver. **Learning blender**. Addison-Wesley Professional, 2021. 448 p.

WILLIAMS, Temi Ami; SERGHIDES, Christina-Georgia; ARISTIDOU, Andreas. **Digitizing traditional dances under extreme clothing: The case study of Eyo**. Journal of Cultural Heritage, v. 67, p. 145-157, 2024. ISSN 1296-2074. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.02.011>. Acesso em: 05 dez. 2024.

YU, Tao; ZHENG, Zerong; ZHONG, Yuan; ZHAO, Jianhui; DAI, Qionghai; PONS-MOLL, Gerard; LIU, Yebin. **SimulCap: Single-View Human Performance Capture with Cloth Simulation**. arXiv preprint, v2. 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1903.06323>. Acesso em: 05 dez. 2024.

ZHANG, Meng; CEYLAN, Duygu; WANG, Tuanfeng; MITRA, Niloy J. **Dynamic Neural Garments**. Computer Vision and Pattern Recognition, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2102.11811>. Acesso em: 05 dez. 2024.