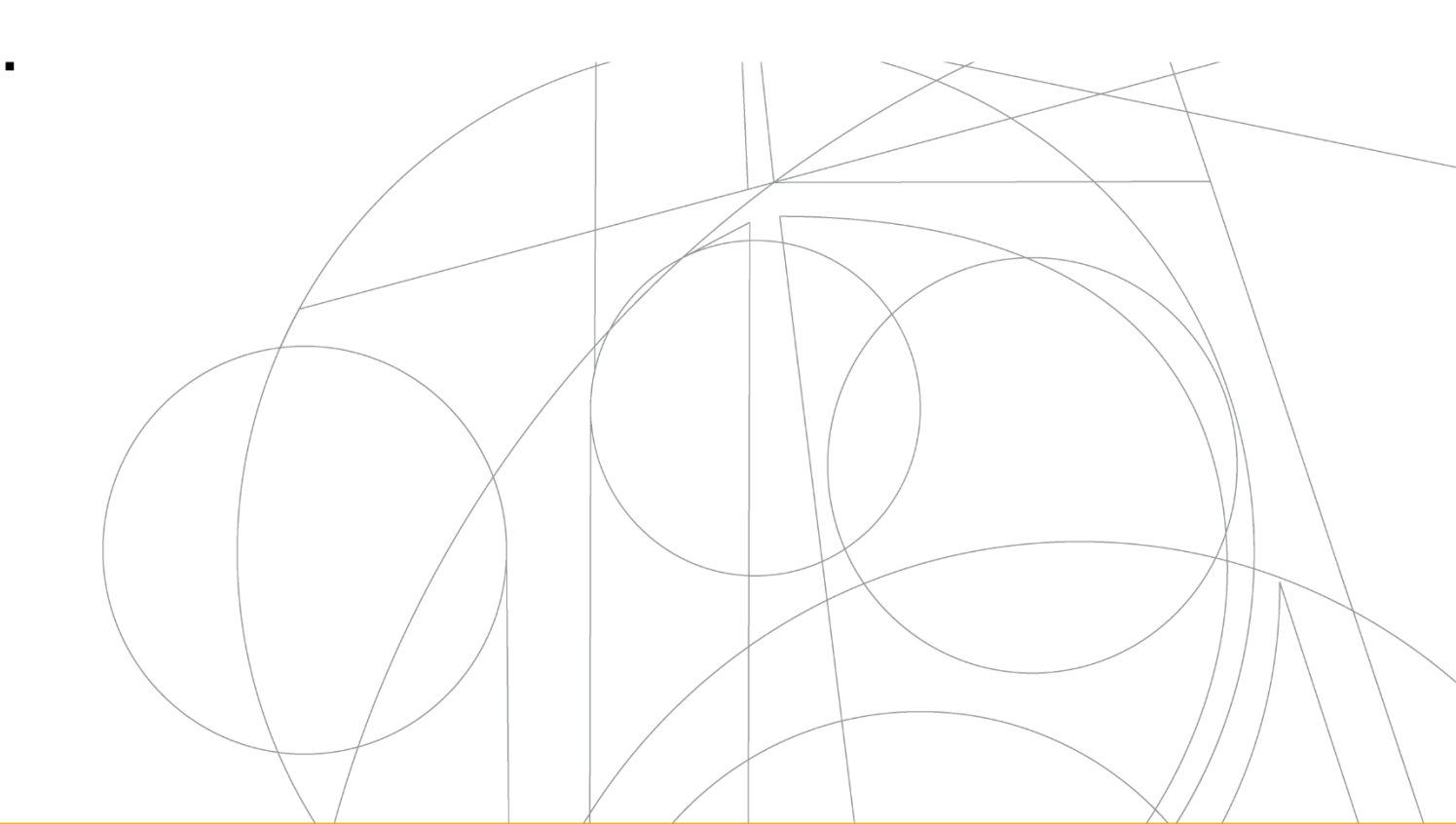
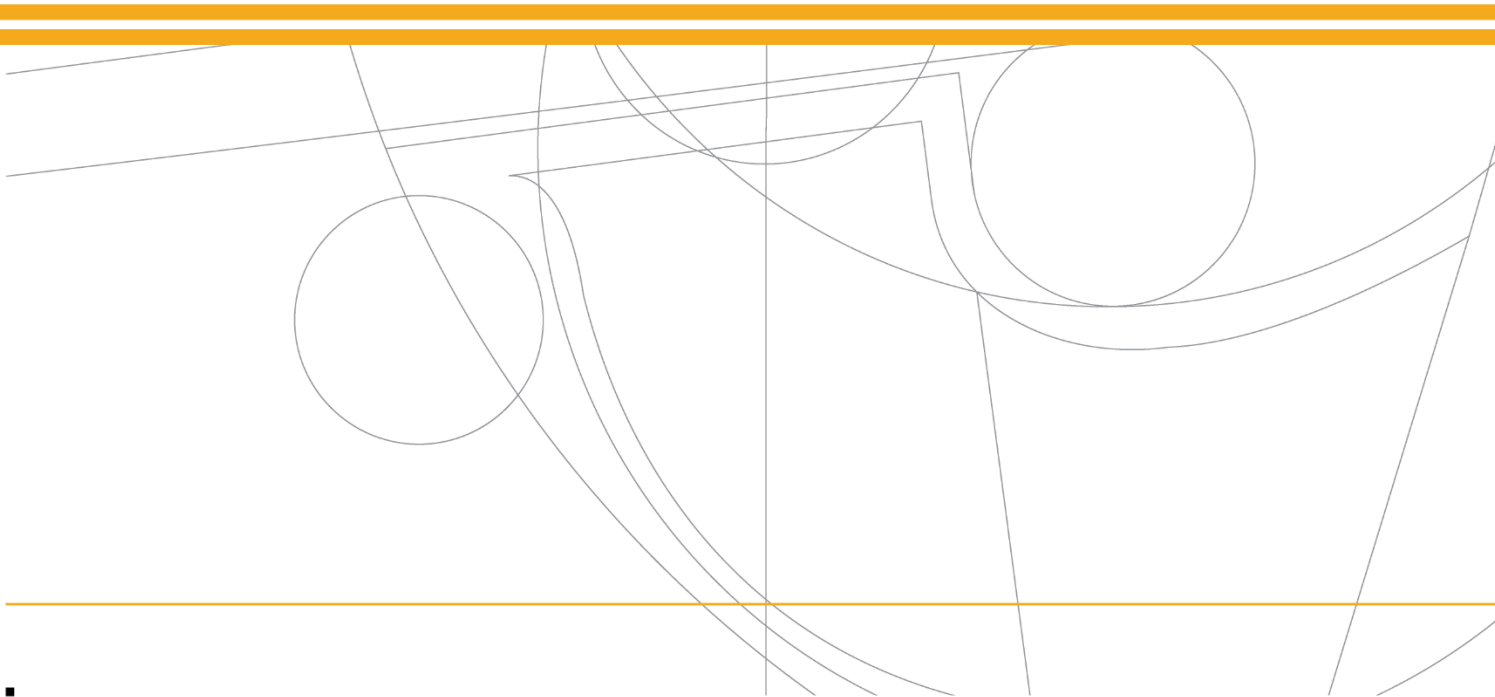
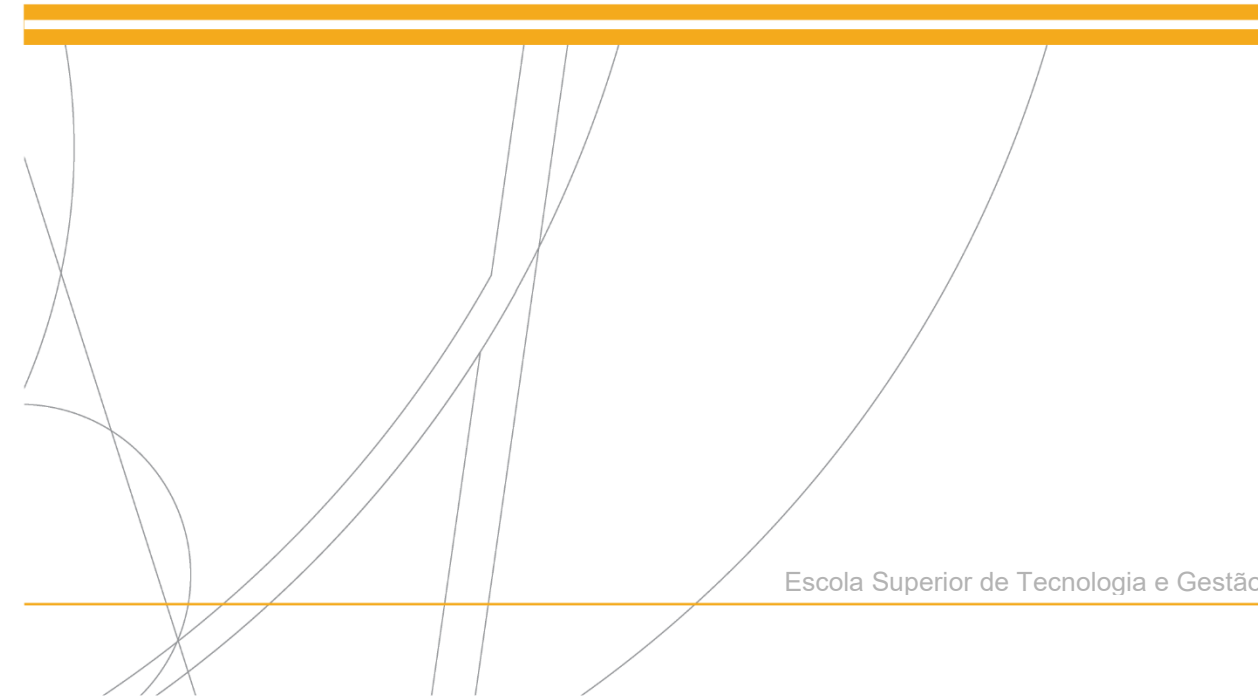




Conceção Colaborativa de Comportamento Dinâmico de Tecidos

João Henrique Pitrez Ferreira dos Santos

Este trabalho foi financiado pelo projeto “TEXP@CT: Pacto de Inovação para a Digitalização do STV”, no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência-02-C05-i01.01-2022.PC644915249-00000025, integrado no subprojeto “WP 2.2 (PPS #8): Plataforma Digital Twin para a Indústria Têxtil”.



INSTITUTO POLITÉCNICO DE VIANA DO CASTELO

Conceção Colaborativa de Comportamento Dinâmico de Tecidos

João Henrique Pitrez Ferreira dos Santos

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO



Mestrado em Engenharia Informática
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Orientador: Professor Doutor Luís Miguel Cabrita Romero

Orientador: Professor Doutor Pedro Miguel Teixeira Faria

17 de outubro de 2026

Resumo

A digitalização da indústria têxtil e do vestuário tem criado novas oportunidades para a representação, análise e validação de peças e materiais em ambientes digitais, mas a informação técnica relacionada aos tecidos, utilizada nomeadamente nos certificados digitais, continua muitas vezes separada da sua representação visual, o que dificulta a interpretação e utilização desses dados nos processos de desenvolvimento de produto.

Dito isto, neste contexto a presente dissertação teve como objetivo o desenvolvimento do FabricX, uma plataforma interativa para visualização, personalização e análise de peças digitais de vestuário. A solução proposta junta ferramentas de prototipagem 3D, motores de jogo, dados técnicos de tecidos, padrões gerados por Inteligência Artificial e funcionalidades colaborativas num único ambiente tridimensional.

O desenvolvimento do FabricX foi realizado em várias fases. A primeira fase é a criação e a preparação de uma peça digital no CLO3D, que depois é exportada em formato FBX para integração no Unreal Engine. No Unreal Engine, foram implementadas funcionalidades de seleção de peças, aplicação de materiais, edição de padrões, alteração de propriedades visuais, pré-visualização da peça e uma primeira abordagem à simulação física e à Realidade Virtual.

A plataforma está preparada também para integrar sistemas externos desenvolvidos no âmbito do projeto. A ligação aos certificados digitais de tecidos permite importar mapas e parâmetros associados aos materiais e também tem a ligação com padrões gerados por Inteligência Artificial que possibilita a aplicação de novas texturas às peças. Para além disto, também foi implementada uma componente multiutilizador baseada numa lógica *host*-cliente, permitindo que vários utilizadores acessem ao mesmo ambiente virtual e acompanhem, de forma sincronizada, as alterações realizadas sobre a peça.

Os resultados obtidos no final da dissertação, demonstram que o FabricX é uma primeira versão funcional de uma plataforma com muito potencial no futuro e os utilizadores que testaram demonstraram um elevado grau de satisfação com a solução proposta.

Palavras-chave: Vestuário Digital; Simulação de Tecidos; Unreal Engine; CLO3D; Certificados Digitais de Tecidos; Realidade Virtual; Colaboração Multiutilizador; FabricX.

Abstract

The digitization of the textile and apparel industry has created new opportunities for the representation, analysis, and validation of garments and materials in digital environments; however, technical information related to fabrics—used, in particular, in digital certificates—often remains separate from their visual representation, which hinders the interpretation and use of this data in product development processes.

That said, the aim of this thesis was to develop FabricX, an interactive platform for the visualization, customization, and analysis of digital garments. The proposed solution combines 3D prototyping tools, game engines, technical fabric data, AI-generated patterns, and collaborative features within a single three-dimensional environment.

The development of FabricX was carried out in several phases. The first phase involves creating and preparing a digital garment in CLO3D, which is then exported as an FBX for integration into Unreal Engine. In Unreal Engine, features for garment selection, material application, pattern editing, modification of visual properties, garment preview, and an initial approach to physical simulation were implemented.

The platform is also designed to integrate external systems developed as part of the project. The connection to digital fabric certificates allows for the import of maps and parameters associated with the materials, and it also links to patterns generated by Artificial Intelligence, enabling the application of new textures to the garments. In addition, a multi-user component based on a *host-client* architecture was implemented, allowing multiple users to access the same virtual environment and track, in real time, the changes made to the garment.

The results obtained at the end of the dissertation demonstrate that FabricX is a first functional version of a platform with great future potential, and the users who tested it expressed a high degree of satisfaction with the proposed solution.

Keywords: Digital Clothing; Fabric Simulation; Unreal Engine; CLO3D; Digital Fabric Samples; Virtual Reality; Multi-user Collaboration; FabricX.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradecer à minha família e namorada, pelo apoio, paciência e confiança que tiveram comigo ao longo do meu percurso académico. Um obrigado especial aos meus orientadores Professor Doutor Luís Romero e Professor Doutor Pedro Faria por me motivarem e estarem sempre presentes para me ajudar no que fosse preciso.

Gostaria também de agradecer a todos os colegas e elementos envolvidos no projeto, André Costa, João Mirra, João Miranda, João Borlido, Celina Peneda, Diogo Araújo, Válder Gomes e Vítor Amorim pelo espírito de colaboração, pela troca de ideias e pela ajuda que me deram durante o desenvolvimento do projeto.

Agradeço também às empresas que estiveram associadas ao projeto, pela disponibilidade, colaboração e apoio demonstrado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, ajudaram para a realização desta dissertação. Este trabalho representa não apenas o resultado de um percurso académico, mas também um processo de aprendizagem, adaptação e superação, no qual cada apoio recebido teve a sua importância.

A todos, o meu sincero obrigado.

João Santos

*“Visualization gives us answers
to questions we didn’t know we had.”*

Ben Shneiderman

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Metodologia de Investigação	3
1.4	Estrutura da Dissertação	5
2	Enquadramento Teórico e Tecnológico	6
2.1	Revisão Sistemática	6
2.2	Digitalização da Indústria Têxtil e do Vestuário	7
2.3	Trabalhos Relacionados	11
2.3.1	Simulação Digital de Tecidos	11
2.3.2	Modelação e Design de Vestuário 3D	15
2.3.3	Motores de Jogo como Ferramentas Técnicas	17
2.3.4	Ambientes Multiutilizador e Colaboração Virtual	19
2.3.5	Realidade Virtual	21
2.3.6	Síntese e Reflexão Crítica	24
3	Estudo de Ferramentas	26
3.1	Estudo e Seleção de Ferramentas Tecnológicas	27
3.1.1	Unity	27
3.1.2	Unreal Engine	31
3.1.3	Comparação Unity vs Unreal Engine	36
3.2	Seleção da Ferramenta de Prototipagem 3D de Vestuário	39
3.2.1	CLO3D	39
3.2.2	Browzwear VStitcher	41
3.2.3	Comparação CLO3D vs Browzwear VStitcher	42
3.3	Ferramentas de Apoio à Preparação de Modelos 3D	44
3.3.1	Blender	44
3.3.2	Autodesk Maya	45
3.3.3	Comparação Blender vs Maya	47
4	Arquitetura e Desenvolvimento do Sistema	49
4.1	Visão Geral da Arquitetura	50
4.2	Fase 1: Criação e Preparação da Peça Digital	51
4.3	Fase 2: Integração no Unreal Engine	55
4.3.1	Fluxo de Utilização do FabricX	55

4.3.2	Implementação da Interface e Funcionalidades Base	56
4.4	Fase 3: Integração com Sistemas Externos	70
4.4.1	Importação de Materiais a partir do Certificado Digital	71
4.4.2	Integração de Padrões Gerados por Inteligência Artificial	75
4.5	Fase 4: Colaboração Multiutilizador e Sincronização	76
4.5.1	Modo Host e Cliente	77
4.5.2	Sistema de Comunicação entre Utilizadores	78
4.5.3	Sincronização de Alterações entre Utilizadores	80
5	Testes, Resultados e Discussão	83
5.1	Metodologia de Avaliação	83
5.1.1	Participantes	84
5.1.2	Casos de Uso Avaliados	85
5.1.3	Instrumento de Recolha de Dados	86
5.2	Resultados	87
5.3	Discussão	89
6	Conclusões e Trabalho Futuro	91
6.1	Conclusão Geral	91
6.2	Cumprimento dos Objetivos	92
6.3	Trabalho Futuro	93
6.4	Considerações Finais	93
	Referências	95
A	Trabalho Publicado	103

Lista de Figuras

1.1	A estrutura metodológica para a ciência do design [1].	3
2.1	Processo de identificação, seleção e inclusão dos estudos considerados na revisão sistemática da literatura.	8
2.2	Estrutura de um certificado digital de tecido, desde a caracterização da amostra física até à certificação e validação.	10
2.3	Comparação das medidas dos kits de tecido KES-FB e CLO: (a) massa por unidade de área, (b) espessura, (c) curvatura e (d) coeficiente de drapeado.	14
2.4	Comparação entre a malha visual detalhada e a malha <i>proxy</i> simplificada utilizada para simulação física em tempo real.	15
2.5	Fluxo integrado do processo de design de vestuário digital, evidenciando a ligação entre modelação 3D, geração de padrões 2D e simulação [7].	16
2.6	Processo de modelação inversa de vestuário, no qual uma forma 3D é utilizada para gerar padrões 2D e uma peça preparada para simulação [40].	17
2.7	Interação de utilizadores com peças de vestuário digital em ambiente de Realidade Virtual, adaptado de [21].	21
2.8	Processo de geração de um espaço virtual partilhado entre utilizadores com diferentes restrições físicas, incluindo segmentação espacial e alinhamento de avatares, adaptado de [15].	23
3.1	Diagrama das relações entre as classes principais do Gameplay Framework da Unreal Engine [57].	33
3.2	Blueprint utilizado para criar dinamicamente a grelha de padrões no FabricX.	33
3.3	Integração entre o ambiente 2D e o ambiente 3D no CLO3D, permitindo a criação de moldes, definição de costuras e visualização simultânea da peça sobre o avatar, adaptado de [25].	40
4.1	Arquitetura geral do FabricX e integração entre ferramentas externas, dados técnicos, padrões visuais e ambiente interativo.	50
4.2	Criação da T-shirt no CLO3D, com visualização simultânea da peça em 3D e dos moldes bidimensionais utilizados na sua construção.	52
4.3	Comparação entre o mapa UV original da T-shirt e a máscara de segmentação criada para o FabricX	53
4.4	Fluxo de utilização do FabricX, desde a entrada na aplicação até à personalização, visualização e análise da peça digital.	57
4.5	Área de seleção das peças importadas no ambiente FabricX.	59
4.6	Interface de seleção e alteração do avatar utilizado para visualização da peça no ambiente FabricX.	60

4.7	Interface do MetaHuman Creator, evidenciando o nível de detalhe visual de um dos avatares digitais criados para a visualização de peças no FabricX.	61
4.8	Menu de personalização no ambiente do FabricX.	62
4.9	Lógica em <i>Blueprint</i> utilizada para selecionar um material através da interface e aplicá-lo à peça digital.	63
4.10	Interface de edição visual por regiões, permitindo alterar cor, padrão, escala e rotação na peça.	64
4.11	Lógica em <i>Blueprint</i> utilizada para alterar a cor da região selecionada através de valores RGB.	65
4.12	Interface de ajuste das propriedades visuais do material, incluindo brilho, opacidade, intensidade, saturação e contraste.	66
4.13	Construção do menu de personalização no <i>Widget Blueprint</i> do Unreal Engine.	67
4.14	Pré-visualização da peça de forma isolada, permitindo a análise detalhada dos padrões e materiais aplicados.	68
4.15	Pré-visualização da peça com simulação física ativa e acesso à edição de propriedades físicas.	69
4.16	Estúdio virtual criado no Unreal Engine para a pré-visualização isolada da peça.	69
4.17	Pré-visualização da T-shirt aplicada num avatar digital no ambiente FabricX.	70
4.18	Interface de importação de material a partir dos mapas associados ao certificado digital do tecido.	72
4.19	Lógica em <i>Blueprint</i> utilizada para associar os mapas do certificado digital aos parâmetros do material dinâmico.	73
4.20	Interface de edição das propriedades físicas do tecido, incluindo gramagem, rigidez, elasticidade, fricção e cisalhamento.	74
4.21	Interface de integração de padrões e texturas gerados por Inteligência Artificial para aplicar nas peças digitais do FabricX.	75
4.22	Interface inicial do FabricX para criação ou entrada numa sala colaborativa através do modo <i>host</i> ou cliente.	76
4.23	Lógica em <i>Blueprint</i> utilizada para iniciar uma sessão como <i>host</i> ou estabelecer ligação como cliente através de endereço IP.	78
4.24	Interface colaborativa do FabricX, incluindo sistema de chat, controlo de microfone, lista de utilizadores e comandos de interação no ambiente virtual.	78
4.25	Lógica em <i>Blueprint</i> utilizada para enviar e apresentar mensagens no sistema de chat do FabricX.	79
4.26	Lógica em <i>Blueprint</i> utilizada para distribuir as mensagens de chat pelos utilizadores ligados à sessão colaborativa.	80
4.27	Lógica em <i>Blueprint</i> utilizada para atualizar o padrão da T-shirt de acordo com a região selecionada.	82
4.28	Aplicação do padrão ao material dinâmico da peça através de <i>Blueprint</i>	82
4.29	Evento replicado utilizado para sincronizar a atualização do padrão entre os utilizadores da sessão.	82
5.1	Pontuação normalizada das questões do questionário de avaliação do FabricX.	88
A.1	Artigo publicado no <i>5th Symposium of Applied Science for Young Researchers: Book of Abstracts</i>	104
A.2	Certificado de apresentação oral do artigo <i>Collaborative Fabric Design with AI and 3D Simulation</i> , apresentado no <i>Symposium of Applied Science for Young Researchers 2025</i>	105

A.3	Artigo <i>Collaborative AI-Driven Design and Realistic 3D Simulation of Dynamic Fabric Behavior</i> , publicado nos proceedings do <i>MCCSIS 2025</i>	106
A.4	Artigo publicado no <i>Symposium of Applied Science for Young Researchers 2026</i>	107
A.5	Certificado de apresentação oral do artigo <i>3D Simulation of Fabric Physical Properties and Behaviour</i> , apresentado no <i>Symposium of Applied Science for Young Researchers 2026</i>	108

Lista de Tabelas

2.1	Síntese dos principais trabalhos relacionados.	25
3.1	Comparação dos motores de física	29
3.2	Comparação entre Unity Engine e Unreal Engine em áreas-chave.	37
3.3	Comparação dos requisitos de sistema para Unity Engine e Unreal Engine.	38
3.4	Requisitos mínimos e recomendados para utilização do CLO3D.	41
3.5	Requisitos mínimos e recomendados para utilização do Browzwear VStitcher e Lotta em Windows.	42
3.6	Requisitos mínimos e recomendados para utilização do Blender.	46
3.7	Requisitos técnicos para utilização do Autodesk Maya.	47
5.1	Caracterização dos participantes na avaliação do FabricX	84
5.2	Casos de uso utilizados na avaliação do FabricX.	85
5.3	Análise comparativa entre o FabricX e os trabalhos relacionados.	90

Abreviaturas e Símbolos

RV	Realidade Virtual
DSR	Design Science Research
2D	Two-dimensional
3D	Three-dimensional
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
URP	Universal Render Pipeline
HDRP	High Definition Render Pipeline
RGB	Red, Green, and Blue
AI	Artificial Intelligence
VR	Virtual Reality
PNG	Portable Network Graphics
JPG	Joint Photographic Experts Group
JPEG	Joint Photographic Experts Group
ECS	Entity Component System
DOTS	Data-Oriented Technology Stack
HUD	Heads-Up Display
AAA	Triple A
FBX	Filmbox
SUS	System Usability Scale
GPU	Graphics Processing Unit
CPU	Central Processing Unit
MMORPG	Massively Multiplayer Online Role-Playing Game

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

As ferramentas de simulação em 3D ganharam espaço em áreas como design de produtos, moda, engenharia e jogos. A simulação de tecidos, feita por computador, ajuda a prever como diferentes materiais se comportam em diferentes cenários. Diminuindo a necessidade da criação de protótipos físicos, tornando o desenvolvimento mais rápido, preciso e com menos impacto ambiental [29].

Ao mesmo tempo, os motores de jogos já não servem só para entretenimento. Ferramentas como Unity e Unreal Engine, que antes eram unicamente utilizados para jogos, agora são usados para inúmeras outras aplicações tecnológicas de uma forma mais avançada, fazer protótipos, simular leis da física e criar ambientes virtuais onde as pessoas consigam interagir entre elas. Dito isto, devemos considerar estes motores para usos mais técnicos além do mundo dos jogos [2].

A certificação digital é o processo de validação e autenticação de informações digitais, garantindo a fiabilidade, integridade e correta interpretação dos dados num ambiente digital [97], para isso é fundamental que os dados contidos nos mesmos, como propriedades físicas, como o material reage, as suas texturas e padrões, possam ser lidos e vistos corretamente num ambiente digital. A capacidade de colocar e mostrar esses dados de forma fiel num motor de jogo é o que permite uma análise mais detalhada e real dos tecidos. Isso resulta em processos de validação mais rigorosos e bem informados.

A utilização do 3D e da Realidade Virtual neste contexto permite uma análise imersiva e interativa dos tecidos, o que proporciona uma percepção ao utilizador mais próxima do comportamento real dos materiais em comparação com visualizações bidimensionais tradicionais. Esta abordagem facilita a avaliação de propriedades físicas e visuais, ajudando em decisões mais informadas nas áreas de design têxtil e engenharia de materiais [3].

Apesar da crescente digitalização dos processos industriais, os certificados digitais são processos muito extensos e com muita informação [4], o que dificulta bastante alguém que não esteja habituado a lidar com esta informação no dia a dia ter uma percepção de como o material se comporta na vida real.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo consiste no desenvolvimento do *FabricX*, uma aplicação capaz de a partir dos dados técnicos de um certificado digital, representar um tecido em três dimensões, num ambiente que permita simular o seu comportamento físico e visual, com o objetivo que o utilizador consiga fazer uma análise que pode ser 2D, 3D ou em RV facilitando assim a compreensão, avaliação e validação das propriedades do tecido em contexto digital, permitindo também a personalização da peça.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- **Analisar os dados de um certificado digital de tecido**, identificando os parâmetros técnicos necessários para uma representação fiel do tecido;
- **Desenvolver um método em que seja possível de forma automatizada ler e interpretar dados do certificado digital**, permitindo a importação, validação e mapeamento dos parâmetros para estruturas compatíveis com o software;
- **Implementar a representação visual e física do tecido no software**, garantir que as propriedades físicas e estéticas do material que estão descritas no certificado correspondem ao tecido final representado no software.
- **Desenvolver uma camada interoperável de partilha de certificados digitais entre a aplicação criada e o sistema de certificados digitais desenvolvido noutra projeto**, no qual possibilita em tempo real o utilizador importar dados de um certificado digital para a aplicação e visualizar como é que esses dados influenciam a representação do tecido.
- **Desenvolver uma camada interoperável de cocriação de padrões com Inteligência Artificial entre a aplicação criada e o sistema desenvolvido noutra projeto**, que foi realizado por outro colega de outro trabalho desenvolvido no âmbito do projeto, permitindo ao utilizador conseguir utilizar esses padrões na personalização da peça;
- **Implementar funcionalidades de personalização da peça**, permitindo ao utilizador alterar/editar materiais, padrões, cores, texturas;
- **Desenvolver um ambiente multiutilizador**, no qual vários utilizadores consigam estar presentes na mesma sala (espaço virtual), com uma sincronização constante do estado da simulação para que os utilizadores consigam estar a trabalhar todos juntos numa só peça.
- **Implementar a visualização da peça por meio da Realidade Virtual**, permitindo ao utilizador uma análise imersiva e interativa do material.

1.3 Metodologia de Investigação

Design Science Research

Design Science Research (DSR) é utilizada para desenvolver e avaliar artefactos tecnológicos criados para solucionar problemas identificados em situações no mundo real. A DSR fornece uma abordagem estruturada para os projetos, uma implementação e avaliação de soluções computacionais, sendo utilizada principalmente em pesquisas relacionadas com sistemas de informação e engenharia de software. A estrutura geral desta dissertação é organizada seguindo esse mesmo modelo [1], que descreve as etapas iterativas do processo de pesquisa, desde a formulação do problema até à comunicação dos resultados da pesquisa conforme ilustrado na Figura 1.1.

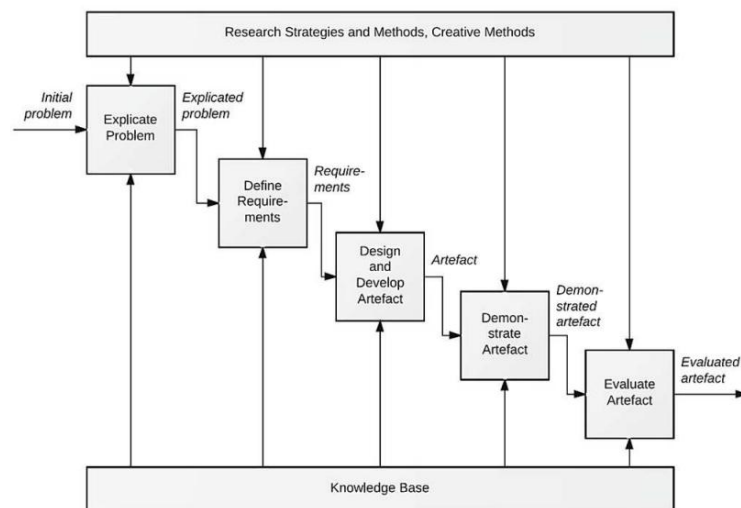


Figura 1.1: A estrutura metodológica para a ciência do design [1].

A metodologia *Design Science Research* divide-se em cinco fases principais. Cada fase produz resultados que servem de entrada para a fase seguinte. Envolve processos bem definidos, como a conceção e avaliação dos artefactos produzidos, a produção de contribuições científicas e a apresentação dos resultados obtidos.

- **Problema inicial** – A dificuldade de interpretação de um certificado digital, pois são documentos técnicos e de visualização bidimensional, o que dificulta a compreensão do comportamento físico e visual dos materiais.
- **Problema Explicado** – A necessidade de uma solução que consiga transformar os dados técnicos de certificados digitais em representações visuais interativas e imersivas, de modo a que seja possível a um utilizador sem conhecimentos técnicos, visualmente perceber como o tecido ou o material se comporta.

- **Definição de Requisitos** – A partir do problema identificado foram definidos os requisitos funcionais e não funcionais da solução.

Os requisitos funcionais incluem a importação e interpretação de certificados digitais de tecidos, a integração com sistemas externos de certificados e de geração de padrões por Inteligência Artificial, a seleção e personalização de peças, a alteração de propriedades visuais e físicas dos materiais, a visualização tridimensional da peça, a simulação física, a colaboração multiutilizador e a sincronização das alterações realizadas no ambiente partilhado.

Ao nível dos requisitos não funcionais, foram considerados aspetos como a usabilidade da interface, a resposta das alterações em tempo real, a interoperabilidade com sistemas externos, a modularidade da solução e a possibilidade de expansão futura para novas funcionalidades, nomeadamente Realidade Virtual.

- **Design e Desenvolvimento do Artefacto** – Nesta fase foi definida a arquitetura do FabricX e o fluxo de informação entre os diferentes componentes da solução. O design considerou a preparação das peças digitais em ferramentas externas, a sua integração no Unreal Engine, a comunicação com os sistemas de certificados digitais e de padrões gerados por Inteligência Artificial, bem como a componente colaborativa multiutilizador.
- **Demonstração do Artefacto** – É apresentado o sistema criado por meio de cenários de uso, onde os utilizadores conseguem interagir com o material, analisar ou editar as propriedades e realizar todas as operações num modo colaborativo no mesmo ambiente virtual
- **Avaliação do Artefacto** – Avalia-se a fidelidade, a usabilidade e o desempenho da solução ao comparar os resultados da simulação e os dados técnicos do certificado digital, com análise da eficácia da colaboração entre múltiplos utilizadores e obter as opiniões dos diversos utilizadores que testaram o artefacto.
- **Base de Conhecimento** – Este trabalho parte do conhecimento já consolidado em simulação têxtil, motores de jogo, Realidade Virtual e certificação digital, e discute de que modo o artefacto desenvolvido pode apoiar investigações futuras e sustentar aplicações em contexto industrial. Isto pode ser alcançado através da publicação de artigos científicos em conferências ou revistas científicas.

Em síntese, a aplicação do modelo de *Design Science Research* permitiu estruturar o desenvolvimento da solução do trabalho de forma sistemática, garantindo que o artefacto criado responda ao problema identificado e é devidamente demonstrado e avaliado.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, organizados de maneira a apresentar, de forma gradual, o contexto do problema, a base teórica, a análise de trabalhos, o estudo das ferramentas, a arquitetura sugerida, testes e validação e, por último, as conclusões alcançadas.

O Capítulo 1 aborda o contexto, os objetivos e a metodologia de pesquisa utilizada para a realização deste trabalho.

No Capítulo 2, é apresentado o Enquadramento Teórico e Tecnológico. Neste capítulo, são descritas as principais tecnologias e paradigmas fundamentais utilizados neste trabalho, também é realizada uma revisão sistemática e discutidos os trabalhos relacionados com o tema da dissertação. Primeiro é apresentada a revisão sistemática da literatura, e em seguida são examinados estudos sobre temas relevantes para a dissertação. Com esse enquadramento, podemos entender os princípios que sustentam o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 3, é feita uma comparação entre várias ferramentas tecnológicas que são relevantes para o projeto.

Na arquitetura do Sistema, que é descrita no Capítulo 4, é apresentada a arquitetura do sistema desenvolvido e os detalhes da sua implementação.

No Capítulo 5, são apresentados os testes e os resultados obtidos com a implementação do sistema. É analisado o desempenho da solução proposta e a aceitação por parte dos utilizadores.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões da dissertação e discutidas as principais contribuições deste trabalho. São sugeridas possíveis direções para trabalho futuro, incluindo melhorias que serão feitas no futuro.

Capítulo 2

Enquadramento Teórico e Tecnológico

Esta secção tem como objetivo apresentar o enquadramento teórico e tecnológico que fundamentam a dissertação, são apresentados inicialmente os conceitos principais, as abordagens e as tecnologias utilizadas ao longo do projeto, permitindo assim construir uma base na qual seja possível desenvolver o artefacto proposto. Dito isto, é realizada uma revisão da literatura com o objetivo de perceber o panorama atual dos estudos relacionados com o tema, não se trata apenas de compilar a informação que já existe, mas sim de tratá-la e perceber como ela se enquadra no devido contexto e o seu contributo.

Ao longo desta análise foram analisados diversos trabalhos e artigos com o objetivo de compreender como diferentes abordagens têm vindo a responder aos desafios existentes a estas áreas. Por um lado os autores, encontram soluções diferentes e criativas para os problemas, outros evidenciam ainda mais as fragilidades, lacunas e mesmo oportunidades que possam ser exploradas no futuro.

É então estabelecida uma comparação entre diferentes abordagens de diferentes autores, permitindo não só a uma leitura do estado da arte mas também à identificação de espaços que possam ser explorados. É neste jogo entre do que já foi feito e criado e o que ainda está por fazer ou corrigir que se percebe com uma maior clareza, o posicionamento desta dissertação. Compreender o que já foi realizado é certamente o primeiro passo para traçar o caminho que se segue.

2.1 Revisão Sistemática

Inicialmente foi feita uma revisão da literatura para conseguir identificar e analisar, quais os contributos que foram mais relevantes nesta área da simulação digital de tecidos. Este processo é um importante começo porque assim é possível analisar cada estudo, a sua pertinência e a sua aplicabilidade neste contexto, dando origem a melhores ideias e diferentes abordagens. A revisão foi feita de acordo com as recomendações do PRISMA 2020 [11].

A pesquisa foi realizada através da combinação de palavras-chave e operadores booleanos. Foram utilizadas expressões como “fabric simulation”, “digital textile*”, “game engine*”, “Unreal

Engine”, “virtual reality” e “collaborative virtual environment*”, combinadas através dos operadores AND e OR. Um exemplo de expressão de pesquisa utilizada foi:

("fabric simulation"OR "digital textile*") AND ("game engine*"OR "Unreal Engine")
AND ("virtual reality"OR "collaborative virtual environment*")

De forma a garantir a atualidade tecnológica dos estudos analisados só foram considerados artigos científicos publicados a partir de 2020.

Numa fase inicial foi obtido um conjunto alargado de publicações/artigos, com a progressiva análise de artigos esse conjunto foi diminuído através da análise do título, do resumo e das palavras-chave. Após esta primeira triagem, os artigos considerados relevantes foram analisados em maior profundidade, ainda assim alguns acabaram por ser excluídos por não apresentarem contributos significativos para o contexto específico do presente trabalho.

A análise final foi a mais importante, mais exigente e demorada, pois permitiu identificar de um grupo grande de artigos quais são verdadeiramente relevantes. Este resultado revelou um dado importante e explorado no qual embora existam contributos nas áreas da Realidade Virtual, dos motores de jogo e da simulação digital, continuam a ser escassas as abordagens que integrem estas tecnologias de forma conjunta. Em particular notou-se que não existem soluções que utilizem dados provenientes de certificados digitais para a representação de tecidos em ambientes imersivos e colaborativos.

Perante esta análise tornou-se mais que evidente a importância de explorar este tema e desenvolver uma solução que consiga unir estas diferentes áreas. E é precisamente isso que é explorado, o trabalho procura não apenas combater estas lacunas que existem, mas também abrir caminho para futuras investigações neste domínio.

2.2 Digitalização da Indústria Têxtil e do Vestuário

O estado atual da indústria têxtil e de vestuário é caracterizado por um crescente processo de globalização e distribuição da cadeia de produção. O desenho de uma peça de vestuário pode envolver designers, marcas, fornecedores de materiais, unidades de fabricação e clientes, os quais estão localizados em diferentes regiões geográficas, exigindo assim um intercâmbio contínuo de informações entre todos os envolvidos.

Num ambiente assim o uso de meios digitais ajuda a superar certas restrições associadas à produção convencional e facilita o intercâmbio de informações, a visualização de produtos antes da produção real, bem como a colaboração entre equipas de indivíduos geograficamente separados. Além disso a criação de modelos digitais de vestuários e materiais permite a antecipação das decisões tomadas em relação ao desenho, a aparência, ao comportamento e aos materiais utilizados, reduzindo a necessidade de inúmeras etapas de prototipagem física.

Além da conexão entre todos os envolvidos na cadeia de produção, a transformação digital também possibilitou a aproximação do produto com o cliente. Utilizando ambientes 3D, experiências virtuais e técnicas de personalização, os produtos podem ser apresentados e explorados

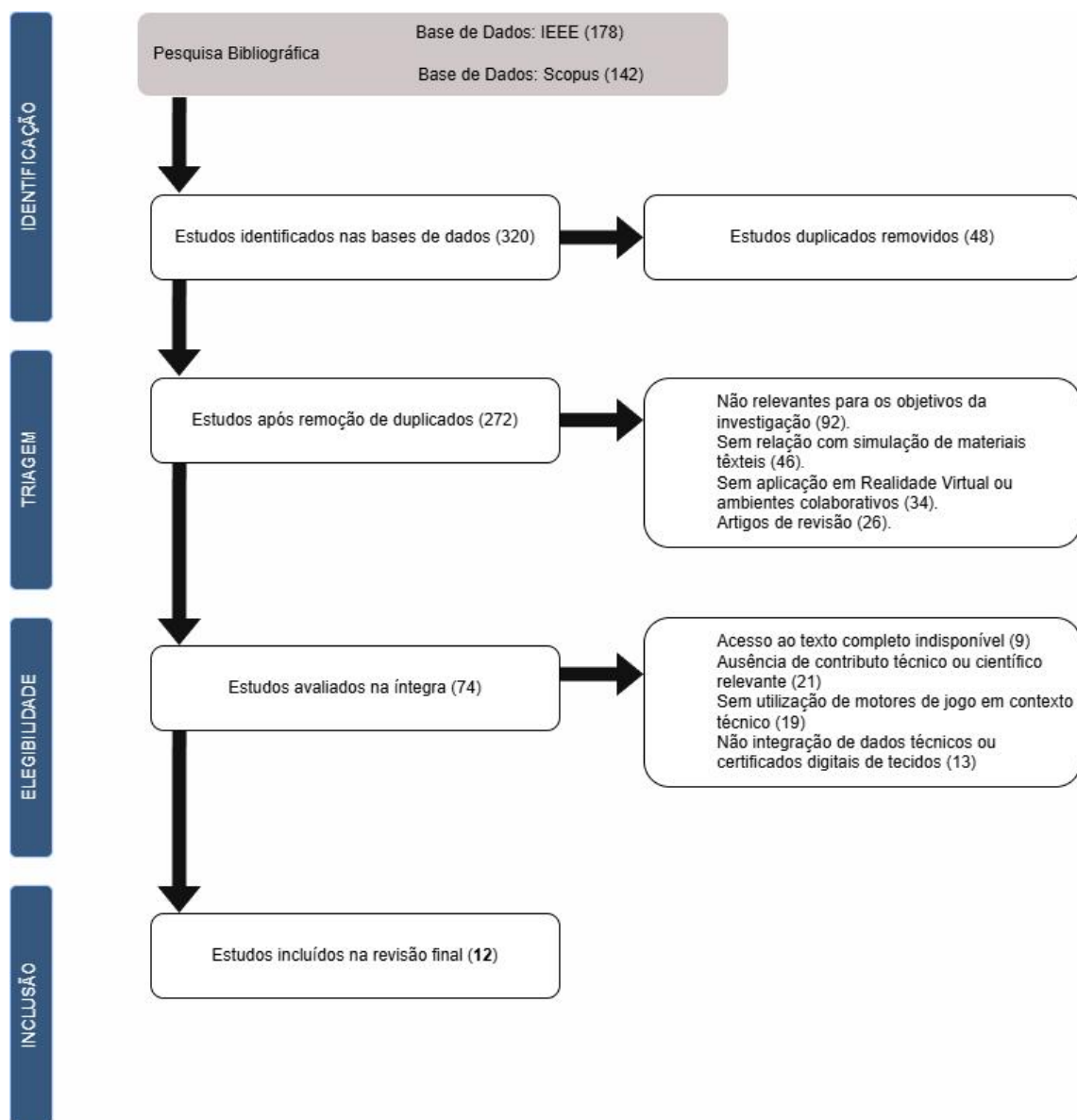


Figura 2.1: Processo de identificação, seleção e inclusão dos estudos considerados na revisão sistemática da literatura.

digitalmente antes mesmo de serem produzidos ou comprados dando origem a novos métodos de interação entre marcas, criadores e consumidores.

Neste contexto, a digitalização da indústria têxtil não se limita à criação de modelos tridimensionais ou à visualização virtual de peças de vestuário, envolvendo também a representação digital das propriedades dos materiais utilizados. Para que estes modelos reproduzam de forma adequada a aparência e o comportamento dos tecidos reais, é necessário dispor de informação técnica que descreva as suas características físicas, mecânicas e visuais.

É neste âmbito que surgem os certificados digitais de tecidos, que permitem organizar e disponibilizar estas informações de forma estruturada, facilitando a sua interpretação e utilização em diferentes ferramentas digitais, nomeadamente em simuladores têxteis e motores de jogo.

Um certificado digital de tecido é definido como um registo organizado (uma espécie de uma ficha técnica digital), o certificado descreve um material têxtil por meio de características que podem ser medidas e ajustadas. Permitindo assim a autenticidade do tecido e o principal objetivo será que programas de tempo real, como Unity ou Unreal, consigam representar visualmente e, se der, simular fisicamente o tecido. Esta ideia nasce da necessidade de apresentar estes dados de maneira fiel num motor de jogo, o que ajuda na análise e na validação digitais de tecidos.

Estrutura e Parâmetros Técnicos

Esta secção apresenta a estrutura de um certificado digital de tecido, definindo os conjuntos de dados necessários para descrever, de forma consistente, as propriedades físicas, mecânicas e visuais de um material têxtil, bem como a sua posterior utilização em simuladores têxteis e motores de jogo, conforme ilustrado na Figura 2.2.

A estrutura apresentada foi definida com base nos certificados digitais de tecidos disponibilizados pelas empresas associadas ao projeto TEXP@CT, cuja organização e conteúdo técnico serviram de referência para identificar os principais grupos de informação relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

A primeira camada corresponde à origem do material e à caracterização da amostra física, assegurando rastreabilidade e contexto técnico.

A camada da Digitalização da Amostra é a camada mais importante para o desenvolvimento do projeto, porque é nesta etapa que a informação física do tecido é transformada em parâmetros digitais utilizáveis pela plataforma. Esta camada é dividida em duas partes sendo que a primeira representa as propriedades visuais, responsáveis pela aparência do material e as propriedades mecânicas, responsáveis pelo seu comportamento físico durante a simulação.

A terceira e última camada corresponde à Certificação e Validação que é o processo de certificação, onde a amostra digital é comparada com a amostra física.

O relatório final garante que os parâmetros exportados para outros ambientes digitais representam o material dentro de uma margem de erro controlada.

A estrutura apresentada permite que os dados certificados sejam posteriormente traduzidos para parâmetros compatíveis com motores de jogo, tanto ao nível da renderização (materiais PBR) como da simulação de tecidos (cloth systems), respeitando as limitações e capacidades de cada motor.

Estrutura de um Certificado Digital

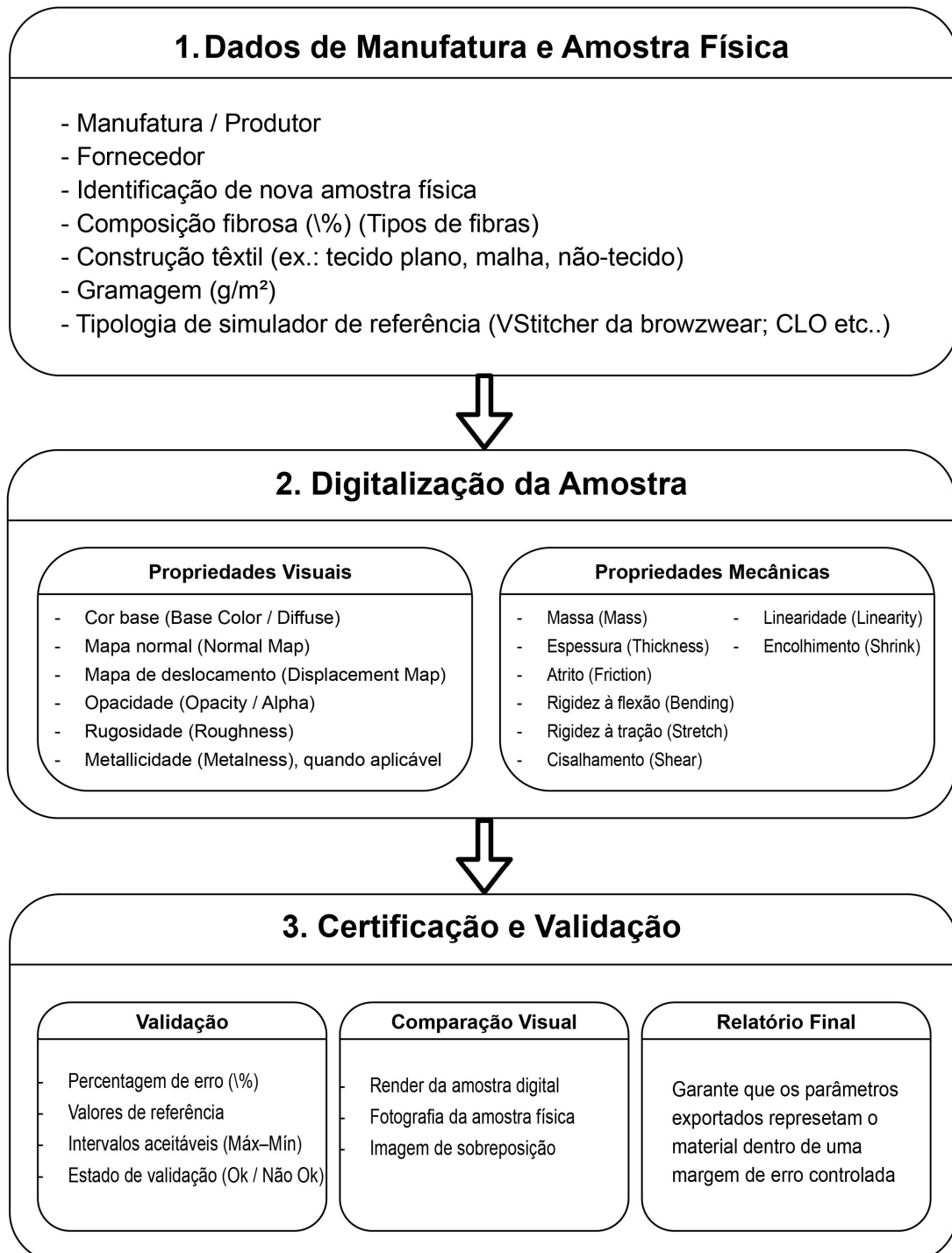


Figura 2.2: Estrutura de um certificado digital de tecido, desde a caracterização da amostra física até à certificação e validação.

2.3 Trabalhos Relacionados

O desenvolvimento de sistemas de simulação 3D para análise do comportamento têxtil, vestuário e do calçado tem um papel importante para a avaliação de como estes materiais se comportam em diferentes campos do design. Estas aplicações são quase sempre baseadas em modelos de comportamento físico com o objetivo de realizar simulações realistas e fiéis ao mundo real, sendo normalmente mais usadas nas áreas da moda, design de produtos, engenharias e jogos digitais, considerando resultados mais eficientes e precisos.

A necessidade de criar sistemas de simulação de comportamentos têxteis é muito mais abrangente do que só as áreas mencionadas antes alarga-se a outras áreas como a de design de todos os tipos de uniformes, expondo um valor industrial imediato e de inovação, conseguindo criar digitalmente o design da peça à procura de conforto, segurança e ergonomia antes mesmo da criação de protótipos físicos, conseguindo assim reduzir tempo e custos, tornando cada vez mais o processo mais ágil, acessível e eficiente.

Os trabalhos revistos nesta secção abordam o problema sobre diferentes perspetivas. Por um lado existem estudos que se destacam pela caracterização e simulação dos tecidos com base nas propriedades físicas, procurando transmitir com rigor o comportamento do material para o espaço digital. Por outro lado também existem métodos de modelação e design de vestuário, onde as etapas do processo deixam de ser compartimentos isolados e passam a articular-se de forma contínua e estruturada, como por exemplo softwares modernos como CLO3D que une várias etapas num só espaço. Observa-se também como já referenciado anteriormente a crescente utilização de motores de jogo para melhorar a simulação do vestuário, abrindo caminho para novos estudos e novas dinâmicas. A sincronização, a latência e a partilha de espaços virtuais assumem um papel muito importante, porque elas funcionam como um tipo de mecanismo invisível que pode sustentar ou comprometer a fluidez e a experiência do utilizador.

Dito isto esta secção propõe uma análise crítica dos principais contributos da literatura, organizada em diferentes áreas consideradas relevantes para o desenvolvimento desta dissertação.

2.3.1 Simulação Digital de Tecidos

A simulação digital de tecidos assenta numa sofisticada teia de modelos computacionais que procuram reproduzir, num palco virtual, o comportamento físico e a aparência visual dos materiais têxteis. Estes sistemas permitem observar, analisar e antecipar o desempenho dos tecidos sem que seja necessário recorrer à produção de protótipos físicos o que, convenhamos, representa um avanço nada negligenciável [30].

Esta abordagem tem vindo a afirmar-se cada vez mais como uma ferramenta incontornável, visto que a tecnologia está em constante evolução, com o objetivo de reduzir custos, acelerar processos e oferecer previsões cada vez mais realistas, sobre o comportamento dos materiais. Não se trata apenas de eficiência mas sim também de inovação, uma nova forma de "ler" e "perceber" como o material se comporta antes mesmo de existir no mundo real.

A importância da simulação hoje em dia consiste exatamente na capacidade que ela tem em providenciar o maior grau de fidelidade possível. Por um lado, a simulação física procura captar o modo como o tecido reage à gravidade, ao movimento e ao contacto com outros objetos, é neste preciso momento que o material “ganha vida”, ele dobra-se, estica-se, ondula. Por outro lado, temos a simulação visual no qual reflete a textura, cor, padrão e a forma como a luz embate sobre a superfície do tecido, revelando ou escondendo os seus detalhes. Dito isto estas duas dimensões não podem ser nunca tratadas de forma isolada porque uma completa a outra. A junção entre o comportamento físico e visual é extremamente necessário para garantir que a simulação é credível. Sem essa articulação, será impossível ter um modelo que embora visualmente seja apelativo ao olhar de um utilizador comum, atinja o grau de fidelidade e consistência exigido, basicamente seria como observar uma sombra sem corpo ou um corpo sem presença.

Independentemente dos avanços que já foram realizados, é importante referir que ainda existe pouca exploração no âmbito de integrar sistemas de simulação de tecidos com tecnologias como a Realidade Virtual. Esta lacuna serviu como motivação para um desenvolvimento do projeto, permitindo aos múltiplos utilizadores que possam estar na mesma sala a analisar e a interagir com os materiais, explorá-los basicamente como se tivessem o material nas suas próprias mãos. Com o objetivo de abrir caminhos para uma nova investigação neste âmbito, permitindo que o digital deixe só de ser observado mas também a ser vivido e sentido [5] [6].

As abordagens de simulação de tecidos normalmente estão organizadas em três grandes categorias:

- Simulação bidimensional (2D);
- Simulação tridimensional (3D);
- Simulação em tempo real;

A simulação 2D, foi verificada que normalmente é utilizada apenas nas fases iniciais da modelação, onde a geometria plana do tecido é representada para ter um rigor mais técnico e objetivo, quase como um esqueleto silencioso do processo, discreto mas essencial. Contudo também é por isso que existe a sua principal limitação que é não conseguir capturar de uma forma fidedigna e real o comportamento do material num mundo real [27].

Já a simulação 3D consegue introduzir uma dimensão adicional, o que transforma profundamente a sua análise. Ao representar o tecido em volume num ambiente tridimensional, conseguimos observar como este interage no espaço e mesmo com outros modelos tridimensionais, como por exemplo avatares ou superfícies, revelando assim comportamento que com a simulação 2D permaneciam ocultos e que agora temos a perceção de que eles existem [7]. Basicamente o tecido deixa de ser apenas forma e passa a ser presença num mundo virtual ganhando vida própria.

A simulação em tempo real é diferenciada pelo motivo de conseguir calcular e atualizar constantemente o comportamento do tecido à medida que o utilizador está a interagir com o sistema. Quase como se não houvesse pausas, esperas, tudo acontece no instante, num fluxo contínuo que acompanha cada gesto, cada movimento, cada toque. Esta característica é muito importante para

este projeto especialmente pelo uso de Realidade Virtual, onde a imersão depende, em grande medida, dessa resposta imediata e coerente [8]. Conseguindo juntar estas três abordagens, estrutura-se uma base muito consistente onde a simulação de tecidos evolui de uma representação estática e plana para uma experiência dinâmica, estando cada vez mais próxima da realidade.

O trabalho de Koo et al. [5], destacou-se devido ao facto de explorar a relação que os tecidos reais têm e as suas representações virtuais. Os autores deixam bem claro ao longo do artigo a importância da incorporação de propriedades físicas como o peso, a espessura e o comportamento ao drapejar entre outros, elementos estes que são a "alma" do material. Sem estes parâmetros, o modelo perde a consistência, um facto que é demonstrado pelo autores que a ausência de dados físicos detalhados compromete significativamente a fidelidade da simulação, reforçando assim a grande necessidade de integrar informação técnica rigorosa nos processos digitais.

Os autores através da utilização de ferramentas como o CLO 3D [48], demonstraram que é possível reproduzir visualmente características fundamentais dos tecidos. Mesmo com a utilização do CLO3D ainda são identificadas discrepâncias entre os resultados reais e os simulados, pequenas é certo, mas suficientes para revelar que a simulação digital apesar dos seus avanços constantes ainda não captura na totalidade a complexidade do comportamento dos materiais têxteis.

Este trabalho é de extrema importância pois faz a integração de dados físicos detalhados e validados experimentalmente nos sistemas de simulação um pouco como a plataforma desenvolvida. Sem esta base, qualquer tentativa de uma representação fiel do tecido corre o risco de ser uma representação imperfeita ainda que visualmente convincente. O estudo é um contributo importante para o desenvolvimento de modelos digitais mais rigorosos e fiéis à realidade.

Como ilustrado na Figura 2.3, é possível notar-se uma associação significativa entre os valores medidos nos tecidos reais e os obtidos através de simulação digital.

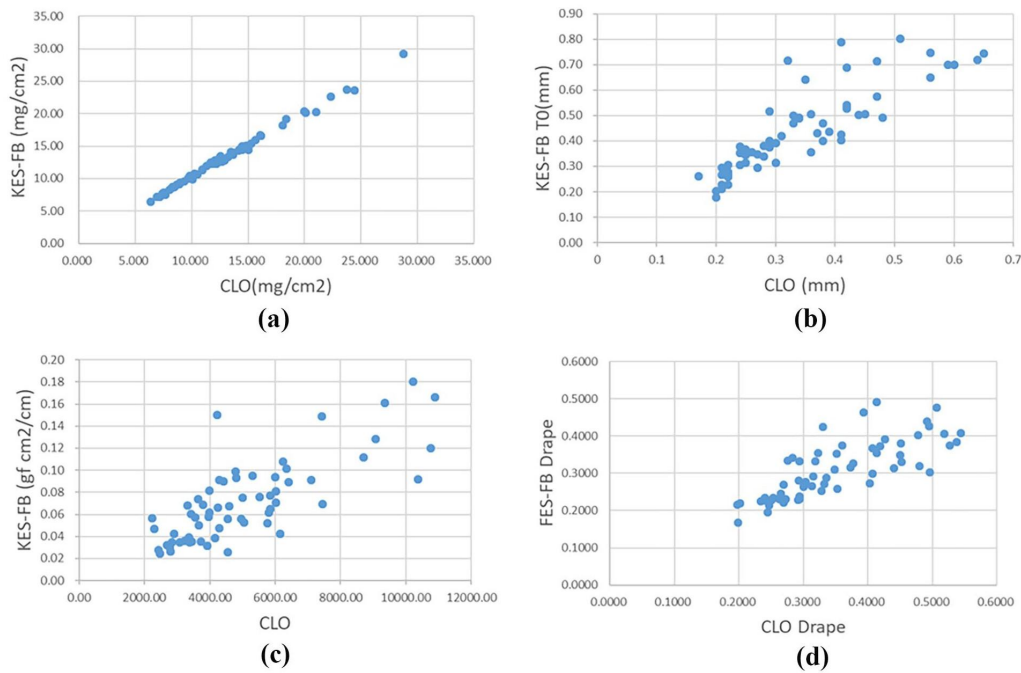


Figura 2.3: Comparação das medidas dos kits de tecido KES-FB e CLO: (a) massa por unidade de área, (b) espessura, (c) curvatura e (d) coeficiente de drapeado.

Outro trabalho interessante é o de Zheng et al. [39], que fala sobre a geração de *proxy assets* para simulação de tecidos em jogos. Os autores começam o artigo por explorar o problema das malhas com elevado detalhe visual e afirmam que as malhas podem ser demasiado pesadas para a simulação física em tempo real, comprometendo assim a usabilidade do jogo. De modo a evitar essa limitação os autores criam uma versão simplificada da peça, utilizada para a simulação, mantendo a malha original para a representação visual.

Como representado na Figura 2.4, a abordagem que os autores propõem é permitir que uma malha mais complexa, com várias camadas e com um detalhe elevado, seja representada por uma malha *proxy* muito mais simples. Esta malha é utilizada para a simulação física, enquanto a outra malha, a original é utilizada para apresentar aos utilizadores o resultado final com maior detalhe. Assim o sistema consegue manter uma aparência visual convincente, mas com uma carga computacional mais reduzida.

Os autores ao longo do artigo destacam que a criação manual destas malhas *proxy* e dos respetivos pesos de deformação pode ser um processo demorado e dependente da experiência dos artistas. Por isso, os autores propõem uma pipeline automática capaz de gerar uma malha simplificada e otimizar os pesos de *skinning*, tornando o processo mais eficiente.

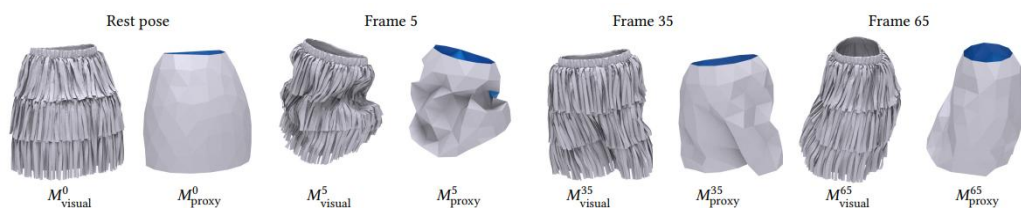


Figura 2.4: Comparação entre a malha visual detalhada e a malha *proxy* simplificada utilizada para simulação física em tempo real.

Este estudo é pertinente para este projeto, porque demonstram e reforçam a ideia de separar, sempre que possível e necessário, a qualidade visual da peça e a sua eficiência física.

2.3.2 Modelação e Design de Vestuário 3D

A modelação e o design de vestuário em três dimensões têm vindo a assumir um papel importante na digitalização da indústria têxtil, permitindo desenvolver, visualizar e modificar peças de vestuário antes da sua produção física. Através destas tecnologias, torna-se possível trabalhar com modelos tridimensionais e padrões bidimensionais, estabelecendo uma ligação entre a forma da peça, a sua construção e o comportamento durante a simulação. No entanto, para que este processo seja consistente, é necessário garantir que as alterações realizadas numa representação não comprometam as restantes. Neste contexto, diversos investigadores têm procurado desenvolver métodos que facilitem a integração entre as diferentes etapas de criação e simulação de vestuário digital.

O trabalho de Zhang et al. [7] destacou-se pois o autor propõe um método integrado para o desenvolvimento de peças em três dimensões. Os autores do artigo abordam de forma estruturada e contínua, todo o processo de design de uma peça desde a sua criação inicial até à simulação final, estabelecendo uma ligação entre os padrões bidimensionais e as representações tridimensionais, tornando o processo único sem que cada etapa ficasse isolada. Como ilustrado na Figura 2.5, é demonstrado o processo de desenvolvimento garantindo a consistência estrutural ao longo de todas as etapas.

De uma forma mais simples este método permite a criação de diferentes modelos 3D a partir de esboços iniciais, procedendo de seguida à sua conversão em padrões 2D, sem que se perca a consistência. Este vai-e-vem entre dimensões revelou-se estável pois é como se o modelo mantivesse uma "memória" durante todo o processo sem se desmoronar. Esta integração é importante pois assim é possível reduzir as discrepâncias entre o design conceptual que é a fase da imaginação, o esboço e a sua incorporação digital que é quando a ideia/esboço ganha "corpo", contribuindo para uma maior eficiência e precisão no desenvolvimento de vestuário algo que nem sempre é fácil de alcançar.

Os autores demonstram ao longo do artigo que a utilização de relações de costura e correspondências geométricas entre superfícies 3D e padrões 2D é possível preservar as características estruturais das peças, mesmo quando elas são adaptadas a diferentes corpos ou tamanhos. Este

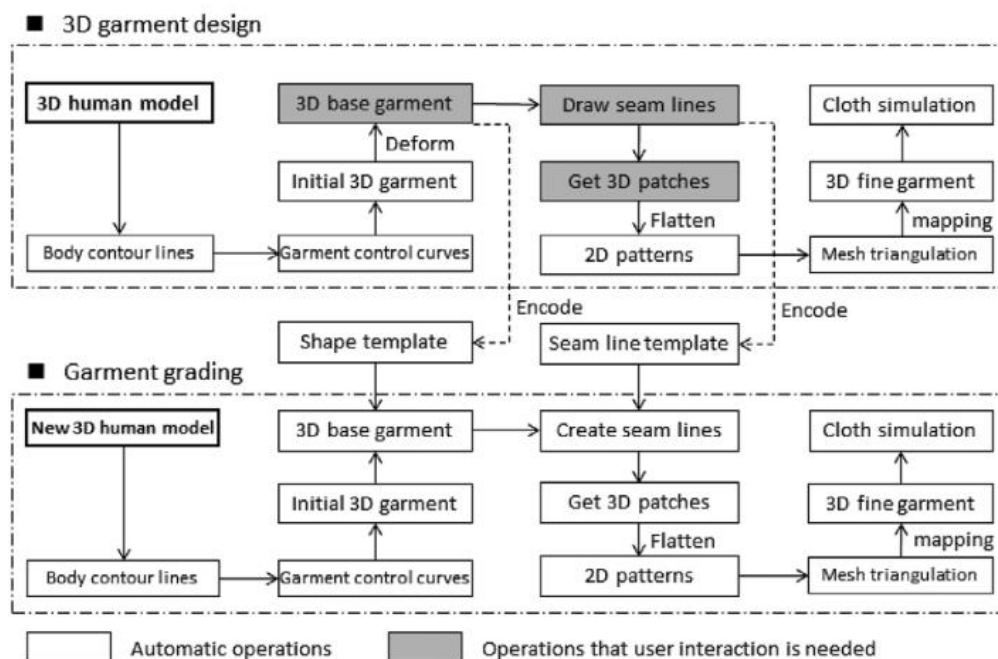


Figura 2.5: Fluxo integrado do processo de design de vestuário digital, evidenciando a ligação entre modelação 3D, geração de padrões 2D e simulação [7].

aspecto é importante pois ele não se limita à aparência visual mas garante também a sua adaptabilidade e a sua consistência pois consegue que a peça ao ser colocada em diferentes formas, mantém a sua identidade conseguindo ajustar sem se desfigurar.

Neste sentido a proposta de Zhang et al. fornece aos leitores uma base para a criação e manipulação de peças digitais com uma possível integração em ambientes mais avançados, como motores de jogo ou sistemas de Realidade Virtual, é importante salientar que a fidelidade da simulação não depende só das propriedades físicas do material, mas também da qualidade, coerência e robustez do modelo digital que lhe serve de suporte.

Outro trabalho interessante neste contexto é o de Yu et al. [40], que aborda a modelação inversa de vestuário a partir de formas tridimensionais. Os autores apresentam uma abordagem capaz de prever os padrões geométricos bidimensionais e os parâmetros fisicamente simulados para uma dada geometria tridimensional de um objeto, por meio da aplicação de um simulador diferenciável. Portanto, este método permite que a representação digital de um objeto sirva como uma aproximação da estrutura técnica que será utilizada para simular esse objeto, além de construir o próprio objeto.

Como ilustrado na Figura 2.6, o método parte de uma peça em 3D e procura gerar uma representação compatível com padrões bidimensionais e simulação física.

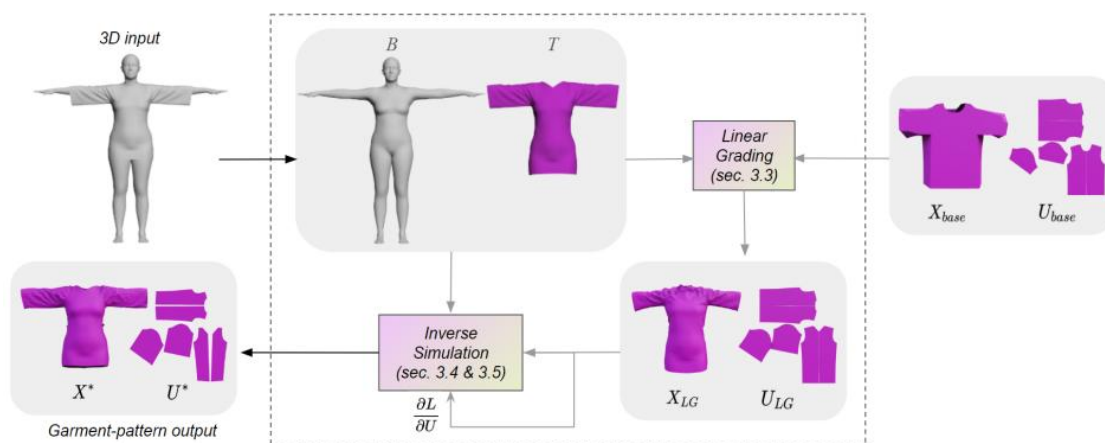


Figura 2.6: Processo de modelação inversa de vestuário, no qual uma forma 3D é utilizada para gerar padrões 2D e uma peça preparada para simulação [40].

2.3.3 Motores de Jogo como Ferramentas Técnicas

Nos últimos tempos e um ritmo acelerado as ferramentas de simulação tridimensional deixaram de ser uns instrumentos auxiliares para se afirmarem no mundo da digitalização, cada vez mais estão mais diversificados e a abranger diferentes áreas tais como design de produto, moda, engenharia e claro os jogos digitais. Ao conseguirmos nesta área antecipar o comportamento dos materiais com uma precisão quase perfeita, as tecnologias como o Unreal conseguem reduzir bastante a necessidade de protótipos físicos e acelerando assim o desenvolvimento, melhorando os resultados finais e por consequência atenuar o impacto ambiental [31].

Os motores de jogo hoje em dia não servem só para a criação de jogos ou para entretenimento [33] [36], softwares como o Unity [47] e o Unreal Engine [46], são utilizados em contextos mais técnicos e exigentes. Hoje são utilizados para simulações de física avançadas, prototipagens muito avançadas e construção de ambientes virtuais com uma realidade cada vez maior, onde vários utilizadores conseguem estar no mesmo espaço virtual a coexistir e a interagir. Assim podemos hoje em dia considerá-los não apenas como ferramentas que servem para entretenimento mas como plataformas que servem para investigação e para desenvolvimento mais técnico.

Ainda assim apesar dos diferentes e constantes avanços na tecnologia mais concretamente na simulação e visualização tridimensional, existe uma lacuna importante no que toca na simulação de tecidos. A maioria dos estudos e artigos existentes focam-se muito no desempenho dos motores de jogo e na sua utilização no desenvolvimento de jogos, é como se o potencial dessas ferramentas não tivesse a ser aproveitado ao máximo. Embora já surjam alguns estudos relativos a este tema [32], ainda se nota alguma escassez na utilização de Realidade Virtual, essa escassez limita a criação de ambientes imersivos, onde neste caso a análise de materiais é importante e com a utilização da realidade virtual em junção com os motores de jogo consegue permitir aos utilizadores de forma intuitiva e quase tangível "tocar" no material.

Para concluir esta secção torna-se quase impossível, não explorar o uso de motores de jogo

como um instrumento que consiga ler, interpretar e visualizar tecidos a partir de certificados digitais. Ao fazê-lo, conseguimos abrir portas a representações mais realistas e fiéis. Ambientes estes onde os materiais deixam de ser simples objetos estáticos e passam a comportar-se como entidades dinâmicas, revelando, camada após camada, as suas propriedades, como se contassem, em silêncio, a história da sua própria matéria [9] [10].

O trabalho de Kim et al. [38], é destacado devido ao facto de os autores analisarem a simulação de tecidos em tempo real no Unity, os autores comparam o sistema nativo Unity Cloth com uma abordagem baseada em *Position-Based Dynamics* acelerada por GPU. O estudo é realizado e desenvolvido com o uso de dispositivos como o Meta Quest 3, os mesmos óculos usados nos testes e preparação da Realidade Virtual da plataforma.

Os autores exploram ao longo do artigo a limitação dos sistemas tradicionais de simulação física baseados na CPU, e tem receio que esses mesmos sistemas se possam tornar insuficientes quando se pretende garantir uma interação fluida com tecidos em tempo real. Embora o Unity Cloth apresente uma utilização simples e consiga manter um desempenho estável em cenários menos complexos, o estudo demonstra que este sistema apresenta limitações quando são necessárias colisões mais precisas, interação com malhas complexas do ambiente ou manipulação direta do tecido através das mãos do utilizador.

Para ultrapassar estas limitações, os autores propõem um sistema de simulação baseado em *Position-Based Dynamics*, executado através de *Compute Shaders* no Unity. Esta abordagem permite distribuir os cálculos pela GPU, melhorando a capacidade de resposta da simulação e permitindo interações mais naturais com objetos e superfícies. O objetivo passa por manter a simulação suficientemente realista e interativa, sem comprometer o desempenho necessário para aplicações imersivas.

O trabalho de Li et al. [17], destacou-se devido ao facto de abordar a otimização das simulações de peças através do sistema Chaos Cloth do Unreal Engine o mesmo utilizado neste trabalho. Os autores começam a partir de um problema bem conhecido nesta área, a instabilidade da simulação e a indesejada interpenetração entre os tecidos, sobretudo quando são modelos mais exigentes e complexos ou compostos por múltiplas camadas.

Foi proposta uma reestruturação no fluxo de dados associado à simulação, acompanhada pela integração de vários mecanismos de colisão e técnicas que conseguem simplificar as malhas. Estas estratégias no final conseguiram uma melhoria da estabilidade do sistema e para a otimização do desempenho em tempo real. Em termos mais práticos é como se o sistema encontrasse um novo ritmo, reduzindo a carga computacional, puxando menos pelo computador sem comprometer de forma relevante o realismo da simulação. Trata-se de alcançar um equilíbrio entre a precisão física e eficiência computacional.

Os resultados que os autores obtiveram nas experiências, demonstraram melhorias ao nível da fluidez da simulação e uma redução significativa de artefactos visuais, reforçando assim a importância de aplicar otimizações específicas quando os motores de jogo são utilizados no contexto do vestuário digital. Ao contrário de outras ferramentas de simulação, onde o tempo da simulação

pode ser mais demorado, os motores de jogo exigem a necessidade de respostas imediatas, estáveis e contínuas.

Estabelecendo uma ligação com o presente trabalho o contributo de Li et al. torna-se importante porque além de utilizar o Unreal Engine como plataforma principal e a sua viabilidade, destaca a importância de uma plataforma bem otimizada de forma a não prejudicar o produto final. Estes desafios servem de aviso para a complexidade envolvida na integração de propriedades físicas certificadas em ambientes imersivos e colaborativos, onde o rigor não é apenas desejável, mas essencial.

2.3.4 Ambientes Multiutilizador e Colaboração Virtual

Os ambientes multiutilizador são muito mais que simples espaços digitais, é como se fosse um tipo de uma praça pública onde várias pessoas se encontram, para falar e interagirem umas com as outras em conjunto, é nestes ambientes que cada utilizador ganha presença e voz através de um avatar [14]. Não se trata apenas de estar lá a ver as coisas a acontecer mas sim participar nelas o que torna o processo mais gratificante fazendo toda a diferença.

Dito isto, a colaboração virtual surge neste contexto como uma extensão desta presença, no qual permite aos utilizadores que estão no espaço virtual, comunicarem entre si, permitindo que as ideias circulem de forma fluida como se ganhassem vida própria e de repente aquilo que era um processo individual e solitário transforma-se num diálogo contínuo, dando origem a novas e melhores ideias. Como referenciado por Gomathy [26] que evidencia o facto de discutir, comparar e analisar em conjunto é o que pode tornar uma boa decisão de uma excelente. Esta interação não é apenas funcional é quase como uma conversa cara a cara, ainda que processada por um ecrã.

De um ponto de vista mais técnico, estes ambientes normalmente são criados numa arquitetura cliente-servidor, onde um servidor é criado e que serve para coordenar o sistema, enquanto os utilizadores, neste caso os clientes, acedem e interagem com esse mesmo estado [15]. Podemos comparar esta situação a uma orquestra, na qual o servidor é o maestro, que dita o ritmo e garante que ninguém está fora do tempo, enquanto os clientes seguem a música.

Ainda assim, o maior problema na parte da colaboração é a sincronização [16]. Todas as ações que são realizadas nos ambientes, desde a simples observação de um tecido até à sua edição ou a alteração das suas propriedades têm que refletir em tempo real para todos os utilizadores. Caso contrário, o que deveria ser um espaço partilhado transforma-se numa ilusão, o que quebra completamente a experiência dos ambientes colaborativos.

Dito isto, as vantagens de utilizar a colaboração neste trabalho é de extrema importância e impossível de ignorar. Permitir a colaboração à distância, conseguir reduzir custos, acelerar processos e ideias e muito importante conseguir unir e aproximar designer ou utilizadores comuns que de outra forma estariam separados por barreiras físicas.

Neste contexto o trabalho de Du et al. [18], destacou-se devido ao facto do autor analisar como devem ser as diferentes interfaces digitais em ambientes colaborativos, tendo em conta as tarefas que cada utilizador tem que realizar e que papel cada um assume dentro do sistema. Os autores defendem ao longo do artigo que em sistemas colaborativos, os utilizadores não interagem de forma

igual, pelo contrário, cada utilizador assume funções diferentes em função do objetivo pretendido por cada um. Como exemplo, alguns utilizadores podem focar-se apenas na observação e análise enquanto outros intervêm na personalização da peça. Esta perspetiva é muito importante porque além de ser utilizada neste projeto, a colaboração não depende apenas da presença simultânea dos utilizadores no mesmo espaço, mas também de como a plataforma consegue suportar a comunicação entre as diferentes interfaces, a coordenação e a distribuição de responsabilidades em tempo real.

De forma adicional e passando para um contexto mais industrial Wang e Qi [19] apresentam um sistema colaborativo multiutilizador direcionado para aplicações técnicas. Esta solução proposta permite que diferentes utilizadores interajam sobre o mesmo espaço através de funcionalidades como visualização partilhada, anotação, edição colaborativa e assistência remota, demonstrando que os ambientes colaborativos são relevantes e precisos em contextos industriais, facilitando uma análise conjunta, uma troca de informação mais fluida e uma tomada de decisão mais rápida e ágil. Embora este trabalho foque mais em Realidade Aumentada, os princípios pensados de colaboração são abrangentes a outros ambientes imersivos como o da Realidade Virtual. No final de contas, o que está em causa não é a tecnologia usada, mas sim a capacidade de conseguir criar um espaço onde vários utilizadores consigam trabalhar e explorar, como se tivessem lado a lado no mundo real.

Por sua vez, Reynolds et al. [20] explora o ambiente multiutilizador orientado para a vertente espacial e os problemas dessa natureza. O sistema que é proposto integra funcionalidades de visualização tridimensional, assistência remota, anotação e análise espacial, demonstrando assim que os ambientes partilhados podem ultrapassar a função de simples plataformas de visualização.

Já como outros autores afirmam, que cenários nos quais vários utilizadores estão presentes no mesmo ambiente ao analisar uma representação visual, conseguem discutir e tomar decisões de forma muito mais informada, colaborativa, conseguindo deixar que o ambiente virtual deixe de ser apenas um meio de apresentação de informação mas que seja um espaço ativo onde os dados são observados, comentados, ajustados e reinterpretados pelos participantes ao longo do processo colaborativo.

Sarakatsanos et al. [21] explora a utilização da Realidade Virtual no contexto da visualização, onde os utilizadores conseguem analisar como as peças de roupa ficam no avatar, um pouco como este projeto desenvolvido. O sistema desenvolvido permite aos utilizadores fazer várias combinações de roupa em avatares digitais analisado como uma peça fica. Desta forma a peça deixa de ser apenas observada num ecrã e passar a ser vivida num espaço virtual mais realista.

Como ilustrado na Figura 2.7, a aplicação permite que diferentes utilizadores observem e interajam com a peça digital num ambiente virtual partilhado. Este trabalho foi importante para a presente dissertação porque tem funcionalidades utilizadas no mesmo e reforçou o potencial enquanto uma ferramenta de apoio à análise colaborativa de vestuário, ao possibilitar que a interpretação, discussão e validação da peça ocorram de forma conjunta, imersiva e visualmente contextualizada.

Os MMORPG constituem também um exemplo relevante de ambientes colaborativos digitais,



Figura 2.7: Interação de utilizadores com peças de vestuário digital em ambiente de Realidade Virtual, adaptado de [21].

uma vez que os utilizadores formam equipas, assumem diferentes funções e coordenam ações para atingir objetivos comuns. Estudos recentes mostram que o conhecimento sobre cooperação e a participação em equipas têm um papel importante na integração e no funcionamento destes grupos virtuais [34].

Estes trabalhos demonstram que a colaboração em ambientes digitais deve ser vista como um processo multifacetado, pois ela envolve uma presença, comunicação, coordenação e partilha contínua de informação. No âmbito da presente dissertação, estes trabalhos foram importantes pois deram noção do potencial e da necessidade de desenvolver uma solução que permita a múltiplos utilizadores analisar tecidos digitais no mesmo ambiente virtual. Dito isto, o FabricX (plataforma desenvolvida) não se limita à visualização individual dos materiais, procura antes criar espaço colaborativo onde diferentes utilizadores consigam observar discutir e validar propriedades físicas e visuais dos tecidos de forma conjunta, interativa e sincronizada e é precisamente nesta dimensão coletiva que consiste uma das principais contribuições do sistema proposto.

2.3.5 Realidade Virtual

A Realidade Virtual é uma tecnologia que permite ao utilizador interagir com ambientes digitais simulados, conseguindo criar uma simulação tão convincente quase como iludindo a pessoa a que já não está mais num espaço virtual mas sim no mundo real, que o ambiente é tangível. Ao contrário das abordagens mais conhecidas e tradicionais, em que de certa forma não tornam a experiência do utilizador tão real, a Realidade Virtual abre portas a uma experiência totalmente

diferente no qual o utilizador não se limita a observar e passa a conseguir explorar e a manipular os elementos existentes no ambiente virtual de forma intuitiva proporcionando diferentes sensações [35].

As características que mais definem a realidade virtual é desde logo a imersão, a sensação de presença que providencia ao utilizador como referenciado no artigo de Michael Wilkinson [12]. Michael diz que a imersão é o grau em que o utilizador se sente envolvido no ambiente virtual, conseguindo envolver por completo, abafando o mundo exterior. Já a interação, o autor refere que é a capacidade de interagir e agir sobre os objetos e elementos desse espaço, conseguindo estabelecer quase como uma relação dinâmica e bidirecional. Por fim a característica mais impressionante é a sensação de presença que a realidade virtual consegue providenciar nas pessoas, a percepção de “estar lá”, num lugar que não existe, mas que contraditoriamente se sente real.

No contexto da visualização e análise de materiais, a Realidade Virtual é importante e promissora. Dando a possibilidade de observar objetos neste caso peças de roupa com um nível de detalhe que com as abordagens mais tradicionais é impossível de alcançar. As texturas parecem ganhar relevo, as proporções tornam-se mais nítidas e evidentes e os comportamentos visuais notam-se diante do utilizador com uma clareza diferente. A compreensão das relações espaciais entre os diferentes elementos, tantas vezes inexistente em representações planas, emergem de forma natural, quase intuitiva [13].

No enquadramento da dissertação a integração da Realidade Virtual permite que os dados dos certificados digitais deixem de ser simplesmente interpretados e passam a ser vividos e analisados com outro rigor. Não se trata apenas de ler ou analisar a informação, mas de conseguir torná-la explorável num ambiente imersivo onde o tecido consiga reagir, dobrar, refletir a luz que nela incide, adaptar-se. Assim, o utilizador consegue beneficiar de uma experiência interativa, rica e significativamente mais próxima da realidade, superando as limitações inerentes às representações bidimensionais convencionais.

O trabalho de Keshavarzi et al. [15], o autor foca-se no desafio mais persistente em ambientes imersivos multiutilizador, que é a dificuldade em estabelecer um espaço virtual verdadeiramente comum entre os diferentes participantes que se encontram em contextos físicos diferentes. Em cenários de Realidade Virtual e Realidade Aumentada, cada utilizador tem as suas próprias limitações com o seu próprio espaço como paredes, obstáculos, dimensões, que podem condicionar a experiência. Como ilustrado na Figura 2.8, o processo começa pela identificação das restrições de cada ambiente real de cada utilizador, a definição de áreas utilizáveis e a determinação de um espaço virtual comum que maximize a interação entre participantes.

Os autores propõem então um modelo que consiga gerar espaços virtuais para todos os utilizadores e que seja possível acomodar múltiplos utilizadores de forma coerente e acessível. A solução proposta é uma adaptação dinâmica e automática do ambiente virtual, onde os elementos são reorganizados, ajustados e reposicionados em função das condições de cada participante no mundo real. Com esta solução cria-se um espaço de trabalho comum para os utilizadores proporcionado a colaboração sem exigir que todos partilhem o mesmo espaço físico.

Os resultados que os autores apresentam no artigo indicam que a estratégia é eficaz na redução



Figura 2.8: Processo de geração de um espaço virtual partilhado entre utilizadores com diferentes restrições físicas, incluindo segmentação espacial e alinhamento de avatares, adaptado de [15].

de conflitos espaciais e melhora a eficiência da interação. O ambiente que era um obstáculo passa a ser um facilitador, permitindo aos utilizadores uma experiência fluida e imersiva. Este aspeto é importante porque uma vez que a colaboração em ambientes imersivos não depende apenas da qualidade da representação visual, mas também da forma como o espaço é estruturado, adaptado e partilhado entre os utilizadores.

No contexto desta dissertação esta abordagem é importante, porque além do sistema integrar componentes colaborativas em ambientes virtuais, criar espaços virtuais comuns independentemente das condições físicas dos utilizadores, consegue garantir aos utilizadores uma experiência fluida e imersiva para todos, minimizando o risco de colisões com obstáculos reais e permitindo que se foquem exclusivamente nas tarefas. É no fundo o que este trabalho precisa, que vários utilizadores em diferentes espaços reais interajam como se estivessem lado a lado, a observar, editar e a validar propriedades têxteis em tempo real, numa experiência que se aproxima, cada vez mais, do contacto direto com o material.

De forma a complementar o artigo em cima mencionado é importante realçar o impacto da latência, ou lag, na QoE (*Quality of Experience*) do utilizador, no desempenho e na colaboração em ambientes multiutilizador baseados em Realidade Virtual, dito isto o trabalho de Damme et al. [16] é evidenciado porque os autores demonstram que em sistemas interativos distribuídos, a latência da rede deixa de ser um simples parâmetro técnico, tornando-se um elemento determinante que pode condicionar a perceção do utilizador, influenciando diretamente a fluidez da interação e a eficácia da comunicação entre participantes.

A investigação do trabalho evidencia que atrasos na transmissão de dados comprometem a sincronização entre utilizadores, originando inconsistências no estado partilhado do ambiente virtual. Este desfasamento manifesta-se por exemplo em discrepâncias na posição de objetos ou na resposta a ações, criando uma sensação de desalinhamento que fragiliza a experiência imersiva e dificulta a colaboração, o que deveria ser um espaço comum e fluido transforma-se gradualmente num cenário onde pequenas diferenças acumuladas perturbam a continuidade da interação.

Os resultados experimentais da investigação revelam que se houver um aumento da latência, a degradação da experiência do utilizador vai aumentar, sendo normal que um utilizador perca o entusiasmo e a motivação se estiver a ter uma experiência em que tudo tem atrasos. À medida que o atraso cresce, a sensação de realismo vai caindo, a interação perde a fluidez e a execução de tarefas colaborativas torna-se menos eficiente. Dito isto os autores sublinham a importância de considerar métricas de QoE, para além dos tradicionais indicadores técnicos de QoS, defendendo uma avaliação mais holística dos sistemas imersivos. Não basta que o sistema funcione bem "por dentro" é essencial que seja sentido como natural e responsivo "por fora".

2.3.6 Síntese e Reflexão Crítica

A análise dos trabalhos relacionados permite verificar e ter a perceção de como o estado de arte está e como tem evoluído ao longo dos tempos. Por um lado são identificados contributos importantes e relevantes no contexto da modelação e simulação digital de tecidos, mais concretamente à relação entre propriedades físicas reais e a sua representação em ambientes virtuais, por outro lado surgem também abordagens mais centradas na utilização de motores de jogo, na Realidade Virtual e em ambientes colaborativos multiutilizador.

Contudo, apesar destes avanços mencionados, observa-se que a maioria dos estudos analisado estão apenas numa dimensão específica do problema. Uns trabalhos aprofundam a simulação física dos tecidos, mas não exploram a aplicação em ambientes imersivos ou colaborativos. Outros analisam mecanismos de colaboração multiutilizador sem considerar a representação técnica de materiais têxteis. Existem também propostas de Realidade Virtual mas que não conseguem estabelecer uma ligação direta com certificados digitais de tecidos ou com dados físicos estruturados.

Deste modo, é perceptível que existe uma lacuna na articulação conjunta entre simulação digital de tecidos, dados técnicos certificados, motores de jogo e ambientes colaborativos imersivos. Esta lacuna evidencia a necessidade de desenvolver soluções capazes de integrar estas diferentes vertentes num único ambiente digital.

A Tabela 2.1 apresenta uma síntese dos principais estudos analisados, identificando a respetiva área de atuação, o objetivo e o contributo principal.

Tabela 2.1: Síntese dos principais trabalhos relacionados.

Estudo	Área	Objetivo	Contributo	Ligação ao FabricX
Koo et al. (2024)	Simulação de tecidos	Comparar tecidos reais e virtuais	Validação de propriedades físicas	Dados físicos dos tecidos
Yu et al. (2024)	Modelação inversa de vestuário 3D	Estimar padrões 2D e parâmetros físicos a partir da geometria 3D	Ligação entre forma 3D, padrões 2D e simulação física	Reforço da preparação estrutural das peças antes da integração no FabricX
Zheng et al. (2024)	Simulação de tecidos em jogos	Gerar versões simplificadas de peças para simulação física	Equilíbrio entre detalhe visual e desempenho em tempo real	Otimização das malhas e desempenho no FabricX
Kim et al. (2025)	Unity / Simulação de tecidos em XR	Comparar Unity Cloth com <i>Position-Based Dynamics</i> acelerado por GPU	Análise do desempenho e limitações da simulação de tecidos em tempo real	Comparação com Unity e apoio à escolha do Unreal para o FabricX
Li et al. (2025)	Unreal / Chaos Cloth	Otimizar simulação em tempo real	Melhoria da estabilidade da simulação	Base técnica no Unreal
Zhang et al. (2020)	Design 3D de vestuário	Integrar modelação 3D e padrões 2D	Fluxo 2D–3D estruturado	Integração com CLO3D
Du et al. (2025)	Interfaces colaborativas	Apoiar colaboração por papéis e tarefas	Modelo de interação multiutilizador	Colaboração no FabricX
Wang e Qi (2022)	Colaboração industrial	Suportar visualização e edição partilhada	Sistema colaborativo aplicado à indústria	Análise técnica em equipa
Reynolds et al. (2024)	Ambientes partilhados	Apoiar resolução colaborativa de problemas	Ambiente multiutilizador para decisão	Discussão e validação conjunta
Sarakatsanos et al. (2021)	Realidade Virtual / Vestuário digital	Visualizar peças digitais em avatares	Prova virtual imersiva e modo multiutilizador	Visualização imersiva de tecidos e peças
Keshavarzi et al. (2020)	Espaços virtuais partilhados	Gerar espaços comuns entre utilizadores	Otimização de espaço multiutilizador	Organização do espaço colaborativo
Van Damme et al. (2024)	VR multiutilizador	Avaliar impacto da latência	Análise de QoE e colaboração	Sincronização e desempenho

Capítulo 3

Estudo de Ferramentas

O desenvolvimento de soluções tridimensionais orientadas para a visualização, simulação e interação com vestuário digital pode recorrer a diferentes tecnologias, cada uma com características, vantagens e limitações específicas. Neste sentido, torna-se relevante analisar previamente as ferramentas disponíveis e compreender a sua adequação a diferentes requisitos técnicos e funcionais.

Numa primeira etapa, a análise é feita sobre motores de jogo, Unity e o Unreal Engine, por serem as plataformas mais utilizadas atualmente no desenvolvimento de ambientes 3D. Desta forma, procura-se compreender não apenas o desempenho técnico de cada motor, mas também a sua adequação ao contexto específico do FabricX.

Depois são analisadas ferramentas especializadas no design e na simulação de vestuário, com destaque para o CLO3D pois é a tecnologia utilizada nas empresas no qual a aplicação reside. Esta análise permite perceber de que modo o CLO3D pode funcionar como uma etapa intermédia entre o desenvolvimento técnico da peça e a sua posterior integração num motor de jogo. Assim, torna-se possível perspetivar um fluxo de trabalho mais contínuo, no qual a peça é concebida, simulada, exportada e finalmente explorada num ambiente virtual interativo.

Assim, o objetivo deste capítulo não se limita à apresentação das ferramentas existentes. Pelo contrário, procura-se fundamentar as decisões tecnológicas adotadas no desenvolvimento do FabricX, identificando as vantagens, limitações e grau de adequação de cada solução face aos objetivos da dissertação. A comparação realizada permite, deste modo, justificar a escolha do Unreal Engine como motor principal de desenvolvimento, devido ao seu potencial gráfico, suporte à simulação em tempo real, integração com Realidade Virtual e capacidades multiutilizador. Do mesmo modo, justificar a utilização do CLO3D como ferramenta de apoio à criação, simulação inicial e exportação de peças digitais.

Desta forma, este capítulo estabelece a base tecnológica sobre a qual assenta o desenvolvimento do FabricX, garantindo que as ferramentas selecionadas são coerentes com os requisitos funcionais, visuais e técnicos da solução proposta. Mais do que uma escolha meramente instrumental, a seleção destas tecnologias constitui uma etapa estratégica para assegurar a fidelidade da representação dos tecidos, a interação em tempo real e a futura expansão do sistema para cenários

imersivos e colaborativos.

3.1 Estudo e Seleção de Ferramentas Tecnológicas

Nesta fase foi realizada uma seleção das ferramentas tecnológicas a utilizar na implementação da solução proposta. Dado que o FabricX tem como propósito representar, simular e visualizar tecidos digitais de forma interativa, tornou-se necessário identificar um ambiente de desenvolvimento capaz de responder a um conjunto de requisitos técnicos exigentes e complementares.

Assim, esta parte tem como objetivo principal comparar o Unity e o Unreal Engine (os dois engines mais poderosos da indústria) para ver qual deles é mais capaz de receber, processar e mostrar dados relacionados a certificados digitais de tecidos. Além disso, também se avalia se estes ambientes podem ser usados por várias pessoas ao mesmo tempo, permitindo que elas interajam em tempo real, troquem informações e participem na análise e validação digital.

A análise aborda a estrutura, os gráficos e as funcionalidades de ambas as plataformas, assim como as suas ferramentas de simulação de tecidos e as limitações no campo têxtil, tentando assim descobrir qual o motor que se melhor enquadra neste processo, com a capacidade de evoluir para ambientes de design, edição e validação de materiais têxteis feitos em colaboração.

3.1.1 Unity

O Unity é uma das plataformas mais utilizadas para o desenvolvimento de ambientes interativos em tempo real [47]. O Unity foi explorado como um possível ambiente para a criação do FabricX.

O Unity utiliza uma arquitetura híbrida, composta por um núcleo nativo em C/C++ e uma camada de scripting em C# [72]. Para suportar este modelo, o Unity incorpora a sua própria versão do .NET, que possui características específicas em relação à gestão de memória e aos perfis utilizados [72].

O motor disponibiliza dois scripting backends: **Mono**, que é usado principalmente durante o desenvolvimento devido à sua flexibilidade, e **IL2CPP**, que transforma o código C# em C++ para criar builds mais otimizadas e seguras [74, 75]. A arquitetura também possui ainda mecanismos de recarregamento de código no editor, que recompilam e reiniciam o domínio de execução sempre que os scripts são alterados, afetando assim o tempo de entrada no modo de jogo [76].

O sistema de serialização é outro componente importante, pois possibilita o armazenamento e a reconstrução do estado dos objetos, os Prefabs e as propriedades definidas no editor [77]. A maneira como o Unity compila scripts, estruturando-os em assemblies e com o uso de Assembly Definitions, diminui o tempo de compilação e ajuda na melhoria da modularidade [78].

Em conjunto, estes componentes definem o funcionamento interno do sistema de scripting e execução do Unity, permitindo assim que o programador escreva a lógica do jogo em C#, enquanto o núcleo nativo do motor assegura o desempenho e a portabilidade [47, 72].

3.1.1.1 A Evolução e o Legado do Unity

- **2005:** O Unity é lançado pela Unity Technologies, como um motor de jogos exclusivo para macOS.
- **2008:** Unity 2.0 começa a suportar Windows.
- **2015:** Unity 5.0 introduz a Realidade Virtual (VR) e gráficos em alta definição (HD).
- **2018:** Primeiro engine a integrar Machine Learning.
- **2020:** Lançamento do Mixed and Augmented Reality Studio (MARS).
- **2023:** Lançamento do Unity 2023 LTS, com melhorias no desempenho, renderização em tempo real e ferramentas de IA para acelerar o desenvolvimento.
- **2024:** Unity 6 é lançado em outubro de 2024.

3.1.1.2 Sistema de simulação de tecidos

O Unity possui um sistema de simulação de tecidos chamado *Unity Cloth*, que é fundamentado no motor NVIDIA PhysX [79]. Este sistema utiliza um modelo de partículas conectadas por molas (*mass-spring system*), o que permite a simulação de deformações simples em malhas 3D associadas a um *Skinned Mesh Renderer*. A configuração é feita aplicando pesos nos vértices, determinando assim quais áreas da malha são fixas ou móveis, além de estabelecer os parâmetros físicos que controlam o comportamento do tecido, como *damping*, *stiffness* e *bending constraints*.

Embora seja de fácil utilização, o *Unity Cloth* possui várias restrições. O sistema apresenta uma autocolisão limitada, enfrenta vários desafios ao lidar com malhas densas e torna-se instável durante movimentos rápidos ou animações complexas. Além disso, não é capaz de lidar com propriedades físicas complexas, como anisotropia, espessura do tecido ou colisões precisas entre diferentes partes de uma mesma malha. Por estas razões, o *Unity Cloth* é geralmente considerado como inadequado para aplicações que necessitam de um alto realismo ou comportamentos complexos de tecidos [49].

3.1.1.3 Plugins externos para simulação de tecidos

Devido aos limites do sistema padrão, quase todos os projetos que precisam de uma simulação aprimorada de tecidos usam soluções de terceiros. As duas mais comuns são *Obi Cloth* e *Magica Cloth*.

O *Obi Cloth* é um plugin pago que utiliza um solver moderno baseado em *XPBD* (Extended Position Based Dynamics). Ele proporciona uma autocolisão forte, alta estabilidade e suporte para tecidos complexos, espessos ou com alto nível de detalhe. É muito utilizado em produções profissionais devido à sua precisão física e desempenho [54].

O *Magica Cloth*, também pago, oferece uma abordagem mais simples e voltada para a facilidade de utilização. Embora ofereça menos realismo e controle do que o *Obi Cloth*, é normalmente

utilizado em cabelos, acessórios ou tecidos leves, proporcionando assim um bom desempenho a um custo computacional reduzido [53].

Assim, estes plugins são um grande progresso quando comparados ao sistema padrão do Unity, permitindo simulações mais lógicas e certas para situações de design, animação e colaboração.

3.1.1.4 Suporte dos motores de física

O Unity utiliza nativamente o motor NVIDIA PhysX para todas as simulações baseadas em GameObjects, incluindo o sistema *Unity Cloth*, existem também outros motores de física disponíveis, o *Unity Physics* e *Havok Physics* [80], que são destinados a projetos DOTS/ECS [81]. São analisados estes três motores, avaliando o seu desempenho e, sobretudo, a sua capacidade ou limitação no suporte à simulação de tecidos.

A comparação apresentada resulta de testes práticos realizados aos três motores de física, utilizando uma escala qualitativa de 1 a 5, em que 1 representa um desempenho ou adequação muito reduzida e 5 representa um desempenho ou adequação muito elevada. A avaliação teve em consideração o comportamento observado durante os testes, a facilidade de integração no Unity, a capacidade de execução em tempo real, a facilidade de utilização e, de forma particularmente relevante para esta dissertação, o suporte disponível para simulação de tecidos. Os valores apresentados não correspondem, assim, a métricas normalizadas de desempenho, mas a uma avaliação comparativa baseada nos testes efetuados no contexto do projeto.

Tabela 3.1: Comparação dos motores de física

Critério	Havok Physics	Unity Physics	NVIDIA PhysX
Realismo	5	4	4
Desempenho	5	4	4
Suporte a tecidos	1	1	2
Uso em tempo real	4	5	4
Integração com Unity	4	5	3
Facilidade de uso	3	5	4
Gratuito	2	5	5

3.1.1.5 Materiais e como as imagens são processadas no Unity

O Unity disponibiliza três pipelines gráficos distintas que determinam a forma como os materiais são processados e renderizados: o Pipeline Gráfico Embutido, o Pipeline Universal (URP) e o Pipeline de Alta Definição (HDRP). A forma como as imagens são processadas e mostradas depende da escolha do programador no início do projeto.

O Pipeline Embutido corresponde ao pipeline tradicional do Unity. Oferece bastante liberdade, mas não é tão bom em termos de desempenho e não recebe as últimas atualizações.

O Pipeline Universal (URP) veio para substituir o Pipeline Embutido, é um meio-termo entre qualidade e desempenho. Funciona bem com o *Shader Graph*, tem uma iluminação mais eficiente

e suporta várias plataformas, desde dispositivos móveis até computadores. Por ser flexível, o URP é recomendado para aplicações interativas e ambientes colaborativos em tempo real.

Já o Pipeline de Alta Definição (HDRP) é para quem quer gráficos incríveis. Tem uma iluminação super realista, efeitos climáticos avançados e suporta *ray tracing*. Embora proporcione melhor qualidade gráfica, requer um hardware mais avançado e não é adequado para aplicações que dependem de portabilidade.

É bom lembrar que **cada um destes pipelines usa seus próprios materiais e *shaders***, que não são compatíveis entre si. A escolha do pipeline gráfico deve, portanto, ser tomada numa fase inicial do desenvolvimento, uma vez que afeta diretamente a criação de materiais, o fluxo de produção e o custo de renderização. [55, 56]

3.1.1.6 Suporte Multiutilizador num Ambiente Virtual Colaborativo no Unity

O Unity também suporta aplicações multiutilizador em tempo real através de soluções de *networking*, permitindo que vários utilizadores partilhem o mesmo ambiente virtual e interajam em simultâneo. Em vez de um único sistema integrado, o Unity disponibiliza um conjunto de ferramentas e *frameworks* de rede, como o *Netcode for GameObjects* e o *Netcode for Entities*, complementados por serviços na *cloud* como o Unity Relay e o Lobby, que facilitam a gestão de sessões e ligações entre clientes [50].

Basicamente, o sistema de rede funciona da seguinte maneira: existe um servidor (ou *host*) que controla tudo o que acontece na simulação, enquanto os clientes enviam pedidos de ações e recebem atualizações do estado do mundo virtual. Para que todos os clientes vejam a mesma coisa, o Unity usa métodos para copiar informações, como o *NetworkVariables*, e também para mandar transformações e comandos remotos (*Remote Procedure Calls*, RPCs). Assim, as ações de um cliente e as mudanças no ambiente são transmitidas para todos os outros.

Então, para criar ambientes virtuais colaborativos, o Unity dá o que é preciso para suportar muitos utilizadores ao mesmo tempo, embora a configuração e integração destas soluções de *networking* exija tipicamente mais trabalho de implementação e decisão tecnológica (por exemplo, escolha entre soluções próprias ou *third-party* como Photon [82] ou Mirror [83]).

3.1.1.7 Vantagens e limitações

O Unity é uma engine bem conhecida e de fácil utilização, ótima para quem está a começar e também para quem já trabalha na área. Alguns pontos que fazem o Unity uma boa escolha são:

- É um motor leve e de fácil utilização, com uma curva de aprendizagem mais acessível para quem está a iniciar no desenvolvimento de jogos.
- Suporta uma grande variedade de plataformas, incluindo dispositivos móveis, Realidade Aumentada e Realidade Virtual, sendo reconhecido pela sua portabilidade.
- Utiliza C#, uma linguagem moderna e mais simples de dominar, tornando o desenvolvimento mais rápido e intuitivo.

- Oferece documentação extensa, tutoriais e uma comunidade muito ativa, facilitando a resolução de problemas e a troca de conhecimentos.
- Inclui o *Shader Graph* e ferramentas de criação visual, que simplificam a criação de materiais e efeitos gráficos.
- Disponibiliza dois pipelines gráficos, o URP e o HDRP permitindo escolher entre melhor desempenho ou maior qualidade visual conforme as necessidades do projeto.
- O ecossistema inclui inúmeros plugins e soluções externas (como Photon, Mirror ou plugins de física), ampliando as capacidades do motor.

Apesar destas vantagens, o Unity apresenta também algumas limitações que podem influenciar a escolha:

- O sistema nativo de simulação de tecidos (*Unity Cloth*) é limitado e não oferece o mesmo nível de realismo ou estabilidade que soluções mais avançadas, exigindo frequentemente o uso de plugins externos.
- A construção de sistemas multiplayer robustos requer bibliotecas adicionais, dado que o Unity não possui uma solução integrada ao nível da Unreal Engine.
- A coexistência de múltiplos pipelines gráficos (Built-in, URP e HDRP) pode introduzir complexidade, uma vez que materiais e shaders não são compatíveis entre si.
- Projetos mais complexos podem sofrer com problemas de desempenho se não forem cuidadosamente otimizados, especialmente em hardware de menor capacidade.

Estas limitações não representam falhas do motor, mas sim características que devem ser consideradas consoante o contexto de aplicação. A leveza, portabilidade e flexibilidade do Unity tornam-no ideal para uma grande variedade de projetos, embora possa exigir ferramentas adicionais quando se procura maior realismo visual, simulações físicas avançadas ou ambientes colaborativos de elevada precisão.

3.1.2 Unreal Engine

Unreal Engine é uma engine criada e desenvolvida pela Epic Games. A engine foi criada em 1998, estando assim em desenvolvimento há mais de duas décadas, dando origem a grandes jogos como o Fortnite e Gears of War. Atualmente cada vez mais developers recorrem à utilização do Unreal Engine devido às suas capacidades e à sua constante evolução. O engine disponibiliza ferramentas e workflows para criar jogos com gráficos extremamente realistas e impressionantes.

Graças às diversas capacidades, a Unreal Engine é adequada para diversas aplicações como o desenvolvimento de visualizações arquitetónicas, simulações, experiências de realidade virtual, vídeos e filmes de animação.

Empresas notáveis, como Electronic Arts, Activision, Nike, Sony, LEGO e Harmonix, já empregam a Unreal Engine nos seus fluxos de trabalho de desenvolvimento. A adaptabilidade e a vasta gama de recursos fazem da Unreal Engine uma escolha preferencial tanto para estúdios independentes mais pequenos como para grandes empresas de produção.

3.1.2.1 A Evolução e o Legado do Unreal

- **1998:** Lançamento do Unreal, destacando-se pelo editor inovador UnrealEd.
- **2002:** O Unreal Engine 2 que introduz ferramentas cinematográficas e melhorias significativas na renderização.
- **2006:** Lançamento do Unreal Engine 3, com suporte para shaders programáveis, a criação do jogo Gears of War popularizou o engine.
- **2014:** O Unreal Engine 4 apresenta o sistema Blueprints.
- **2022:** Lançamento do Unreal Engine 5, com destaque para o Nanite [84](construção de mundos altamente detalhados), Lumen [85] (iluminação dinâmica) e melhorias significativas no desempenho para as consolas de nova geração.
- **2023:** Lançamento das versões Unreal Engine 5.2 e 5.3, que introduziram melhorias na renderização, animação, modelação, simulação e criação procedimental de conteúdos.
- **2028?:** O Unreal Engine 6 é esperado entre 2028 e 2030.

3.1.2.2 Arquitetura

Esta secção apresenta o Gameplay Framework da Unreal Engine, um conjunto de classes essenciais que organizam a lógica do jogo e a interação entre os seus componentes. O framework estabelece uma separação clara de responsabilidades entre as regras do jogo, o estado global, o controle do jogador e a representação das entidades no mundo, o que permite assim uma organização modular e escalável do sistema de gameplay. Para enquadrar os componentes que compõem o sistema de gameplay, a Figura 3.1 apresenta um diagrama das principais classes e das interações entre elas.

No *Gameplay Framework* da Unreal Engine, o *GameMode* define as regras, o *GameState* guarda o estado global, e cada jogador recebe um *PlayerController* que, tal como um *AIController* para personagens controladas por IA, possui um *Pawn* para o representar no mundo, gerindo também o input, o HUD (Heads-Up Display) e a câmara.

3.1.2.3 Sistema Blueprints

A Unreal Engine disponibiliza o sistema *Blueprints*, uma linguagem de programação visual baseada em nós que permite desenvolver funcionalidades e definir comportamentos sem ser necessário escrever diretamente código em C++. Esta abordagem facilita a criação e a prototipagem

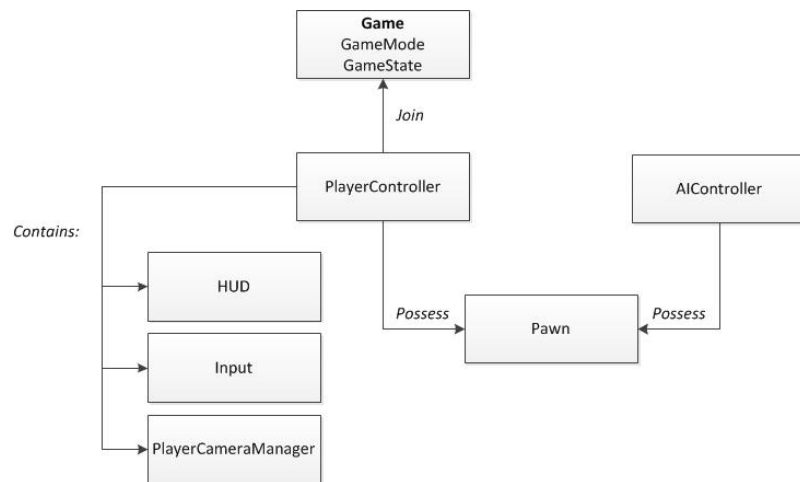


Figura 3.1: Diagrama das relações entre as classes principais do Gameplay Framework da Unreal Engine [57].

de funcionalidades, permitindo visualizar de forma clara o fluxo de execução e testar rapidamente diferentes soluções.

Apesar de serem frequentemente associados a utilizadores com menos experiência em programação, os *Blueprints* também podem ser combinados com C++. Desta forma, as funcionalidades mais complexas ou que exigem maior desempenho podem ser implementadas em C++, enquanto a lógica de interação e configuração pode ser desenvolvida através de *Blueprints*.

Por exemplo, no FabricX foi utilizado um *Blueprint* para criar dinamicamente uma grelha de padrões. Conforme apresentado na Figura 3.2, o sistema começa por obter a lista de padrões disponíveis e determinar o seu tamanho. Em seguida, utiliza um ciclo *For Loop* para percorrer todos os elementos da lista.

Em cada iteração, é criado um novo elemento visual responsável por apresentar a textura do padrão. O sistema associa ainda um evento ao elemento criado, permitindo identificar o padrão selecionado pelo utilizador. Por fim, o elemento é adicionado à grelha, sendo a sua posição calculada com base no índice atual.

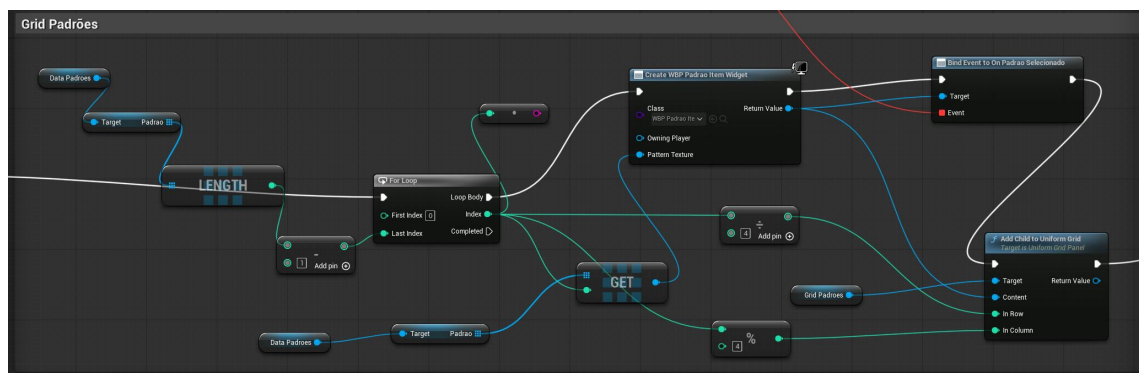


Figura 3.2: Blueprint utilizado para criar dinamicamente a grelha de padrões no FabricX.

A mesma lógica de criação da grid pode ser representada através de programação textual convencional em C++:

```
void criarGridPadroes(const std::vector<Padrao>& padroes)
{
    const int numeroColunas = 4;

    for (int i = 0; i < padroes.size(); i++)
    {
        ItemPadrao item;

        item.textura = padroes[i].textura;

        item.aoSelecionar = [i]()
        {
            selecionarPadrao(i);
        };

        int linha = i / numeroColunas;
        int coluna = i % numeroColunas;

        grid.adicionar(item, linha, coluna);
    }
}
```

Neste exemplo, o ciclo percorre a lista de padrões e cria um elemento visual para cada um. A divisão inteira do índice pelo número de colunas determina a linha da grelha, enquanto o resto da divisão determina a coluna. Considerando uma grelha com quatro colunas, os primeiros quatro elementos são colocados na primeira linha, os quatro seguintes na segunda linha e assim sucessivamente.

A principal diferença entre as duas abordagens encontra-se na forma como a lógica é representada. Em C++, as instruções são apresentadas de forma textual, enquanto no sistema *Blueprints* o fluxo de execução, o acesso à lista, a criação dos elementos e o cálculo das posições são representados visualmente através de nós interligados.

No desenvolvimento do projeto, este sistema foi utilizado para implementar a lógica de interação da aplicação, controlar os elementos da interface e permitir a alteração dinâmica de parâmetros visuais e físicos dos materiais, como a cor, a textura, a rugosidade e outras propriedades associadas à representação dos tecidos.

3.1.2.4 Sistema de simulação de tecidos (Chaos Cloth)

A Unreal Engine usa o Chaos Solver, que é um núcleo matemático que atualiza as partículas a cada frame, calcula forças, colisões e restrições usando integração numérica estável sendo assim

possível simular as partículas que fazem a roupa movimentar-se de forma realista.

O processo começa num software de modelação 3D (Maya, Blender, 3ds Max, etc.), onde a malha é criada e guardada como FBX. No UE5, a malha é importada, configurada como roupa e ajustada com as ferramentas de *cloth authoring*. A simulação é visualizada, e caso sejam necessárias alterações nos parâmetros, o utilizador volta a ajustá-los até obter a malha final desejada.

3.1.2.5 Materiais e Instâncias para Customização

Na Unreal Engine, os materiais mostram como as superfícies reagem à luz. Eles controlam propriedades como cor, textura, brilho, áspero, se é transparente e efeitos especiais. O sistema de materiais tem um editor visual com nós, o que ajuda a criar shaders complexos de forma intuitiva.

Para ajudar a mudar e usar os materiais de novo, a Unreal Engine usa os *Material Instances*. Um *Material Instance* é um tipo diferente de material que já foi feito antes. O material base (ou principal) tem a estrutura do shader e tem parâmetros como cores, tamanhos, quão áspero é, intensidade de normais ou texturas inteiras. Eles podem ser mudados nas instâncias sem ter que fazer o shader de novo. Isso traz duas vantagens essenciais:

- **Eficiência de produção:** permite criar rapidamente múltiplas variantes visuais a partir de um único material base.
- **Desempenho otimizado:** a instância não recompila o shader e partilha a mesma base de código do material pai. [51]

3.1.2.6 Suporte Multiutilizador num Ambiente Virtual Colaborativo

Para permitir que vários utilizadores participem simultaneamente no mesmo ambiente virtual, observando, manipulando ou simulando tecidos a Unreal Engine disponibiliza um sistema de *Multiplayer Networking*.

A Unreal Engine utiliza um modelo cliente-servidor, no qual o servidor detém a autoridade sobre a lógica principal, enquanto os clientes enviam pedidos de ações. Através do sistema de *Replication*, variáveis, movimentos, simulações e interações são automaticamente sincronizados entre todos os utilizadores conectados. [52]

3.1.2.7 Vantagens e limitações

A Unreal Engine apresenta um conjunto alargado de benefícios para programadores de jogos e profissionais de diferentes áreas, tais como:

- É uma ferramenta extremamente poderosa e completa, permitindo criar jogos com um nível visual muito elevado.
- É robusto e flexível, oferecendo suporte para uma vasta gama de plataformas e dispositivos.
- Disponibiliza documentação extensa e muitos recursos de aprendizagem.

- Conta com uma comunidade ativa e com o desenvolvimento contínuo por parte da Epic Games.
- Inclui o sistema Blueprint, uma linguagem visual que facilita o trabalho a quem não domina programação.
- Integra-se facilmente com diversas bibliotecas e softwares externos.
- Possui um marketplace ativo onde é possível adquirir assets, plugins e outros recursos úteis.

Apesar das suas qualidades, o Unreal Engine também apresenta alguns aspetos menos favoráveis que podem influenciar na escolha do mesmo:

- Tem uma curva de aprendizagem mais acentuada do que outros motores, sobretudo porque utiliza programação em C++.
- Requer um hardware mais potente tanto para correr como para desenvolver projetos.
- Aplica uma taxa de royalties de 5% para produtos que excedam 1 milhão de dólares em receitas.

As desvantagens da Unreal Engine não representam falhas do motor, mas sim limitações que dependem do contexto de utilização. Sendo uma ferramenta muito poderosa, pode tornar-se excessiva para projetos simples, como jogos 2D básicos ou aplicações mobile pouco exigentes. Isto não significa que a Unreal seja inadequada, mas apenas que é uma solução mais apropriada para projetos que realmente necessitam do seu elevado potencial técnico [9] [10].

3.1.3 Comparação Unity vs Unreal Engine

Ao avaliar os motores de jogo disponíveis, é essencial compreender as suas capacidades e o seu desempenho em diversos contextos de desenvolvimento. A seleção entre Unity e Unreal Engine depende significativamente da natureza do projeto, dos requisitos gráficos e das plataformas de destino. A comparação a seguir resume os aspetos mais relevantes do desempenho de cada motor.

3.1.3.1 Desempenho

2D: O Unity sobressai-se no desenvolvimento de jogos 2D, pois oferece ferramentas úteis e muitos recursos. É a escolha de muitos estúdios independentes que criam jogos mais simples. O Unreal Engine permite trabalhar em 2D, mas não é tão adequado para este tipo de projeto, tornando o Unity uma opção melhor.

3D: Na área do 3D, o Unreal Engine sobressai-se. As suas técnicas de renderização e ferramentas de otimização permitem que os gráficos sejam realistas e uma jogabilidade fluida, sendo indicado para jogos AAA e aplicações de VR/AR.

Ferramentas de otimização: O Unity oferece um bom conjunto de ferramentas para melhorar o desempenho em várias plataformas. Contudo, o Unreal Engine tem uma vantagem significativa,

pois já vem otimizado para ambientes complexos e visuais de elevada qualidade, diminuindo assim a necessidade de ajustes manuais grandes.

3.1.3.2 Comparação por Áreas-Chave

A Tabela 3.2 apresenta uma comparação direta entre o Unity e o Unreal Engine em diferentes áreas-chave, destacando os pontos fortes e limitações de cada motor.

Tabela 3.2: Comparação entre Unity Engine e Unreal Engine em áreas-chave.

Característica	Unity Engine	Unreal Engine
Facilidade de Utilização	Fácil de aprender, ideal para principiantes	Poderoso, mas mais difícil de dominar
Qualidade Gráfica	Boa, mas não de topo	Gráficos de referência na indústria
Desempenho	Requer alguma otimização	Otimizado para projetos de alta complexidade
Scripting	Programação em C#, flexível	Scripting visual com Blueprint
Loja de Assets	Grande variedade de recursos	Forte, mas com seleção mais pequena
Suporte a Plataformas	Mobile, PC, Web, Consolas, AR/VR, IoT	PC, Consolas, Mobile, Cinema, VR/AR
Suporte para Jogos 2D	Ferramentas e templates 2D excelentes	Suporte limitado; não é ideal para desenvolvimento 2D
Motor de Renderização	URP e HDRP para pipelines de renderização flexíveis	Nanite e Lumen oferecem iluminação em tempo real e renderização de alta resolução
Comunidade e Suporte	Comunidade grande e prestável	Apoio vasto e muito ativo
Custo	Opção gratuita, funcionalidades extra pagas	Gratuito para começar, com royalties posteriores

3.1.3.3 Requisitos Mínimos

A Tabela 3.3 apresenta uma comparação dos requisitos de sistema necessários para a execução do Unity e do Unreal Engine, evidenciando as diferenças ao nível do consumo de recursos e da acessibilidade das ferramentas [58] [23].

Tabela 3.3: Comparação dos requisitos de sistema para Unity Engine e Unreal Engine.

Requisito	Unity Engine	Unreal Engine
Sistema Operativo	Windows 10 ou Windows 11, em versões de 64 bits; macOS compatível com a versão do editor utilizada.	Windows 10 de 64 bits ou Windows 11; macOS compatível com Metal, dependendo da versão do motor.
Processador	Arquitetura x64 com suporte ao conjunto de instruções SSE2.	Processador Intel ou AMD quad-core, recomendado para desenvolvimento em projetos 3D.
Placa Gráfica	Placa gráfica compatível com DX10, DX11 ou DX12 no Windows; Metal no macOS.	Placa gráfica compatível com DirectX 11 ou DirectX 12; para projetos avançados recomenda-se GPU dedicada.
Memória RAM	Mínimo recomendado de 8 GB, podendo ser necessário mais em projetos complexos.	Recomendado 32 GB para desenvolvimento em Unreal Engine 5, especialmente em projetos com gráficos avançados.
Armazenamento	Mais de 10 GB de espaço livre para instalação do editor, módulos e ficheiros de projeto.	Mais de 50 GB de espaço livre, considerando o motor, dependências, plugins e ficheiros de projeto.
Perfil de Utilização	Adequado para computadores intermédios e projetos de menor ou média complexidade.	Mais exigente em termos de hardware, sendo mais adequado para computadores com maior capacidade gráfica e de processamento.

A comparação entre o Unity e Unreal Engine mostra que apesar dos dois serem competentes, cada um tem focos diferentes que pesam na hora de decisão de qual o melhor motor a usar para criar um ambiente colaborativo de design e certificação digital de tecidos [59]. Dito isto o Unity é mais fácil de aprender e adaptar, o que o faz bom para protótipos rápidos, aplicações interativas simples e para se integrar com outros fluxos de trabalho. Estas características ajudam a criar interfaces colaborativas e ferramentas digitais que não exigem muito da parte gráfica ou de processamento.

Já o Unreal Engine é melhor quando o objetivo é um visual bem realista e uma simulação física avançada. Isso é importante para copiar o comportamento dos tecidos no ambiente digital de forma fiel, como acontece na certificação, avaliação de qualidade ou na visualização detalhada

de materiais. Saindo-se melhor ao lidar com ambientes complexos, luzes que mudam e simulações de tecido com o Chaos Cloth, o que aumenta as probabilidades de ser utilizado em aplicações que precisam de uma precisão e de um visual que seja realista.

Então, a decisão entre Unity e Unreal Engine tem que ser baseada no que o projeto realmente precisa. Para soluções colaborativas que valorizam a facilidade e um funcionamento mais leve, o Unity é uma boa escolha [60][61]. Mas, para situações que pedem um realismo físico e visual mais apurado para tecidos, o Unreal Engine mostra-se mais apropriado.

3.2 Seleção da Ferramenta de Prototipagem 3D de Vestuário

Depois de realizada a comparação dos motores de jogo, foi necessário realizar o mesmo estudo mas agora para ferramentas utilizadas na criação e simulação de peças de vestuário. Uma vez que o FabricX depende da integração de modelos digitais previamente desenvolvidos em softwares como o CLO3D ou o Browzwear, esta seleção da ferramenta de prototipagem 3D assume um papel importante na definição do fluxo de trabalho da solução proposta.

Assim, esta secção tem como objetivo analisar ferramentas de prototipagem 3D de vestuário, procurando assim compreender a sua adequação ao fluxo de trabalho definido para o FabricX. Esta análise permite justificar a sua utilização como ferramenta de apoio à criação, simulação inicial e exportação das peças digitais, garantindo uma base mais coerente para a sua posterior integração no ambiente virtual da solução proposta.

3.2.1 CLO3D

O CLO3D é uma ferramenta de prototipagem virtual orientada para o desenvolvimento de vestuário num ambiente tridimensional. Através deste software, é possível criar peças digitais a partir de moldes bidimensionais, definir costuras, aplicar materiais e observar o comportamento da peça sobre um avatar. CLO3D permite tal como o FabricX avaliar aspetos como o caimento, o ajuste ao corpo, a proporção e a aparência final antes da produção física da peça [24].

De acordo com Navarra [24], o CLO3D permite desenvolver a peça num ambiente virtual, visualizar como a peça fica num avatar com medidas específicas, aplicar tecidos e aviamentos, bem como efetuar ajustes imediatos ao modelo. Esta capacidade revela-se particularmente importante no desenvolvimento de vestuário, uma vez que contribui para reduzir a dependência de sucessivas peças piloto.

3.2.1.1 Principais Funcionalidades

O CLO3D oferece um conjunto integrado de ferramentas para construir, visualizar e verificar uma peça de roupa virtual. Com este sistema, conseguimos criar moldes planos, visualizar a peça em 3D, simular o caimento num avatar e avaliar o estilo nos estágios iniciais do design para identificar problemas antes mesmo da peça ser confeccionada!

A característica mais importante do CLO3D é a constante integração dos espaços 2D e 3D. No ambiente 2D, os moldes, costuras e componentes técnicos principais da peça são definidos, adicionando ou criando elementos, como ilustrado na figura 3.3, simultaneamente, o ambiente tridimensional mostra uma imagem da roupa vestida pela modelo. Alterações no molde podem ser rapidamente detectadas pelo utilizador, tornando a criação e o design da peça mais claros e criativos. Como resultado, o designer pode tomar decisões precisas sobre o espaço que a roupa ocupará, a sua aparência geral e o caimento, até que o protótipo físico seja produzido.

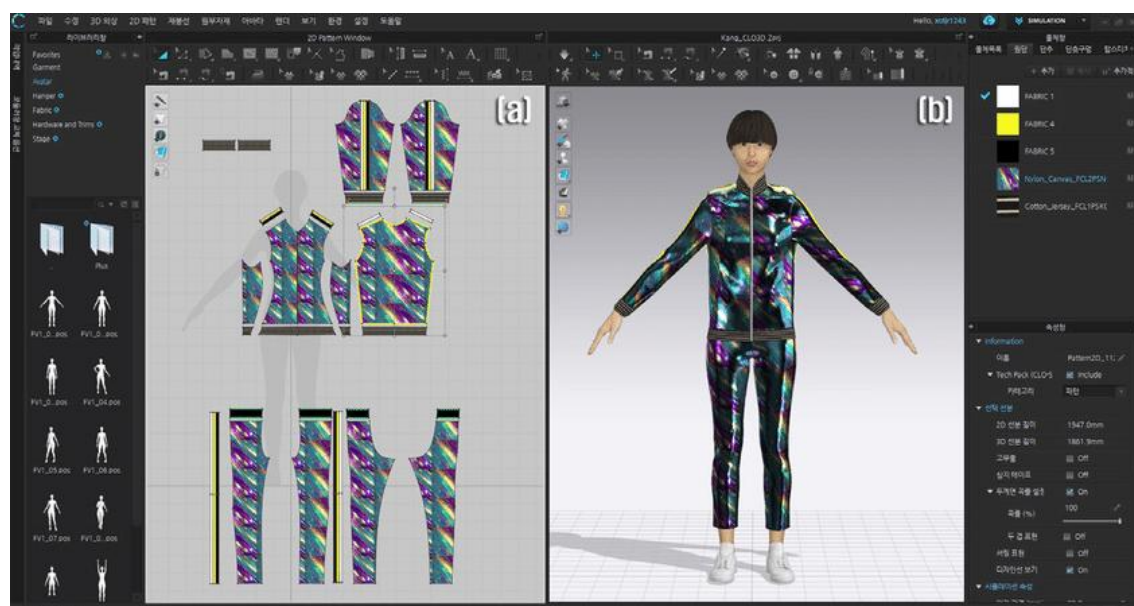


Figura 3.3: Integração entre o ambiente 2D e o ambiente 3D no CLO3D, permitindo a criação de moldes, definição de costuras e visualização simultânea da peça sobre o avatar, adaptado de [25].

O CLO3D é compatível com os formatos FBX/OBJ/DXF, permitindo assim o uso de modelos criados no CLO3D em aplicações externas, como por exemplo o FabricX. Assim, no caso do fluxo de trabalho proposto, o CLO3D não será considerado simplesmente uma ferramenta para a confecção de uma peça de roupa, mas também uma etapa ou uma fase no fluxo de trabalho de design, permitindo a preparação do modelo digital para ser utilizado num ambiente 3D interativo, onde poderá ser submetido a avaliações e análises adicionais.

3.2.1.2 Requisitos Técnicos

Por se tratar de uma ferramenta de prototipagem e simulação tridimensional, o CLO3D exige uma configuração mínima de hardware e software capaz de suportar a criação de modelos 3D, a simulação de tecidos e a visualização em tempo real. Estes requisitos são importantes para garantir uma utilização fluida da aplicação, sobretudo quando são trabalhadas peças com maior complexidade, múltiplas camadas ou materiais com elevado detalhe visual.

A Tabela 3.4 apresenta os principais requisitos técnicos associados à utilização do CLO3D [65].

Tabela 3.4: Requisitos mínimos e recomendados para utilização do CLO3D.

Categoria	Mínimo	Recomendado
Sistema Operativo	Windows 11 64-bit (24H2)	Windows 11 64-bit (25H2)
Processador	AMD Ryzen 3000 series ou Intel 8th Gen series	AMD Ryzen 9000 series ou superior / Intel i9 14th Gen ou superior
Memória RAM	16 GB	64 GB
Placa Gráfica	GPU AMD, Intel ou NVIDIA com suporte para OpenGL 1.6 ou superior	NVIDIA GeForce RTX 4000 series ou NVIDIA RTX A, RTX Ada, RTX Pro Blackwell series
Armazenamento	SSD com 10 GB ou mais	SSD com 20 GB ou mais
Ecrã	1920 × 1080 (FHD)	2560 × 1440 (QHD) ou 3840 × 2160 (UHD, 4K)
Dispositivo de Entrada	Rato com 3 botões	Rato com 3 botões
Rede	Ligação à Internet necessária	Ligação à Internet necessária

3.2.2 Browzwear VStitcher

O VStitcher é uma plataforma de prototipagem digital de vestuário desenvolvida pela Browzwear, que é utilizada no desenvolvimento, simulação e validação de peças em ambiente tridimensional. Permitindo assim criar peças digitais a partir de moldes bidimensionais, aplicar materiais, definir costuras, validar o ajuste da peça [86].

Tal como o CLO3D, o Browzwear tem uma ligação direta entre o ambiente 2D e o ambiente 3D. No espaço bidimensional são definidos os moldes, as costuras, as alterações estruturais e os principais elementos técnicos da peça e ao mesmo tempo no ambiente tridimensional é possível visualizar a peça aplicada sobre um avatar, avaliando aspetos como o caimento, o ajuste ao corpo, as proporções, as dobras e a aparência final do vestuário. Esta junção entre os dois ambientes é reforçada pelo VStitcher, que permite ligar arestas, linhas internas ou pontos da peça para simular a construção física do vestuário [87].

3.2.2.1 Principais Funcionalidades

Como referido o VStitcher, consegue criar ou importar moldes 2D, definir linhas de costura, aplicar tecidos, aviamentos e gráficos, ajustar medidas, trabalhar variações de cor e visualizar o resultado final em 3D, permitindo assim que as alterações realizadas no molde sejam automaticamente refletidas na peça tridimensional, ajudando assim a análise e a tomada de decisão.

A ferramenta permite trabalhar com escalas de tamanhos, bibliotecas de materiais, validação de ajuste, preparação de fichas técnicas e exportação de informação relevante para produção.

Outro aspeto importante é a criação de materiais mais realistas. O Browzwear permite utilizar mapas de material e diferentes camadas de textura para construir uma aparência mais realista dos tecidos, aproximando a representação digital das características visuais do material físico [88].

3.2.2.2 Requisitos Técnicos

Como o CLO3D, o Browzwear também necessita de uma configuração de hardware capaz de suportar a criação de peças digitais, a simulação de materiais e a visualização em tempo real.

A Tabela 3.5 apresenta os principais requisitos técnicos associados à utilização do Browzwear, de acordo com a documentação oficial da plataforma [89].

Tabela 3.5: Requisitos mínimos e recomendados para utilização do Browzwear VStitcher e Lotta em Windows.

Categoria	Mínimo	Recomendado
Processador	Intel Core i7 ou AMD Ryzen 7	Intel Xeon, 12 núcleos, mínimo 3,2 GHz ou superior
Memória RAM	DDR4 16 GB	DDR4 32 GB
Placa Gráfica	NVIDIA GeForce GTX 960 ou NVIDIA Quadro P2200	NVIDIA RTX 3000 series, NVIDIA Quadro RTX ou RTX A series
Memória Gráfica	4 GB de VRAM	8 GB de VRAM ou superior
Armazenamento	HDD com 256 GB	SSD com, no mínimo, 512 GB
Ecrã	1920 × 1080 a 60 Hz	2560 × 1440 a 60 Hz
Dispositivo de Entrada	Rato com 3 botões	Rato com 3 botões
Sistema Operativo	Windows 10 64-bit ou Windows 11	Windows 10 64-bit ou Windows 11

3.2.3 Comparação CLO3D vs Browzwear VStitcher

Esta comparação entre o CLO3D e o Browzwear VStitcher ajudou a identificar que ambas as ferramentas apresentam funcionalidades importantes, ambos os softwares têm propriedades idênticas como a ligação direta entre os moldes bidimensionais e a visualização tridimensional em tempo real, permitindo assim criar, simular e avaliar peças digitais antes da criação de protótipos físicos.

No caso do CLO3D, uma das principais características é a facilidade de uso e velocidade na criação e simulação de peças, ajudando assim na redução da prototipagem física, reduzindo os custos, o tempo de desenvolvimento e o desperdício de materiais. Além da visualização 2D e 3D, o CLO3D ajuda na comunicação entre designers, modeladores, técnicos e clientes, apresentando uma melhor e mais antecipada tomada de decisão durante o desenvolvimento das peças.

O VStitcher, possui características semelhantes mas mais voltadas para ambientes industriais e mais profissionais, pois não se limita à visualização tridimensional da peça mas oferece funcionalidades como a validação técnica, desenvolvimento de tamanhos, organização de materiais, documentação de produção e articulação entre diferentes equipas. Essa característica torna o VStitcher mais indicado para contextos mais empresariais onde se precisa integrar design, modelação, desenvolvimento técnico e produção numa única plataforma.

Embora o CLO3D seja mais prático, mais visual e intuitivo em termos de criação, simulação e exportação das peças, o VStitcher representa um perfil mais focado para equipas técnicas e fluxos de trabalho empresariais mais complexos. Esta diferença não significa que uma ferramenta seja mais adequada do que a outra, mas que as diferentes ferramentas poderão ser mais adequadas de acordo com o contexto de utilização.

Apesar das vantagens do Browzwear VStitcher, a sua orientação mais industrial pode exercer uma desvantagem para o FabricX. A utilização desta ferramenta pode implicar uma maior adaptação ao fluxo de trabalho desenvolvido até então, nomeadamente ao nível da preparação dos modelos, da organização dos materiais e da exportação para o Unreal Engine. Para além disso, a sua curva de aprendizagem pode ser mais exigente para utilizadores que apenas se queiram concentrar na criação, simulação e exportação rápida de uma peça digital para um ambiente interativo.

Um aspeto importante é o CLO3D ser uma ferramenta utilizada por entidades participantes do projeto, o que reforça ainda mais a sua utilização no FabricX. Esta escolha permite aproximar o desenvolvimento da aplicação dos processos existentes, facilitando a adoção do fluxo de trabalho proposto e reduzindo a necessidade de adaptação por parte dos utilizadores.

No caso do FabricX, esta comparação é importante, uma vez que a plataforma depende da utilização de modelos digitais preparados em ferramentas externas. O CLO3D apresenta-se como adequado para o fluxo de trabalho adotado, permitindo criar, ajustar e validar inicialmente as peças digitais antes da sua exportação para o Unreal Engine. Esta passagem não tem apenas como objetivo suportar uma futura experiência em Realidade Virtual, mas também permitir que a peça seja integrada num ambiente interativo onde é possível aplicar materiais e padrões, alterar propriedades visuais e físicas, utilizar dados provenientes de certificados digitais, realizar simulação em tempo real e suportar colaboração multiutilizador.

O FabricX não se propõe a substituir ferramentas especializadas como CLO3D ou Browzwear VStitcher. Bem pelo contrário, procura complementar o trabalho já realizado nessas ferramentas, de modo a que os modelos digitais possam ser utilizados num ambiente interativo, colaborativo e com potencial integração na Realidade Virtual. Assim sendo, enquanto que CLO3D e VStitcher se concentram na criação e preparação técnica das peças, o FabricX acresce uma camada de visualização, de personalização, de análise colaborativa e de integração de dados externos como materiais, padrões e certificados digitais de tecidos.

Assim, tanto o CLO3D como o Browzwear VStitcher têm um papel importante no pipeline do FabricX, funcionando como ferramentas de apoio à prototipagem digital especializada. Contudo, para o desenvolvimento realizado, o CLO3D foi a solução mais adequada, face à sua facilidade de uso, da compatibilidade com o fluxo adotado, da familiaridade traduzida das entidades envolvidas

e da sua adequação para criar, simular inicialmente e exportar as peças digitais para o Unreal Engine.

3.3 Ferramentas de Apoio à Preparação de Modelos 3D

Para além das ferramentas analisadas nas secções anteriores, foi também necessário analisar ferramentas que ajudam na preparação, verificação e correção dos modelos tridimensionais. Estas ferramentas têm um papel importante no fluxo de trabalho do FabricX, porque conseguem abrir os ficheiros exportados dos softwares de prototipagem 3D, verificar a geometria, analisar os mapas UV, corrigir escalas e preparar os modelos caso seja necessária alguma correção antes de colocar a peça no FabricX.

Neste contexto, esta etapa também é importante devido ao facto dos modelos de vestuário, por vezes necessitarem de alguma correção ou ajuste, de forma a não comprometer a animação no FabricX. Dito isto, foram consideradas ferramentas de modelação 3D, nomeadamente o Blender [67] e o Autodesk Maya [90], com o objetivo de perceber qual seria mais adequada para apoiar o pipeline de desenvolvimento da plataforma.

3.3.1 Blender

O Blender é uma ferramenta gratuita e *open-source* de criação tridimensional, por ser versátil o Blender, é usado em diferentes áreas da produção digital. Incluindo desde jogos e animação até visualização de projetos de arquitetura, protótipos, criação de objetos em 3D e desenvolvimento de conteúdo para ambientes interativos.

Huang et al. [42], referem o Blender como uma ferramenta amplamente utilizada na edição de cenas tridimensionais, materiais, geometria e iluminação. Embora o trabalho dos autores esteja centrado na automatização de tarefas através de modelos de visão-linguagem, não deixa de reforçar a importância do Blender como ambiente flexível para manipulação e preparação de conteúdos tridimensionais.

3.3.1.1 Principais Funcionalidades

O Blender tem muitas funcionalidades para a criação e edição de conteúdos tridimensionais. A ferramenta tem várias etapas do processo de produção 3D, incluindo modelação, animação, *rigging*, simulação, renderização, composição, edição de vídeo, criação de texturas e efeitos visuais [93]. Esta diversidade mostra que o Blender não é unicamente usado para uma função mas que pode ser usado em diversas áreas, para diferentes trabalhos.

Uma das principais funcionalidades do Blender é a modelação 3D. O Blender através das suas ferramentas, como por exemplo a edição de malha, torna possível criar, modificar e ajustar objetos tridimensionais, permitindo desenvolver modelos de raiz ou corrigir modelos previamente importados, ajustando a sua forma, escala, orientação e estrutura. Como referido em fontes oficiais

de introdução ao Blender, a ferramenta é normalmente utilizada para a modelação e animação 3D, sendo acessível tanto a utilizadores iniciantes como a utilizadores com maior experiência [92].

Neste âmbito para além da modelação, o Blender permite trabalhar com materiais, texturas e mapas UV. Estas funcionalidades são essenciais para definir a aparência visual dos objetos, permitindo aplicar cores, imagens, padrões. A criação e edição de mapas UV permite organizar a forma como uma textura é aplicada sobre um modelo tridimensional, garantindo uma correspondência mais correta entre a imagem bidimensional e a superfície 3D.

O Blender também é muito requisitado para o âmbito da animação, porque permite criar movimentos através de *keyframes*, trabalhar com esqueletos digitais através de *rigging* e controlar deformações dos modelos ao longo do tempo. Estas ferramentas são importantes em contextos onde os modelos não são apenas estáticos, mas que necessitam de ser preparados para interação, movimento ou visualização dinâmica.

Ao nível da simulação, o Blender permite trabalhar com a física de corpos rígidos, partículas, fluidos, cabelo e tecidos, dependendo das necessidades do projeto. Ao nível da renderização, disponibiliza motores como o Eevee e o Cycles [96], que permitem gerar imagens finais com diferentes níveis de realismo visual.

Outro aspeto importante é a compatibilidade com diferentes formatos de ficheiros. O Blender permite importar e exportar modelos em formatos, como FBX e OBJ, facilitando a ligação com outras ferramentas de criação 3D e motores de jogo. Esta capacidade torna o Blender uma ferramenta adequada para fluxos de trabalho onde os modelos passam por diferentes fases e softwares antes de serem utilizados numa aplicação final.

De uma forma geral, estas características fazem com que o Blender seja uma ferramenta versátil para a criação e preparação de conteúdos digitais tridimensionais.

3.3.1.2 Requisitos Técnicos

Embora o Blender seja uma ferramenta mais acessível e flexível do que algumas soluções comerciais de modelação 3D, continua a exigir alguns requisitos mínimos de hardware e software para garantir uma utilização estável.

A Tabela 3.6 apresenta os principais requisitos técnicos associados à utilização do Blender [94].

3.3.2 Autodesk Maya

O Autodesk Maya é um software profissional de criação tridimensional, utilizado normalmente em aplicações de modelação 3D, animação, simulação, efeitos visuais e renderização. De acordo com a Autodesk, a sua utilização abrange modeladores, animadores, artistas de iluminação e artistas de efeitos visuais em indústrias como cinema, televisão e desenvolvimento de jogos digitais [90], mostrando assim que o Maya é utilizado em vários e diferentes fluxos de trabalho profissionais de produção 3D.

Tabela 3.6: Requisitos mínimos e recomendados para utilização do Blender.

Categoria	Mínimo	Recomendado
Sistema Operativo	Windows 8.1, macOS 13 ou Linux	Windows 11 ou superior, macOS 26
Processador	Processador 64-bit com 4 núcleos	Processador 64-bit com 8 núcleos
Memória RAM	8 GB	32 GB
Placa Gráfica	2 GB de VRAM com suporte OpenGL 4.3	8 GB de VRAM
Ecrã	1920 × 1080	2560 × 1440 ou superior

Ao contrário de ferramentas que foram analisadas anteriormente, como o CLO3D ou o Browzwear VStitcher, o Maya não é direcionado para a prototipagem de peças de roupa. A sua utilização é mais geral como o Blender, permitindo criar e editar personagens, objetos, cenários, animações, materiais e simulações. Devido ao seu conjunto de ferramentas avançadas, o Maya pode ser utilizado como ferramenta de apoio na preparação, correção e otimização de modelos tridimensionais antes da sua integração em motores de jogo ou ambientes interativos.

3.3.2.1 Principais Funcionalidades

Uma das principais funcionalidades do Maya é a modelação 3D. Através das suas ferramentas de modelação poligonal e de superfícies, é possível criar e editar objetos tridimensionais com enorme nível de detalhe. O utilizador pode modificar vértices, arestas e faces, ajustar formas, corrigir geometrias e preparar modelos para diferentes finalidades, como animação, renderização ou integração em motores de jogo.

Outra funcionalidade importante e que se destaca neste software, é o *rigging*, que permite criar esqueletos, para controlar a deformação e o movimento dos modelos ou avatares. Esta funcionalidade é a característica mais importante em personagens, objetos articulados e modelos que necessitam de animação. Em conjunto com o *rigging*, o Maya disponibiliza ferramentas de animação por *keyframes*, permitindo definir movimentos ao longo do tempo e controlar de forma precisa a posição, rotação e escala dos elementos da cena.

O Maya inclui também funcionalidades de simulação, o que permite trabalhar com fenómenos físicos e efeitos dinâmicos, como tecidos, cabelo, partículas, fluidos e corpos rígidos. O conjunto desta funcionalidades torna possível criar comportamentos mais realistas em objetos e personagens, sendo especialmente úteis em contextos de animação, cinema, jogos digitais e efeitos visuais.

A nível visual o Maya permite criar materiais, aplicar texturas, configurar iluminação e produzir renderizações com elevada qualidade gráfica, estas funcionalidades servem para avaliar o aspeto final dos modelos, testar diferentes soluções e produzir muitas animações de elevado realismo, o que torna o Maya uma ferramenta adequada a fluxos de trabalho profissionais de produção 3D.

3.3.2.2 Requisitos Técnicos

Por ser uma ferramenta profissional de modelação, animação, simulação e renderização tridimensional, o Autodesk Maya exige uma configuração de hardware e software adequada para garantir uma utilização estável.

A Tabela 3.7 apresenta os principais requisitos técnicos associados à utilização do Autodesk Maya [95].

Tabela 3.7: Requisitos técnicos para utilização do Autodesk Maya.

Categoria	Requisitos
Sistema Operativo	Microsoft Windows 11 ou Windows 10 64-bit; Apple macOS 15.x, 14.x, 13.x ; Linux® Red Hat® Enterprise 8.10 WS, 9.3 WS, 9.5 WS; Rocky Linux 8.10, 9.3, 9.5
Processador	Processador Intel ou AMD multi-core de 64-bit com conjunto de instruções SSE4.2. Em macOS, são suportados processadores Apple Silicon arm64 ou Intel x86
Memória RAM	Mínimo de 8 GB de RAM, sendo o recomendado 16 GB ou superior para cenas mais complexas
Placa Gráfica	Placa gráfica compatível com o Autodesk Maya e adequada para aceleração gráfica em aplicações 3D
Armazenamento	7 GB de espaço livre para a instalação
Dispositivo de Entrada	Rato de três botões
Rede	Ligação à Internet necessária para instalação, ativação de licença e acesso a serviços associados

3.3.3 Comparação Blender vs Maya

Com a análise destas duas ferramentas, permitiu compreender que ambas as ferramentas têm capacidades importantes e idênticas na criação, edição e preparação de modelos tridimensionais. Os dois softwares conseguem trabalhar com modelação 3D, edição de malhas, materiais, texturas, animação, renderização e exportação de modelos para outros ambientes digitais. No entanto, apesar de terem funcionalidades muito idênticas, as ferramentas apresentam diferentes níveis de acessibilidade, complexidade e adequação ao fluxo de trabalho definido para o FabricX.

O Autodesk Maya é uma ferramenta profissional que é muito usada em contextos mais industriais, mais propriamente nas áreas da animação, cinema, jogos digitais e efeitos visuais. A sua principal vantagem e mais conhecedora é sobretudo a modelação avançada, *rigging*, animação, simulação e preparação de conteúdos tridimensionais complexos. Esta capacidade torna o Maya uma solução adequada para equipas profissionais que necessitam de um elevado controlo técnico sobre os modelos e sobre os processos de produção. A sua curva de aprendizagem, é um pouco

mais exigente, sobretudo quando o objetivo não é desenvolver uma produção 3D completa, mas sim verificar, corrigir e preparar modelos exportados de outras ferramentas antes da sua integração num motor de jogo. O Maya comparado ao Blender também ocupa mais espaço e puxa mais pelo hardware da máquina.

Já o Blender, comparado ao Maya, revelou-se um software mais adequado ao fluxo de trabalho utilizado no FabricX. Gratuito e *open-source* facilita a sua utilização em contexto académico e experimental, permitindo testar, ajustar e preparar modelos sem depender de algum tipo de licença comercial. O Blender também apresenta uma interface bastante prática e flexível e um conjunto de ferramentas mais que suficientes para as necessidades deste trabalho.

No desenvolvimento do FabricX, o Blender foi utilizado como ferramenta de apoio entre a criação das peças digitais e a sua integração no Unreal Engine, mais concretamente na Secção 4.2, correspondente à Fase 1: Criação e Preparação da Peça Digital.

Deste modo, o CLO3D, o Blender e o Unreal Engine desempenham funções distintas mas complementares no fluxo de trabalho adotado. O CLO3D é utilizado na criação, ajuste e simulação inicial da peça de vestuário, permitindo posteriormente a sua exportação para um formato compatível com outros ambientes. O Blender funciona como uma ferramenta intermédia de apoio, utilizada quando é necessário verificar, corrigir ou preparar o modelo tridimensional antes da sua integração final. Por sua vez, o Unreal Engine corresponde ao ambiente onde a peça é incorporada no FabricX, permitindo a aplicação dinâmica de materiais e padrões, a alteração de propriedades visuais e físicas, a utilização de dados provenientes de certificados digitais, a interação em tempo real e a colaboração multiutilizador.

Comparativamente ao Maya, o Blender apresentou uma maior adequação ao tipo de utilização pretendida. Enquanto o Maya destaca-se em fluxos mais complexos e industriais, o Blender tornou-se mais prático e apropriado para o tipo de processo que o FabricX precisa, um processo de apoio, verificação e preparação dos modelos digitais. Esta escolha deveu-se à sua acessibilidade, flexibilidade, compatibilidade com os formatos utilizados e adequação às necessidades práticas do projeto. Assim, o Blender funcionou como uma etapa intermédia no fluxo de trabalho, permitindo preparar e validar os modelos digitais antes da sua integração no Unreal Engine.

Capítulo 4

Arquitetura e Desenvolvimento do Sistema

Neste capítulo é apresentada a arquitetura e o processo de desenvolvimento do FabricX, de como a solução proposta foi criada, estruturada e implementada. Depois de realizado o estudo de ferramentas da secção anterior, é necessário explicar como os diferentes componentes são articulados de forma a dar origem a uma plataforma funcional.

O desenvolvimento do FabricX foi organizado de uma forma sequencial, separado em diversas partes, mas todas complementares umas das outras. Esta organização ajudou a compreender o percurso que a peça digital tem, desde a sua criação inicial numa ferramenta de prototipagem como o CLO3D até à sua utilização num ambiente interativo desenvolvido no Unreal, permitindo estabelecer ligações com sistemas externos.

Ao longo do capítulo são descritas as principais etapas do desenvolvimento. Inicialmente é apresentada a visão geral da arquitetura, mostrando o fluxo de trabalho, as ferramentas e componentes utilizadas. Depois é descrita a fase de criação e preparação da peça digital. Posteriormente é realizada a integração da peça no Unreal Engine.

Numa fase seguinte, é apresentada a integração do FabricX com sistemas externos desenvolvidos no âmbito do projeto e por último é descrita a componente colaborativa, que permite a vários participantes aceder ao mesmo ambiente virtual e acompanhar alterações realizadas sobre a peça.

4.1 Visão Geral da Arquitetura

A arquitetura do trabalho foi criada num formato em que seja fácil a conexão das ferramentas que a compõem. Este formato permite que o sistema tenha fases bem definidas e diversas conexões entre elas, dando origem a um fluxo de trabalho claro e bem definido como ilustrado Figura 4.1 além de conseguir desenvolver, integrar ou expandir a plataforma num futuro.

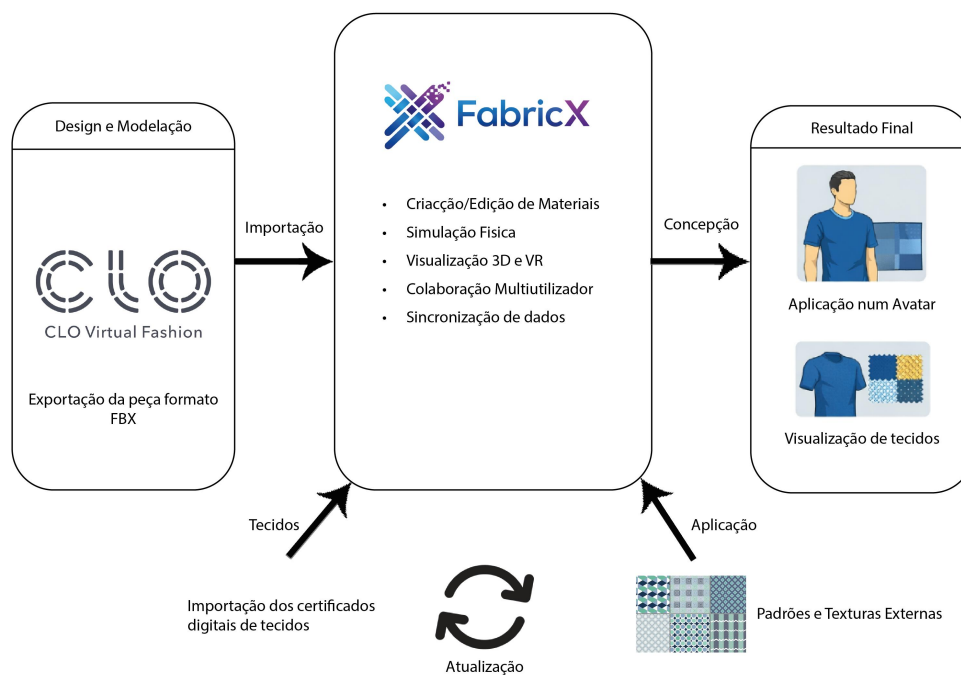


Figura 4.1: Arquitetura geral do FabricX e integração entre ferramentas externas, dados técnicos, padrões visuais e ambiente interativo.

O fluxo de trabalho divide-se em quatro fases centrais:

- **Criação e preparação do conteúdo digital**
- **Integração no Unreal Engine**
- **Interconexão com Sistemas Externos**
- **Exploração Colaborativa e Validação Conjunta**

Esta estrutura facilita a compreensão do trajeto da peça, desde a sua criação até à interação final dos utilizadores com a peça.

A primeira etapa refere-se à criação da peça no CLO3D. Nesta fase, os moldes, as costuras e as primeiras características visuais da peça são estabelecidos. O CLO3D, como já referido anteriormente, funciona como ferramenta de apoio à prototipagem digital, permitindo criar e simular

inicialmente a peça antes da sua integração no FabricX. Quando necessário, o modelo exportado pode passar pelo Blender para operações intermédias de verificação, correção ou preparação da geometria. Posteriormente, o modelo é exportado num formato compatível com o Unreal Engine, neste caso FBX.

A segunda fase corresponde à integração da peça no Unreal Engine, onde é incorporada no FabricX. Nesta etapa são configurados os materiais, os padrões, os parâmetros visuais e físicos e os elementos de interação. A peça pode ser visualizada sobre um avatar, personalizada em diferentes regiões e ter algumas das suas propriedades alteradas em tempo real, permitindo observar de que forma essas alterações influenciam a sua representação. O Unreal Engine assume, assim, o papel central na aplicação, sendo responsável pela visualização tridimensional, interação, simulação e lógica funcional do sistema.

A terceira fase é a integração do FabricX com sistemas externos desenvolvidos por outros elementos do projeto. Nesta etapa, a plataforma estabelece ligação com dois contributos complementares. Por um lado, padrões gerados através de Inteligência Artificial, provenientes de um trabalho desenvolvido noutro projeto [41], por outro, dados técnicos associados a certificados digitais de tecidos, resultantes do trabalho desenvolvido por outro colega que são conectados em tempo real com o FabricX [43]. Os padrões gerados por Inteligência Artificial servem para a personalização da peça, enquanto os dados dos certificados digitais permitem associar informação estruturada sobre as propriedades dos tecidos. Desta forma, o FabricX assume-se como uma plataforma de integração entre diferentes componentes do projeto.

Para finalizar, a quarta e última fase corresponde à utilização do FabricX num modo colaborativo. Nesta fase, os utilizadores podem visualizar a peça, alterar padrões, consultar e analisar propriedades do tecido e interagir num espaço digital partilhado. A componente multiutilizador permite que diferentes participantes estejam presentes no mesmo ambiente, comunicando, discutindo ideias e validando em conjunto os materiais digitais. Desta forma, o FabricX procura transformar a análise de tecidos num processo mais visual, participativo e próximo dos contextos reais de decisão.

4.2 Fase 1: Criação e Preparação da Peça Digital

A primeira fase é a criação da peça no software de modelação o CLO3D. Nesta etapa é definida a estrutura base da peça a partir de moldes bidimensionais, que são posteriormente costurados e simulados sobre um avatar tridimensional, como ilustrado na Figura 4.2. Durante este processo o designer ajusta os diferentes elementos da peça, como a sua forma geral, as linhas de costura, o posicionamento das várias partes e o caimento inicial do tecido.



Figura 4.2: Criação da T-shirt no CLO3D, com visualização simultânea da peça em 3D e dos moldes bidimensionais utilizados na sua construção.

Com a utilização do CLO3D é permitido ao designer realizar uma primeira validação visual da peça antes da sua integração no FabricX. Esta preparação é importante antes da sua exportação porque a qualidade do modelo exportado influencia diretamente a forma como a peça será depois visualizada, personalizada e manipulada no FabricX.

É importante referir que nesta fase não se pretende desenvolver nenhuma das funcionalidades finais do FabricX, esta fase serve sim para preparar um modelo digital consistente e tecnicamente adequado, um modelo que não vá ter problemas durante e depois da exportação. Dito isto o CLO3D é utilizado como ferramenta de apoio à prototipagem da peça, permitindo criar uma base geométrica e visual que será posteriormente integrada e explorada no ambiente interativo desenvolvido no Unreal Engine.

Após terminar a modelação da peça, a peça é exportada preferencialmente em formato FBX, de modo a permitir a sua integração no Unreal Engine. A escolha deste formato justifica-se pela sua capacidade de transportar a geometria tridimensional da peça, preservando a estrutura do modelo, a organização da malha e as respetivas coordenadas UV. Estas coordenadas UV são muito importantes para a personalização da peça, pois estabelecem a correspondência entre a superfície tridimensional da peça e a sua representação bidimensional.

Para além do modelo tridimensional, quando a peça é exportada, além do formato FBX, existe o mapa UV associado à peça. Este mapa corresponde à projeção da superfície da peça num plano bidimensional, permitindo visualizar e identificar as diferentes zonas que compõem o exemplo em cima mencionado, como a parte frontal, a parte posterior, as mangas e a gola. A sua utilização é muito importante porque assim permite preparar os elementos criados fora do motor de jogo sejam corretamente posicionados sobre a malha 3D quando importados para o FabricX.

Com base nesse mapa UV, é possível a partir do Photoshop [66] ou qualquer outro software de edição, criar uma máscara de segmentação por regiões como ilustrado na Figura 4.3.

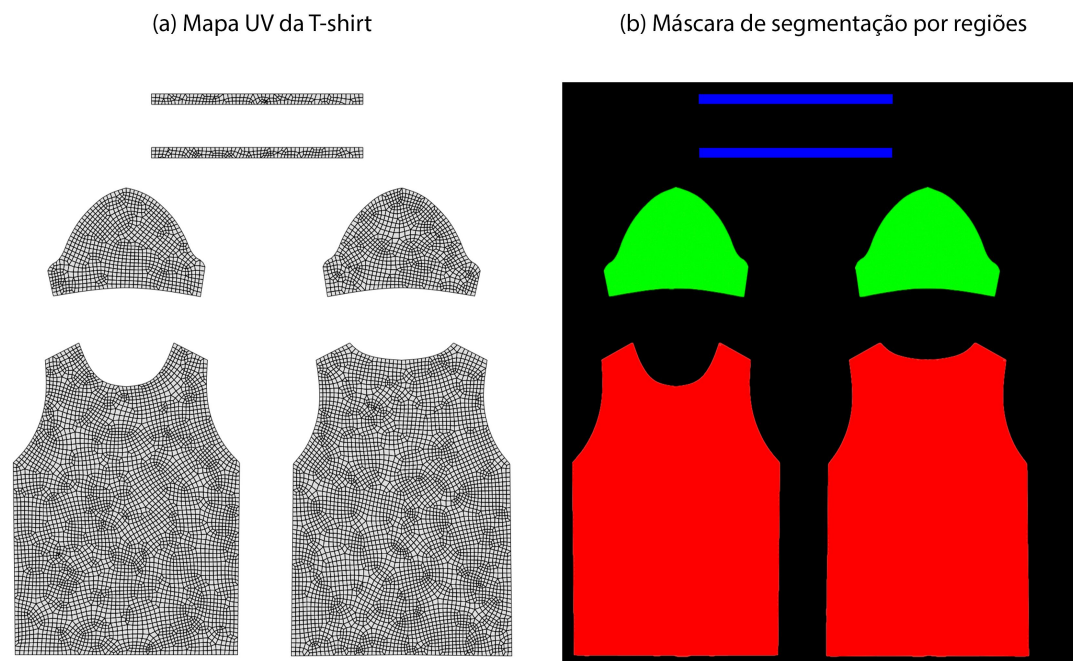


Figura 4.3: Comparação entre o mapa UV original da T-shirt e a máscara de segmentação criada para o FabricX

Durante este processo, cada zona da peça é pintada por uma cor diferente, de modo a diferenciar visualmente as várias partes da peça. É importante referir que esta máscara não representa o aspeto final do vestuário, antes pelo contrário, ela funciona como um elemento técnico auxiliar, uma ajuda, utilizada para indicar ao material dentro do FabricX, que áreas da malha devem receber determinados padrões, cores ou texturas.

Depois da máscara ser criada ela é, juntamente com o ficheiro fbx importada para o FabricX e integrada no material. A partir da leitura das diferentes cores que estão presentes na máscara, o material consegue agora distinguir as regiões da peça e aplicar propriedades visuais de forma independente, tornando possível personalizar a peça, separadamente como no exemplo uma t-shirt que é separada em tronco, as mangas ou a gola, sem que seja necessário alterar a geometria original do modelo.

Este procedimento é muito importante porque conseguimos aumentar a flexibilidade da personalização visual no ambiente FabricX. Em vez de ser aplicada uma única textura a toda a peça, a máscara permite combinar diferentes padrões, cores e materiais na mesma peça. Assim, o utilizador consegue experimentar várias configurações visuais em tempo real no Unreal Engine, tornando

o processo de design mais interativo, modular e adaptável às necessidades de análise e validação da peça digital.

É importante esclarecer que esta fase ainda não corresponde ao funcionamento interno do FabricX, porque ela é uma etapa complementar de preparação dos recursos digitais que serão utilizados e integrados no sistema. A criação da peça no CLO3D, a exportação em formato FBX, a criação ou edição do mapa UV e a criação da máscara são procedimentos prévios à sua utilização no FabricX.

O FabricX não pretende substituir ferramentas especializadas de modelação e prototipagem de vestuário, como o CLO3D, pelo contrário a solução proposta procura tirar vantagem do que já existe no mercado, e usar modelos desenvolvidos nessas plataformas e prolongar a sua utilização para um ambiente mais interativo, colaborativo e orientado para análise em tempo real. Pois o CLO3D é utilizado como ponto inicial do fluxo de trabalho, enquanto o FabricX assume a função de explorar, visualizar e manipular a peça digital num contexto virtual mais dinâmico.

Embora o ecossistema CLO disponibilize soluções complementares, como o CLO-SET e o respetivo *Virtual Showroom*, estas encontram-se principalmente orientadas para a gestão, partilha, apresentação e exploração de conteúdos digitais associados a coleções de vestuário. O FabricX distingue-se por procurar acrescentar uma dimensão de análise técnica e experimental à peça digital, permitindo integrar dados provenientes de certificados digitais de tecidos, alterar propriedades visuais e físicas dos materiais, aplicar padrões externos e observar essas alterações num ambiente tridimensional interativo e multiutilizador. Assim, o objetivo da solução proposta não é competir diretamente com ferramentas como o CLO-SET, mas explorar uma camada complementar onde a informação técnica do tecido pode ser relacionada com a sua representação e comportamento no ambiente virtual.

O mesmo acontece com o uso de uma ferramenta de modelação 3D, como o Blender [67]. Antes da integração final no Unreal Engine, o modelo exportado do CLO3D pode ser verificado e, quando necessário, ajustado com o uso do Blender. Com o objetivo de assegurar que a peça apresenta uma estrutura adequada para utilização num motor de jogo. Deste modo, procura-se evitar problemas que possam comprometer a sua visualização, a aplicação de materiais, a personalização visual ou a interação posterior no FabricX.

Existem vários aspetos do modelo que devem ser verificados durante este processo. Isso inclui a orientação do modelo, a escala, a maneira como os componentes da malha estão organizados, a direção de todas as faces (normais da superfície), se existe algum tipo de geometria no modelo que não seja necessária para a peça final e que pode provocar anomalias na física da mesma ou mesmo garantir que todas as coordenadas UV estejam corretamente dispostas. Pequenas inconsistências durante a exportação do modelo podem levar a dificuldades na próxima etapa, que neste caso é o FabricX.

Se algum aspeto do modelo descrito acima estiver um pouco incorreto e for exportado para o Unreal, pode haver uma combinação de problemas de apresentação, como materiais deslocados, texturas distorcidas e a física da peça pode ficar incorreta. Embora estas tarefas estejam fora do

âmbito do FabricX, este processo permite a transferência de um modelo 3D para a Unreal Engine numa forma mais real e pura, pronto para ser manipulado em tempo real.

Esta verificação intermédia do modelo, muitas vezes necessária, pode até ser considerada uma etapa obrigatória no fluxo do trabalho para no final garantirmos que não existe qualquer tipo de erro. Se conseguirmos assegurar que a peça está devidamente preparada antes da sua integração no FabricX, conseguimos reduzir erros técnicos que podem vir a acontecer e assim melhoramos a continuidade da peça criada no CLO3D.

A primeira fase é uma base técnica crucial para o desenvolvimento da solução, porque a qualidade da exportação, a organização do mapa UV e a correta preparação da máscara influenciam diretamente a forma como a peça poderá ser personalizada e visualizada no FabricX. Caso algum destes elementos falhe ou não esteja bem preparado a aplicação de padrões, texturas ou materiais terá erros de posicionamento, distorções na superfície da peça ou incoerências visuais que comprometem a fidelidade da representação.

Para concluir esta fase deve ser vista como uma etapa de ligação entre a prototipagem digital da peça e a sua integração no FabricX, garantindo que o modelo chega ao Unreal Engine com uma estrutura adequada para suportar a personalização visual, a aplicação diferenciada de padrões e a futura associação a dados técnicos provenientes dos certificados digitais de tecidos.

4.3 Fase 2: Integração no Unreal Engine

Depois da preparação da peça na fase anterior, a segunda fase é a sua integração no Unreal Engine, onde é desenvolvido o FabricX. Nesta etapa, o modelo que é exportado do CLO3D é importado para o motor de jogo, sendo depois configurado ao nível visual e preparado para suportar interação em tempo real.

O Unreal Engine é o principal interveniente da aplicação, porque é responsável pela visualização tridimensional da peça, pela gestão dos materiais, pela aplicação dos padrões, pelas propriedades físicas do material e pela lógica de interação com o utilizador. Quando a peça chega ao FabricX, a peça deixa de ser apenas um modelo tridimensional estático e passa a fazer parte de um sistema interativo, no qual diferentes elementos visuais podem ser alterados, combinados e observados de forma imediata no ambiente virtual.

4.3.1 Fluxo de Utilização do FabricX

Foi criado um fluxo de utilização com o objetivo de clarificar as ações que um utilizador consegue realizar dentro do FabricX. Com a criação deste fluxo é possível compreender o percurso desde a entrada na aplicação até à visualização e personalização da peça digital, evidenciando a forma como os diferentes componentes do sistema se articulam durante a experiência de utilização.

Como ilustrado na Figura 4.4, o processo inicia-se com a abertura do FabricX. O utilizador seleciona o modo de ligação à sessão. Caso o utilizador escolha o papel de *host*, é criada uma sala e iniciado o servidor responsável pela sessão. Caso o utilizador queira entrar numa sessão já

existente, ele assume o papel de cliente e introduz o endereço IP da sala do *host*. Esta distinção permite suportar uma arquitetura multiutilizador, na qual diferentes participantes podem aceder ao mesmo ambiente virtual e partilhar a experiência de visualização e análise.

Após o utilizador entrar na sala, ele pode através de um avatar andar pelo espaço, ver as peças de roupa disponíveis, e seleccionar cada uma delas para vestir o avatar. As peças de roupas disponíveis são as peças anteriormente importadas e configuradas para o FabricX. A partir do momento que a peça está disponível no ambiente ela deixa de ser apenas recurso tridimensional e passa a ser um elemento interativo, disponível para exploração, personalização e análise.

Depois de vestir a peça o utilizador pode começar a personalizar a peça. Para o utilizador conseguir fazer essa personalização são disponibilizadas diferentes opções, como a alteração de um material, a edição de um material existente, a criação de um novo material ou a importação do material associada a um certificado digital de tecido. Esta é uma fase importante no fluxo porque permite relacionar a peça digital com diferentes padrões, cores, texturas e propriedades visuais, possibilitando a avaliação de múltiplas configurações sem alterar a geometria original do modelo.

Após o utilizador seleccionar, editar ou criar um novo material, este é aplicado directamente sobre a peça, sendo o resultado apresentado no ambiente virtual em tempo real, o utilizador consegue observar de imediato o impacto das alterações realizadas, tornando o processo de experimentação mais rápido, visual e iterativo. Esta resposta em tempo real é importante e obrigatória porque assim o utilizador não tem de "adivinhar" ou esperar para ver o resultado das suas operações, na qual diferentes hipóteses podem ser testadas e comparadas no mesmo espaço de trabalho.

No fluxo existem diferentes modos de visualização, inicialmente a peça pode ser observada num ambiente tridimensional, permitindo ao utilizador analisar proporções, padrões, texturas e combinação de materiais no espaço virtual, além disso a futura integração da Realidade Virtual vai proporcionar uma experiência ainda mais próxima da escala e imersiva. Reforçando o potencial do FabricX enquanto plataforma de análise visual e técnica de peças digitais.

Depois das funcionalidades descritas em cima é possível fazer a ativação da simulação física da peça. Quando esta funcionalidade é ativada é possível observar o comportamento do vestuário sobre o avatar, analisar o seu caimento e ajustar parâmetros relacionados com a simulação, permitindo assim aproximar a representação digital da peça do seu comportamento esperado em contexto real, contribuindo para uma análise mais completa do material e da sua aplicação.

Para finalizar, o *user flow* do FabricX é uma organização funcional da aplicação e demonstra todos os processos que o utilizador consegue realizar desde a abertura do sistema até à visualização final do produto. Como já referido anteriormente o FabricX não se limita só à visualização de uma peça digital, integra também uma ligação multiutilizador, seleção de vestuário, personalização visual, aplicação de materiais, visualização tridimensional e preparação para simulação física e Realidade Virtual.

4.3.2 Implementação da Interface e Funcionalidades Base

Depois de ser feita a importação e organização da peça no Unreal Engine, começou-se a desenvolver a interface principal do FabricX e suas funcionalidades base de interação com a peça. Esta

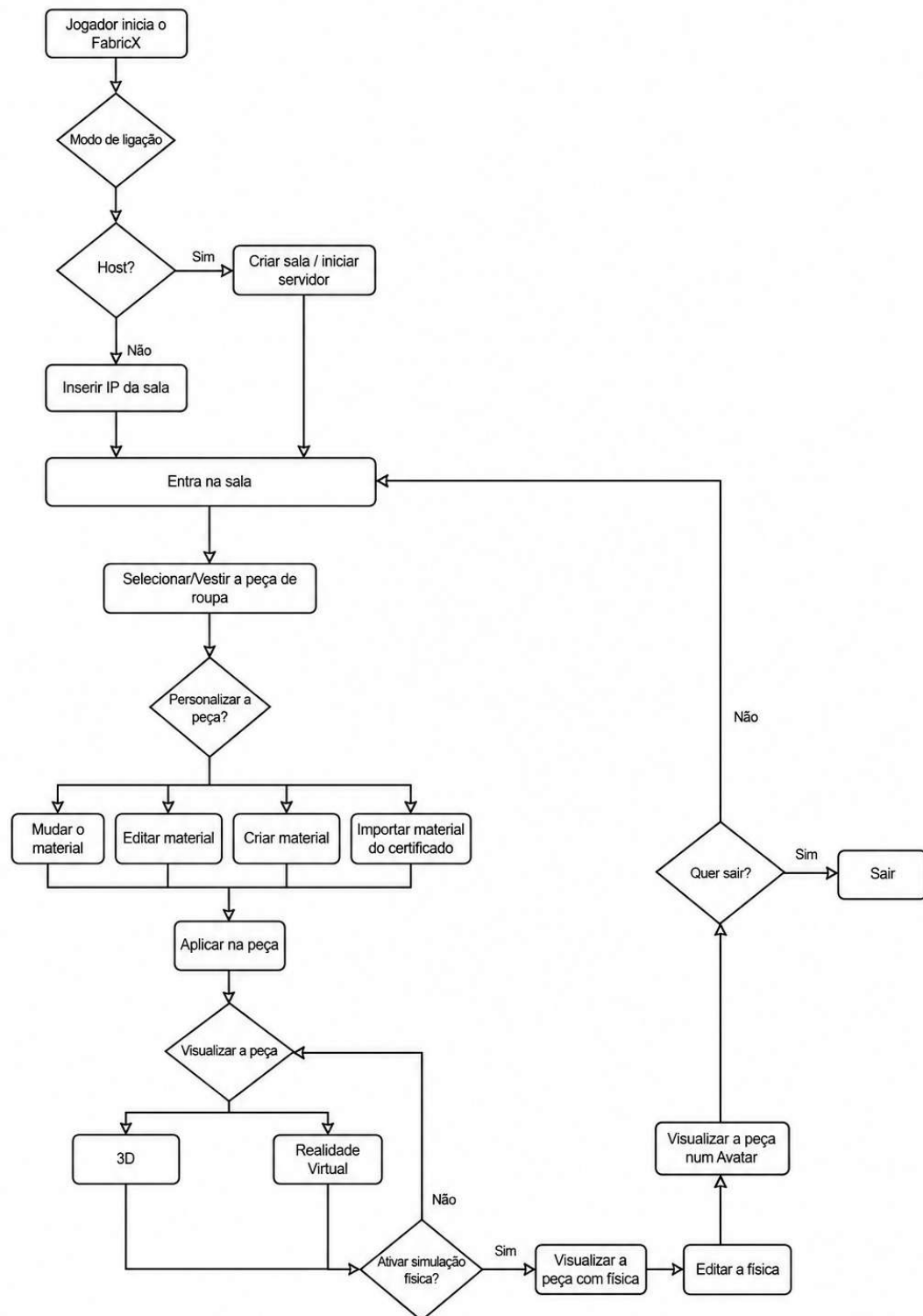


Figura 4.4: Fluxo de utilização do FabricX, desde a entrada na aplicação até à personalização, visualização e análise da peça digital.

etapa do trabalho desenvolvido é a etapa principal pois tem o objetivo de transformar o modelo importado num elemento que dentro da aplicação, seja permitido ao utilizador visualizar a peça, vesti-la, personalizar e aplicar diferentes materiais ou padrões de forma dinâmica.

A interface foi criada de modo a tornar o processo de personalização mais simples, direto e acessível, evitando que o utilizador tenha que sair da aplicação para qualquer outro tipo de software para alterar materiais ou modificar propriedades visuais da peça. As operações principais do FabricX são a escolha da peça, a seleção do material, a sua personalização e a visualização do resultado final, estas funcionalidades são realizadas através de menus próprios integrados no ambiente FabricX.

Para além destas funcionalidades de personalização visual, a interface foi criada e pensada para suportar diferentes modos de visualização, permitindo assim visualizar a peça tanto de forma isolada como aplicada sobre um avatar. Esta dupla possibilidade foi pensada de forma a tornar a análise ao material mais completa, uma vez que a visualização no avatar aproxima a peça de um contexto de utilização mais realista, enquanto a visualização isolada facilita a observação detalhada da superfície, dos padrões, das cores e dos materiais aplicados.

Depois de ser feita esta funcionalidade foi criada e integrada uma componente inicial de simulação física, no qual o utilizador pode ativar ou desativar a física da peça durante a execução da aplicação, permitindo assim ao utilizador observar alterações no comportamento do vestuário, nomeadamente ao nível do caimento, da deformação da malha e da resposta da peça à simulação.

Para enriquecer mais esta componente, foi implementado um conjunto de controlos associados às propriedades físicas da peça, estes controlos permitem ajustar parâmetros como peso, rigidez, elasticidade, fricção e amortecimento, dando ao utilizador a possibilidade de intervir em tempo real e analisar o comportamento físico do vestuário. Sendo possível testar diferentes configurações e observar, em tempo real, de que forma essas alterações influenciam a representação e o comportamento da peça.

Realizadas estas funcionalidades foram incluídas opções de visualização que permitem ao utilizador alternar entre diferentes perspetivas, e controlar determinadas condições de iluminação do ambiente. Esta funcionalidade foi pensada uma vez que os materiais podem variar de forma significativa consoante a incidência e a intensidade da luz, por essa razão a análise da peça em diferentes condições visuais permite avaliar com maior rigor a aparência dos padrões, das texturas e dos materiais aplicados.

Importa referir que esta etapa se centra principalmente nas funcionalidades desenvolvidas dentro do Unreal Engine, sobretudo ao nível da visualização, personalização e simulação inicial da peça. As componentes relacionadas com a colaboração multiutilizador, a sincronização entre participantes e a integração completa com sistemas externos são abordadas nas fases seguintes.

4.3.2.1 Interface e Seleção da Peça

A primeira interface do FabricX é o Menu Inicial, onde o utilizador escolhe o modo de ligação, essa interface só será analisada na secção seguinte por ser de uma funcionalidade desenvolvida posteriormente. Dito isto a primeira interface funcional desenvolvida no FabricX é a área de seleção das peças importadas. Após entrar no ambiente virtual, o utilizador é colocado num espaço de exposição onde são apresentadas as peças de vestuário previamente importadas, organizadas e preparadas para utilização na aplicação.

Como ilustrado na Figura 4.5, as peças estão colocadas no ambiente, permitindo que o utilizador observe os modelos disponíveis antes de seleccionar aquele que pretende analisar ou personalizar. A escolha de um ambiente deste género foi escolhido para tornar o processo de escolha mais intuitivo e visual, evitando que a seleção da peça dependesse apenas de uma lista ou de menus. Assim o utilizador consegue identificar de imediato os modelos que estão disponíveis e compreender o tipo de vestuário associado a cada opção.



Figura 4.5: Área de seleção das peças importadas no ambiente FabricX.

Após a seleção, a peça passa a ser tratada como o principal objeto de interação da aplicação, sendo posteriormente encaminhada para os menus de personalização, visualização e análise. Assim este momento marca a transição entre o modelo enquanto recurso técnico importado e a peça enquanto elemento ativo no fluxo de utilização do sistema.

Nesta interface além da seleção da peça, é também disponibilizada ao utilizador a possibilidade de alterar o avatar presente no ambiente virtual. Esta funcionalidade permite adaptar a visualização da peça a diferentes modelos ou personagens, tornando a análise mais flexível e representativa de distintos contextos de utilização, como ilustrado na Figura 4.6. Quando novas peças são criados ou importadas, elas ficam disponibilizados na mesma área de seleção, mantendo uma lógica de

utilização clara para o utilizador. É uma característica importante uma vez que a plataforma não se limita a uma única peça de vestuário, mas sim suportar diferentes modelos.

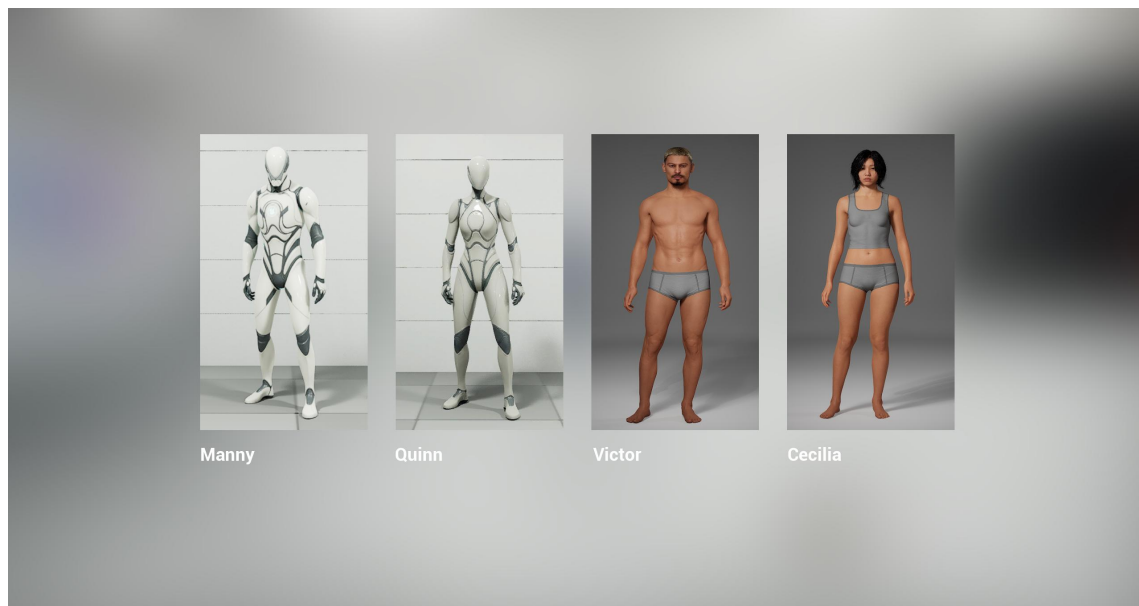


Figura 4.6: Interface de seleção e alteração do avatar utilizado para visualização da peça no ambiente FabricX.

A representação dos avatares foi realizada com recurso ao MetaHuman que é uma tecnologia da Epic Games integrada diretamente no Unreal Engine [70]. Os MetaHumans permitem obter avatares extremamente realistas, com expressões faciais detalhadas e movimentos naturais que aumentam a experiência visual do utilizador.

De um ponto de vista mais técnico, os MetaHumans disponibilizam personagens digitais com uma estrutura modular, composta por uma malha corporal, componentes faciais, materiais parametrizados, cabelo, rigging e esqueleto compatível com o sistema de animação do Unreal Engine como ilustrado na Figura 4.7.

Como Fang et al. [28] cita ao longo do artigo o MetaHuman Creator é uma ferramenta capaz de criar humanos digitais fotorrealistas, totalmente preparados para animação e integração em ambientes virtuais. Foi necessário explorar o MetaHuman porque uma vez que permite utilizar avatares com elevada qualidade visual sem necessidade de desenvolver do 0 modelos humanos completos, rigging ou materiais complexos, melhorando assim a qualidade da experiência visual e permitindo ao utilizador concentrar-se na representação, personalização e análise da peça de vestuário.



Figura 4.7: Interface do MetaHuman Creator, evidenciando o nível de detalhe visual de um dos avatares digitais criados para a visualização de peças no FabricX.

4.3.2.2 Menu de Personalização de Materiais

Seleção do Material Base

Depois do utilizador vestir a peça que deseja editar, pode entrar no menu de personalização de materiais. Esta interface é uma das mais importantes do FabricX, uma vez que é onde o utilizador permite associar materiais, tecidos e padrões à peça. Como ilustrado na Figura 4.8, o utilizador do lado esquerdo consegue visualizar em 2D a peça escolhida e do lado direito tem acesso às opções de configuração.

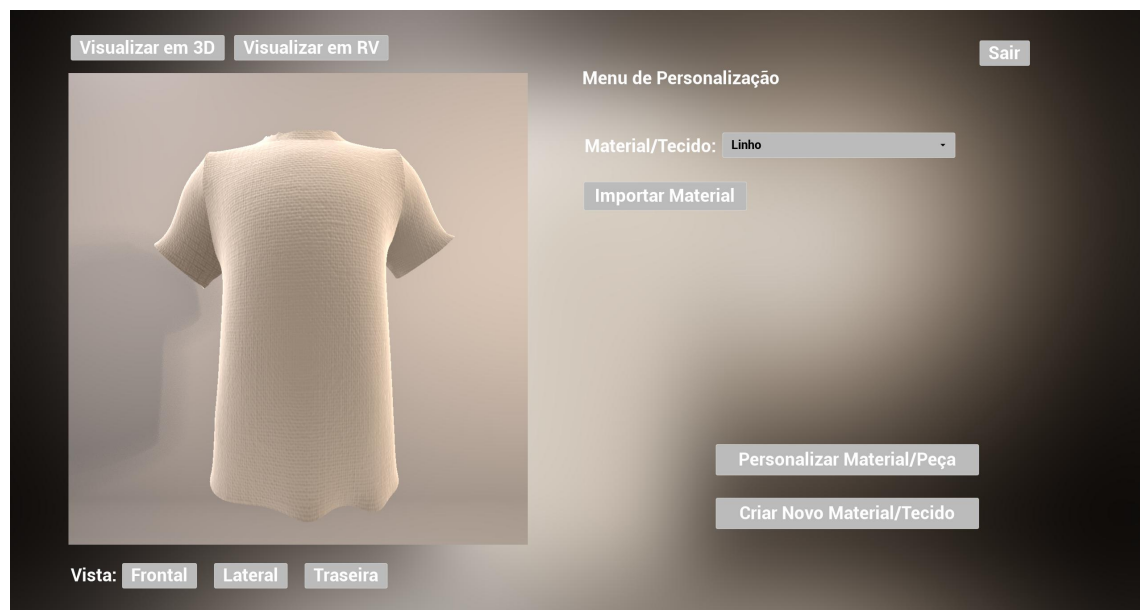


Figura 4.8: Menu de personalização no ambiente do FabricX.

O utilizador tem várias funcionalidades no menu inicial, inicialmente pode seleccionar um material ou tecido, que foi criado anteriormente através de uma lista apresentada na interface, ao seleccionar um material faz logo a actualização na peça, a interface também permite a importação de um material através de um certificado digital que será analisado com mais rigor na secção seguinte.

O fluxo geral de funcionamento pode ser descrito da seguinte forma: o utilizador selecciona um material na interface, o evento correspondente é ativado no *Blueprint*, o sistema identifica o material escolhido, cria ou actualiza a instância dinâmica do material e aplica essa alteração à peça digital. Este processo permite que a personalização seja realizada de forma imediata e interativa.

Seleção do material → Evento no Widget Blueprint → Identificação do material escolhido → Actualização do material dinâmico → Pré-visualização da peça actualizada

A Figura 4.9 apresenta a lógica implementada no *Widget Blueprint* responsável pela seleção do material. O processo começa através do evento *On Selection Changed*, ativado quando o utilizador escolhe uma opção na lista de materiais. Em seguida, o sistema verifica se a seleção foi realizada diretamente pelo utilizador e identifica a peça atualmente seleccionada.

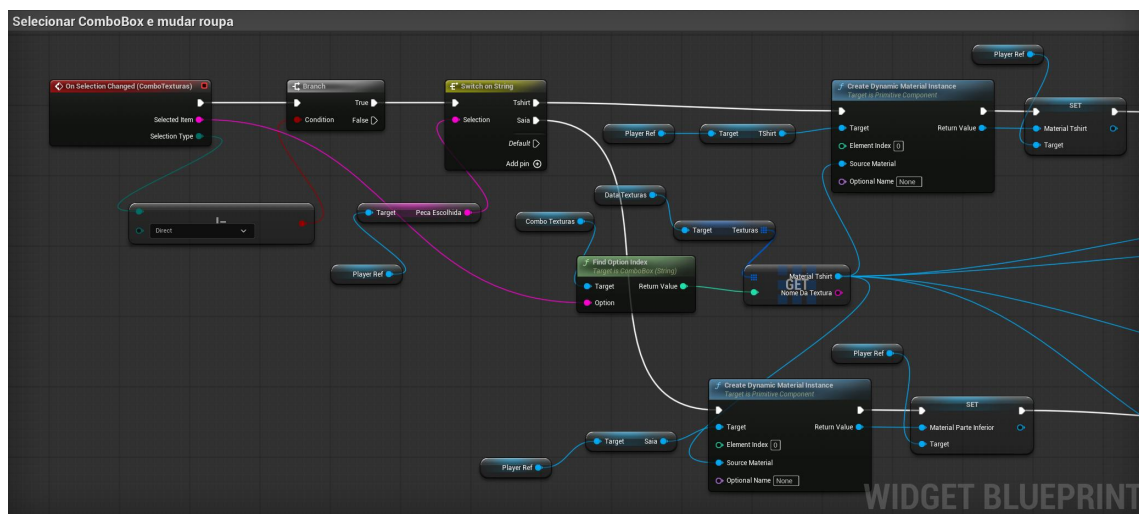


Figura 4.9: Lógica em *Blueprint* utilizada para selecionar um material através da interface e aplicá-lo à peça digital.

Depois desta verificação, é utilizado um *Switch on String* para distinguir a parte da peça que deve ser atualizada. Com base na opção escolhida, o *Blueprint* procura o material correspondente na lista de dados de texturas e cria uma instância dinâmica de material. Esta instância é depois guardada numa variável associada à peça, permitindo que o material seja alterado e reutilizado em tempo real durante a personalização.

Desta forma, a seleção de um material na interface não altera apenas um elemento visual do menu, mas desencadeia um conjunto de operações que ligam a interface ao modelo 3D, permitindo atualizar imediatamente o material aplicado à peça digital.

Outra funcionalidade é a opção de personalizar o material ou a peça, em baixo do lado direito, o utilizador pode personalizar o material onde é encaminhado para uma interface de edição mais detalhada e personalizada, onde pode alterar todo o tipo de parâmetros visuais.

A interface também inclui ainda a possibilidade de criar um novo material ou tecido, permitindo ao utilizador definir uma configuração própria em vez de utilizar apenas materiais previamente existentes.

No lado esquerdo da interface, a peça é apresentada numa área de pré-visualização em 2D, permitindo observar em tempo real o material atualmente aplicado, o utilizador consegue mudar a perspetivas da mesma clicando em baixo do lado esquerdo.

Por fim, o utilizador pode então passar para a visualização 3D ou em Realidade Virtual para analisar com melhor detalhe a peça.

Edição das Propriedades Visuais

Quando utilizador clica em personalizar material, redireciona-o para o menu de personalização como ilustrado na Figura 4.10, esta interface mais detalhada para a edição das propriedades visuais da peça, permite que o utilizador selecione a zona da peça que quer alterar, no exemplo ilustrado é uma T-shirt que está dividida em três partes, tronco, ombros e gola ou a totalidade da peça, sem necessidade de modificar a geometria original do modelo.

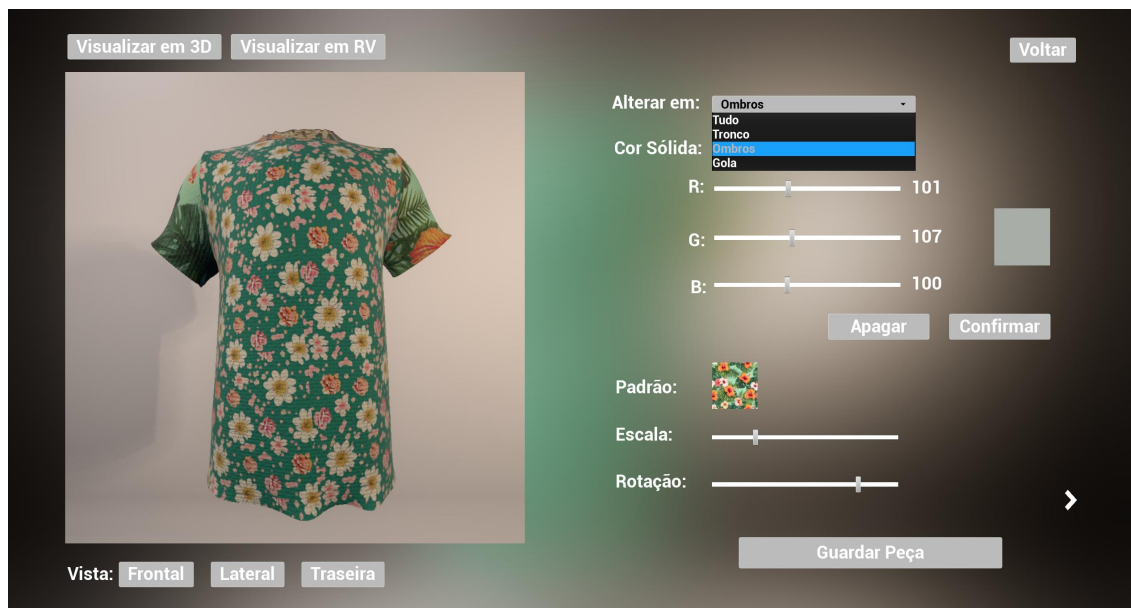


Figura 4.10: Interface de edição visual por regiões, permitindo alterar cor, padrão, escala e rotação na peça.

A divisão da peça feita por regiões, já comentada na secção 4.2, permite aplicar as alterações específicas a diferentes zonas da peça, em vez de o utilizador ter de modificar a peça toda de forma uniforme, o utilizador pode apenas personalizar uma determinada área, mantendo as outras como estão

Nesta primeira parte da interface, o utilizador consegue alterar a cor sólida da região selecionada através dos valores RGB. Esta opção permite ajustar a cor base do material. Sempre que o utilizador altera um dos sliders, o valor correspondente é atualizado na interface e utilizado para gerar uma nova cor, que é depois aplicada ao material dinâmico da região selecionada.

A Figura 4.11 apresenta a lógica implementada para a alteração da cor da peça. O processo inicia-se quando o utilizador modifica um dos sliders RGB, ativando o evento *On Value Changed*. Cada slider atualiza uma variável correspondente ao valor de vermelho, verde ou azul.

De seguida, os valores RGB são convertidos para uma cor linear através do nó *Make Linear Color*. Como os sliders utilizam valores entre 0 e 255, estes valores são divididos por 255 antes de serem aplicados ao material, permitindo obter uma cor compatível com o sistema de materiais do Unreal Engine.

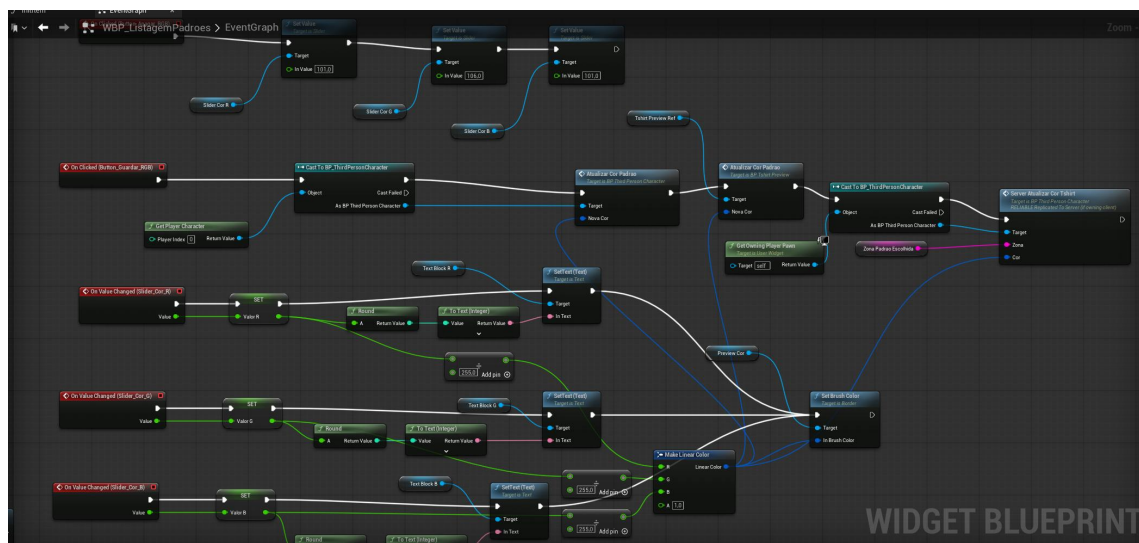


Figura 4.11: Lógica em *Blueprint* utilizada para alterar a cor da região selecionada através de valores RGB.

Após a criação da nova cor, o *Blueprint* atualiza a pré-visualização da cor na interface e aplica essa cor à região selecionada da peça. Esta região é identificada através da variável associada à zona escolhida pelo utilizador, permitindo que a alteração seja feita apenas no tronco, ombros, gola ou na totalidade da T-shirt.

Para além da cor, a interface permite aplicar padrões na peça. Estes padrões, são os padrões e texturas que estão ilustrados na Figura 4.21 e correspondem a texturas geradas externamente através de técnicas de Inteligência Artificial, no âmbito de outro trabalho desenvolvido no projeto [41], sendo depois importados para o FabricX e disponibilizados como opções de personalização. Os padrões selecionados podem ser ajustados através de parâmetros como a escala e a rotação.

Nesta segunda interface, ainda no menu de personalização representada na Figura 4.12, são disponibilizados mais controlos para ajustar as propriedades visuais do material, nomeadamente brilho, opacidade, intensidade, saturação e contraste. Estes parâmetros foram implementados de forma a estender mais a possibilidade de personalização da peça.

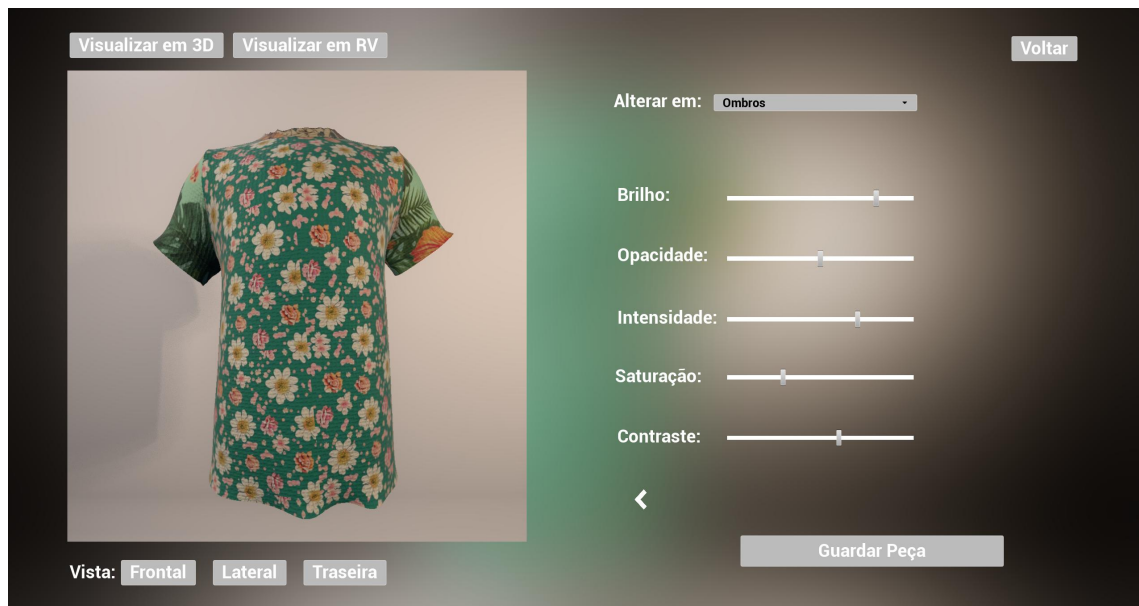


Figura 4.12: Interface de ajuste das propriedades visuais do material, incluindo brilho, opacidade, intensidade, saturação e contraste.

Ao controlar o brilho permite ao utilizador manipular a forma como o material reage à iluminação, dando a opção de criar uma superfície mais fosca ou mais brilhante. A opacidade permite ajustar a transparência do material, o que pode ser útil ao trabalhar com tecidos mais leves ou ao simular diferentes níveis de luz que atravessem a peça. A intensidade, a saturação e o contraste permitem alterar a força visual do padrão ou cor aplicada, conseguindo tornar a peça mais discreta ou mais vibrante.

Estrutura visual do menu de personalização no *Widget Blueprint* do Unreal Engine.

Para além da interface final apresentada ao utilizador, importa também descrever a forma como este menu foi construído no Unreal Engine. A interface foi desenvolvida através de um *Widget Blueprint*, onde foram organizados os diferentes elementos visuais, como botões, listas de seleção, painéis, área de pré-visualização e opções de navegação.

A Figura 4.13 apresenta a estrutura do menu de personalização no editor de interfaces do Unreal Engine. Do lado esquerdo em baixo, tem a hierarquia de todos os elementos que constituem o menu, incluindo painéis, botões, listas de seleção e áreas de pré-visualização. Na zona central está a disposição visual da interface, onde é possível posicionar todos os elementos colocados na hierarquia.

Os *Widget Blueprints* permitem separar a componente visual da lógica funcional. Os elementos gráficos são inicialmente criados no modo *Designer*, enquanto as ações associadas a cada elemento da hierarquia são posteriormente implementadas no modo *Graph*, recorrendo a eventos como por exemplo o *OnClicked*, *OnSelectionChanged* e *OnValueChanged*.

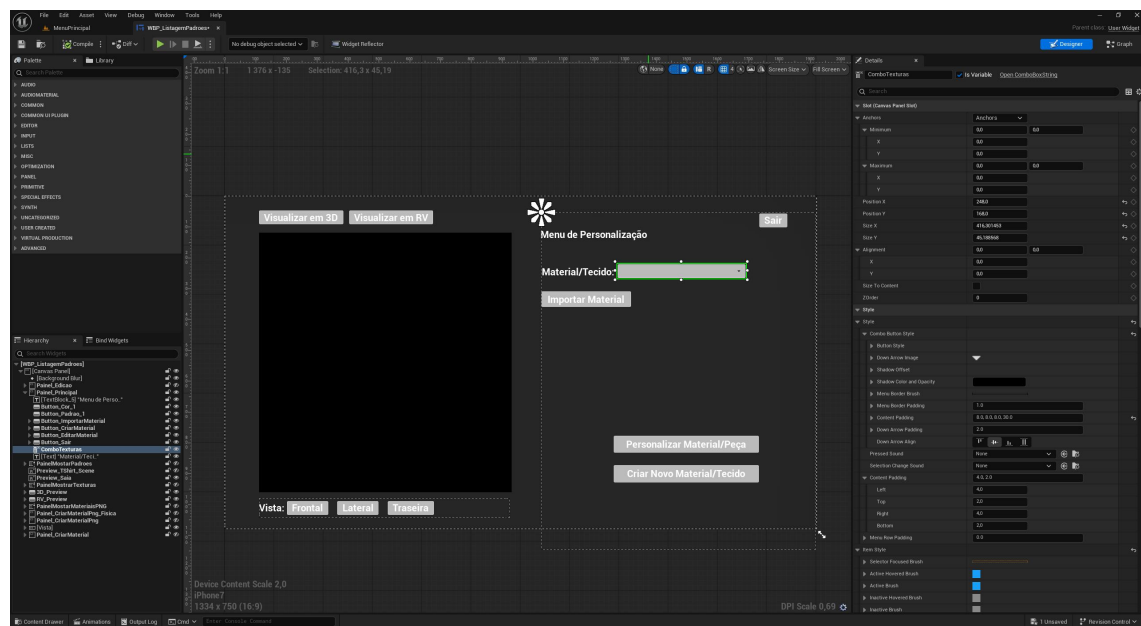


Figura 4.13: Construção do menu de personalização no *Widget Blueprint* do Unreal Engine.

Depois de feita a construção visual do menu, é necessário associar cada elemento da interface a uma lógica de funcionamento. Por exemplo, a lista de materiais foi ligada a um evento de seleção, permitindo aplicar automaticamente o material escolhido à peça digital. Da mesma forma, os botões de personalização encaminham o utilizador para interfaces mais detalhadas, onde é possível alterar propriedades visuais e físicas do tecido.

4.3.2.3 Pré-visualização da Peça

Depois de o utilizador personalizar a peça, pode visualizá-la de modo isolada no modo 3D, como apresentado na Figura 4.14. Esta opção permite ao utilizador uma análise mais detalhada da peça, dos padrões aplicados permitindo assim identificar possíveis distorções, desalinhamentos ou problemas na aplicação do padrão. Pode também rodar a peça para todas as direções, de forma a conseguir observá-la de todos os ângulos.

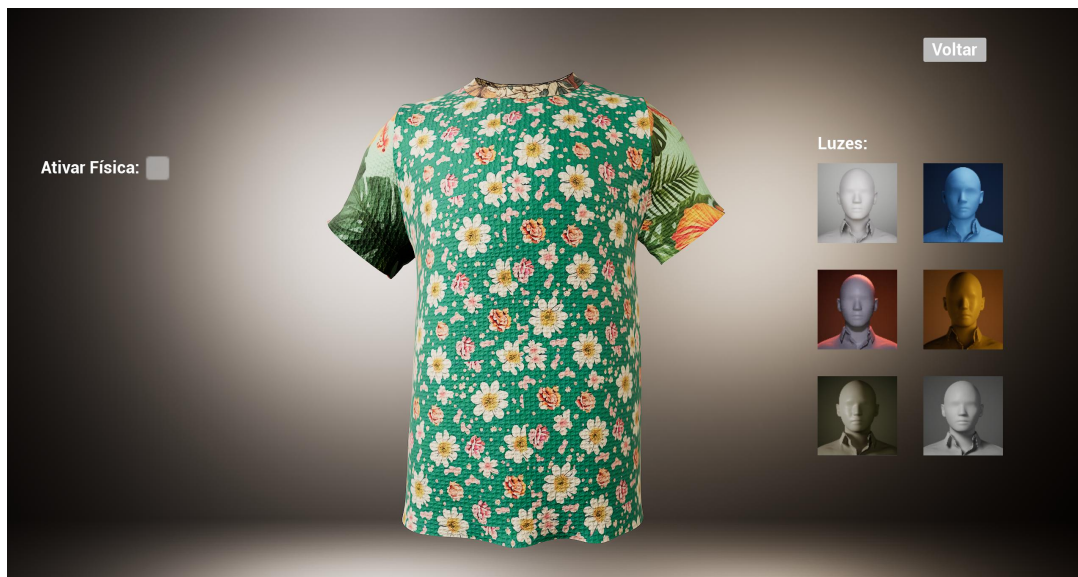


Figura 4.14: Pré-visualização da peça de forma isolada, permitindo a análise detalhada dos padrões e materiais aplicados.

A interface permite ainda selecionar diferentes configurações de iluminação. Esta funcionalidade é importante porque materiais com brilho, relevo, rugosidade ou padrões mais complexos podem apresentar comportamentos visuais diferentes consoante a direção, intensidade e tonalidade da luz. Assim, o utilizador consegue avaliar a aparência da peça em diferentes condições de iluminação antes de avançar para a visualização no ambiente 3D principal ou em Realidade Virtual.

Esta pré-visualização possibilita ao utilizador ver a peça com ou sem comportamento físico, quando o utilizador ativa a checkbox da física, consegue observar o comportamento da mesma de forma realista como ilustrado na Figura 4.15, deixa de ver a peça numa visualização estática tornando a análise mais dinâmica e real.

Ao ativar a física possibilita ao utilizador editar as propriedades físicas da peça, como peso, rigidez, elasticidade, fricção e amortecimento. Estes parâmetros permitem ajustar o comportamento da peça em tempo real e observar com as diferentes configurações influenciam a forma como a peça reage.

Como ilustrado na Figura 4.16 foi criado um estúdio virtual no Unreal Engine , desenvolvido para permitir ao utilizador analisar a peça de forma isolada e com maior controlo visual. Para isso acontecer, foi criado um zona de apresentação, como um estúdio de fotografia, no qual a peça está centrada e com diferentes fontes de luz com configuração de iluminação do tipo *three-point lighting* [44] a incidir na peça, de forma a que destaque melhor o relevo do material e os padrões aplicados.

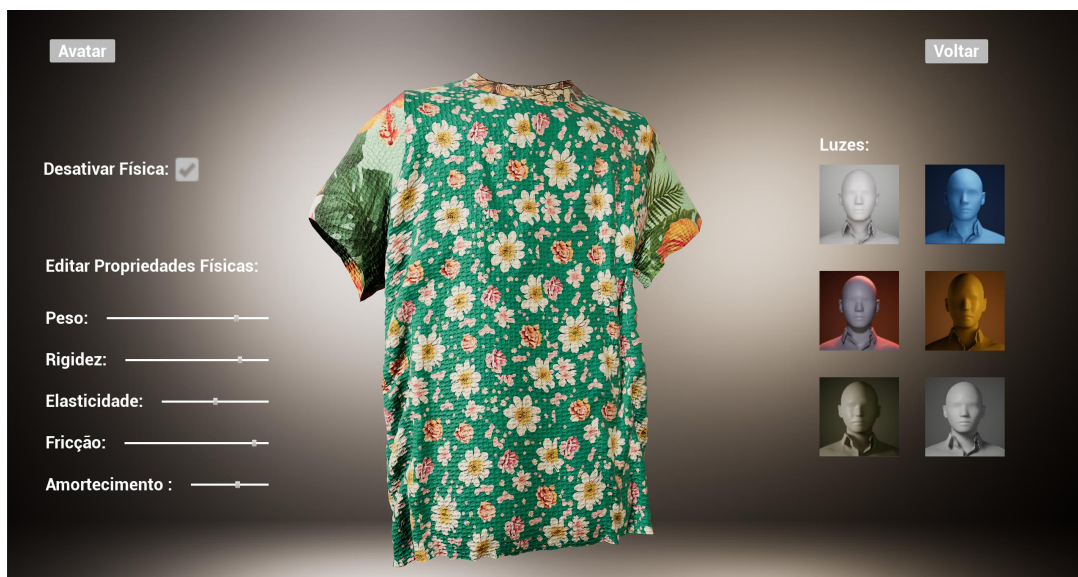


Figura 4.15: Pré-visualização da peça com simulação física ativa e acesso à edição de propriedades físicas.



Figura 4.16: Estúdio virtual criado no Unreal Engine para a pré-visualização isolada da peça.

Para além desta funcionalidade, o utilizador pode visualizar a peça aplicada num avatar clicando no botão do canto superior esquerdo. Esta opção permite analisar a peça num contexto mais próximo da realidade como ilustrado na Figura 4.17, foi implementada esta funcionalidade para o utilizador conseguir avaliar aspetos como o posicionamento da peça, a sua escala, a relação com o corpo e a aparência geral quando a peça é associada a um corpo.

Nesta interface, foram implementadas várias animações para alterar a animação do avatar,

neste caso é Correr, Andar, Saltar e Idle que representa quando o avatar está parado. A possibilidade do utilizador conseguir seleccionar diferentes animações foi criada para permitir que seja possível observar a peça em situações mais dinâmicas, aproximando a análise de um contexto de utilização em movimento. No exemplo apresentado, a peça é visualizada sobre o avatar durante uma animação de corrida, o que permite verificar a aparência da peça quando associada a uma pose ou movimento específico.

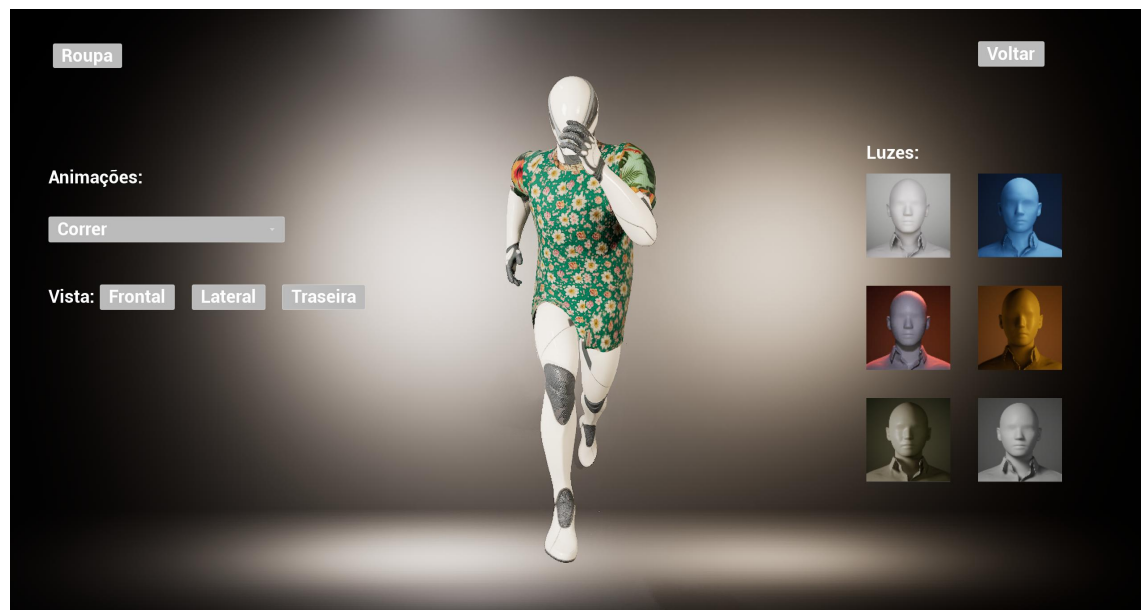


Figura 4.17: Pré-visualização da T-shirt aplicada num avatar digital no ambiente FabricX.

4.4 Fase 3: Integração com Sistemas Externos

A terceira fase do desenvolvimento é a integração de aplicações externas desenvolvidas no âmbito do projeto. Esta secção é dividida em duas subsecções, a primeira é a ligação com o sistema de certificados digitais de tecidos, que é uma plataforma que faz a gestão de amostras têxteis com Pipeline de Validação de Digital Twin, no qual o utilizador consegue associar dados técnicos e mapas visuais de um tecido à peça digital no FabricX. A segunda fase é a utilização de padrões ou texturas gerados por Inteligência Artificial, permitindo que conteúdos visuais criados externamente sejam aplicados às peças digitais.

4.4.1 Importação de Materiais a partir do Certificado Digital

De forma a exemplificar a estrutura de um certificado digital de tecido utilizado no FabricX, apresenta-se na Listagem 4.1 um exemplo simplificado com dados físicos e visuais de um material têxtil. Este exemplo reúne propriedades como massa, fricção, espessura, elasticidade e cisalhamento, bem como os mapas visuais utilizados para construir o material digital no FabricX.

Listing 4.1: Exemplo simplificado de estrutura JSON de um certificado digital de tecido.

```
{
  "material": "Algodao Jersey",
  "composition": "100% algodao",
  "fabricType": "Malha",

  "physicalProperties": {
    "mass": "160 g/m2",
    "friction": 0.50,
    "bend": {
      "warp": "45.00 dyn*cm",
      "weft": "25.50 dyn*cm"
    },
    "stretch": {
      "warp": "224.00 N/m",
      "weft": "112.00 N/m"
    },
    "shear": "34.36 N/m",
  },

  "visualMaps": {
    "baseColor": "basecolor.png",
    "normalMap": "normal.png",
    "roughness": "roughness.png",
    "metallic": "metallic.png",
    "displacement": "displacement.png",
    "alpha": "alpha.png"
  }
}
```

Como ilustrado na Figura 4.18, esta interface apresenta os mapas que constituem um material digital e o que está implementado num certificado que é a cor base (*base color*), o mapa de normais (*normal map*), a rugosidade (*roughness*), a metalicidade (*metallic*), o deslocamento ou profundidade (*displacement*) e a transparência (*alpha*). Estes elementos são os componentes principais na construção de materiais, juntando todos os elementos permite definir não apenas a cor do tecido mas também o seu relevo, textura superficial, comportamento perante a luz, profundidade visual e grau de transparência.

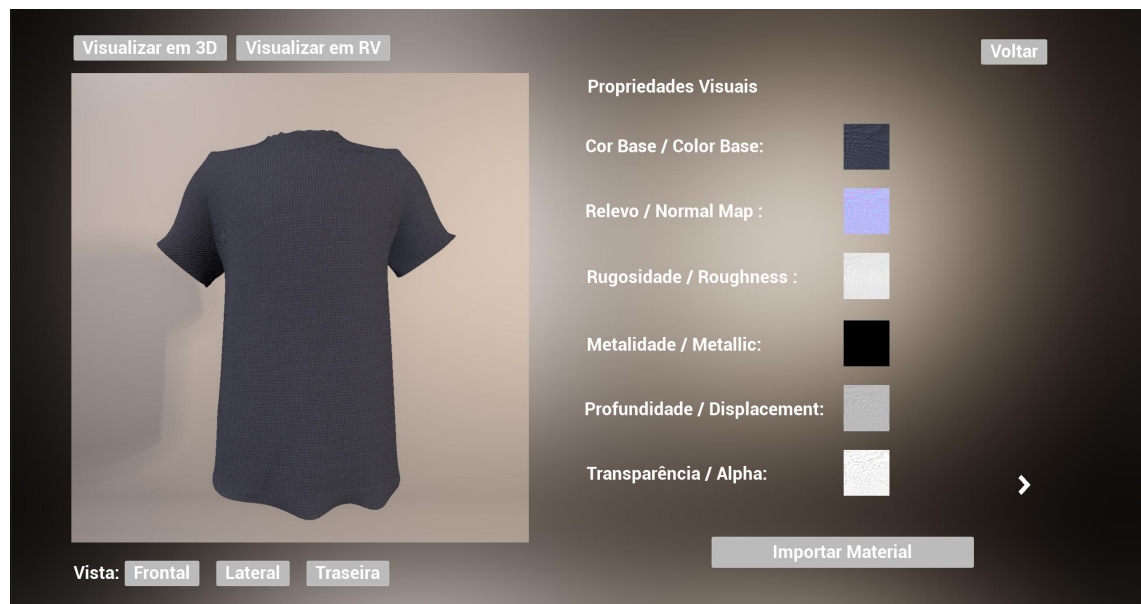


Figura 4.18: Interface de importação de material a partir dos mapas associados ao certificado digital do tecido.

- **Cor base (*base color*):** é o aspeto visual principal do material, é a textura ou a aparência principal do material.
- **Mapa de normais (*normal map*):** Permite à peça que ganhe relevos na superfície ou pequenas irregularidades sem alterar a geometria.
- **Rugosidade (*roughness*):** Influencia a forma como a luz interage com o material, permitindo assim superfícies mais refletoras ou mais mate
- **Metalicidade (*metallic*):** Define o grau de comportamento metálico do material. Embora seja menos comum em tecidos convencionais, pode ser útil para materiais técnicos, acabamentos especiais ou efeitos visuais específicos.
- **Deslocamento (*displacement*):** Permite representar variações de profundidade ou relevo na superfície do tecido, ajudando a ter uma perceção visual mais detalhada do material.
- **Transparência (*alpha*):** controla o grau de opacidade ou transparência do material, importante para representar tecidos mais leves, translúcidos ou com zonas recortadas.

A Figura 4.19 apresenta a lógica implementada para a importação e associação dos mapas do material vindos de um certificado digital. O processo começa por um evento criado e que fica responsável por receber a textura selecionada pelo utilizador. De seguida, o sistema identifica o tipo de mapa escolhido, como *base color*, *normal*, *roughness*, *metallic*, *displacement* ou *alpha*.

Para ocorrer esta identificação, é utilizado um *Switch*, o que permite encaminhar cada mapa para o parâmetro correto do material. Quando o utilizador importa uma textura correspondente à cor base, esta é aplicada ao parâmetro *Base Color* e assim o mesmo processo é repetido para os restantes mapas do certificado digital.

A aplicação dos mapas é realizada através do nó *Set Texture Parameter Value*, o que permite alterar dinamicamente os parâmetros de uma instância de material. Esta abordagem é utilizada de forma a evitar a criação manual de vários materiais diferentes, permitindo que o mesmo material base seja atualizado de forma flexível consoante os mapas importados pelo utilizador.

Além da aplicação ao material da peça, o *Blueprint* atualiza também as imagens de pré-visualização presentes na interface. Desta forma, o utilizador consegue confirmar visualmente quais os mapas que foram importados e associados ao material digital.

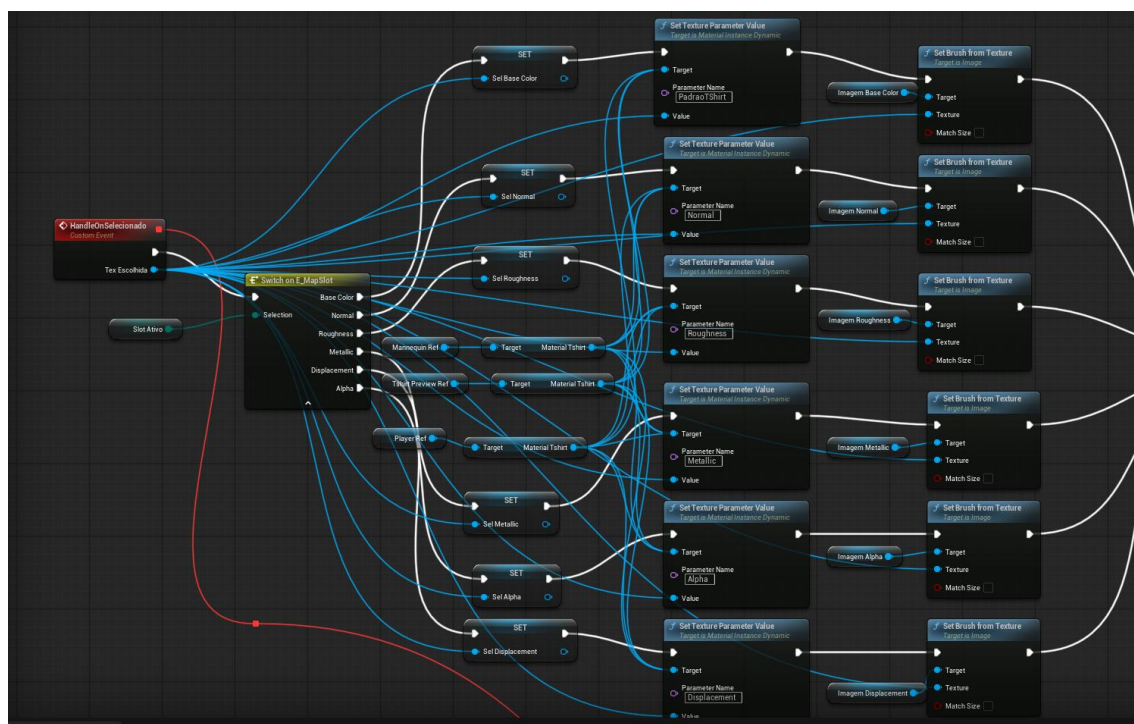


Figura 4.19: Lógica em *Blueprint* utilizada para associar os mapas do certificado digital aos parâmetros do material dinâmico.

Depois de importar os mapas que constituem a parte visual do material, o utilizador também pode importar os dados da física do material.

Como ilustrado na Figura 4.20, a interface apresenta um conjunto de sliders que permitem ao utilizador modificar os principais parâmetros físicos do tecido.

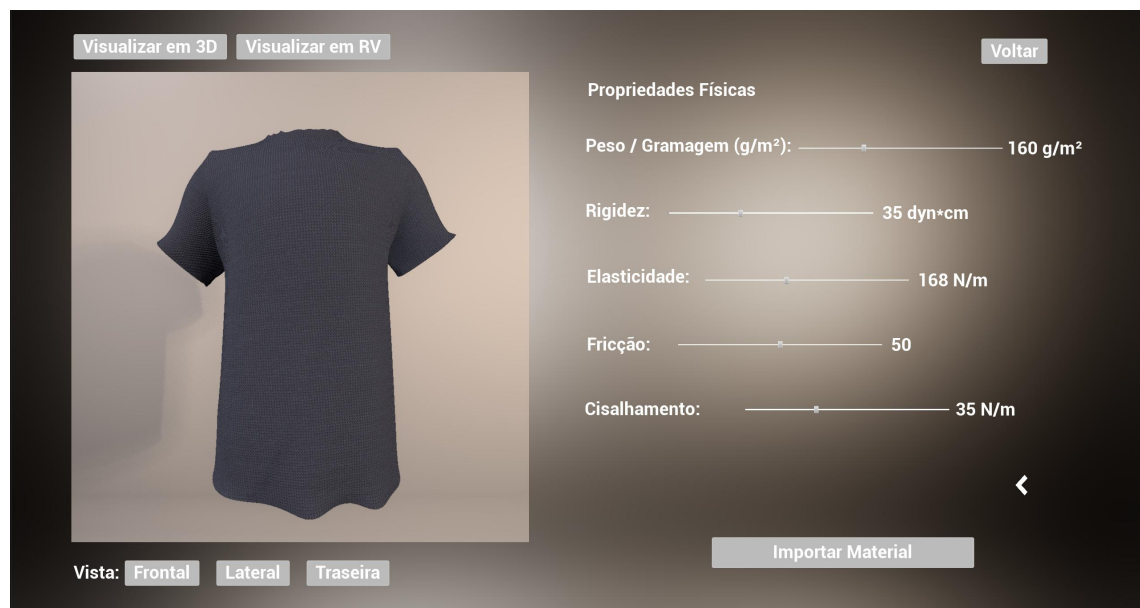


Figura 4.20: Interface de edição das propriedades físicas do tecido, incluindo gramagem, rigidez, elasticidade, fricção e cisalhamento.

Nesta interface, os valores definidos influenciam a forma como a peça se comporta durante a simulação.

- **Peso / Gramagem (g/m^2):** representa a massa do tecido por unidade de área. No FabricX, este valor permite simular tecidos mais leves ou mais pesados, influenciando a forma como a peça cai e reage ao movimento.
- **Rigidez:** define a resistência do tecido à deformação. Valores mais elevados fazem com que o tecido se comporte de forma mais firme, enquanto valores mais baixos permitem uma maior flexibilidade.
- **Elasticidade:** representa a capacidade do tecido se deformar e recuperar parcialmente a sua forma original.
- **Fricção:** controla a resistência ao deslizamento entre o tecido e outras superfícies, como o avatar ou outras partes da própria peça. Valores mais elevados tornam o contacto mais aderente.
- **Cisalhamento:** representa a resistência do tecido à deformação quando sujeito a forças em direções opostas. Este parâmetro influencia a forma como o tecido se deforma lateralmente durante a simulação.

Deste modo, o FabricX permite ao utilizador importar materiais a partir de um certificado digital e enquanto o utilizador está a colocar cada parâmetro consegue ver em tempo real o que cada parâmetro faz na peça, permitindo compreender de forma imediata o impacto de cada um na aparência final do tecido.

4.4.2 Integração de Padrões Gerados por Inteligência Artificial

Depois de adicionada a funcionalidade anterior, foi criada a ligação ao sistema que gera padrões e texturas através de Inteligência Artificial como ilustrado na Figura 4.21. Esta funcionalidade resulta de outro trabalho desenvolvido no âmbito do projeto, no qual são criadas soluções para a criação automática de padrões visuais [41].

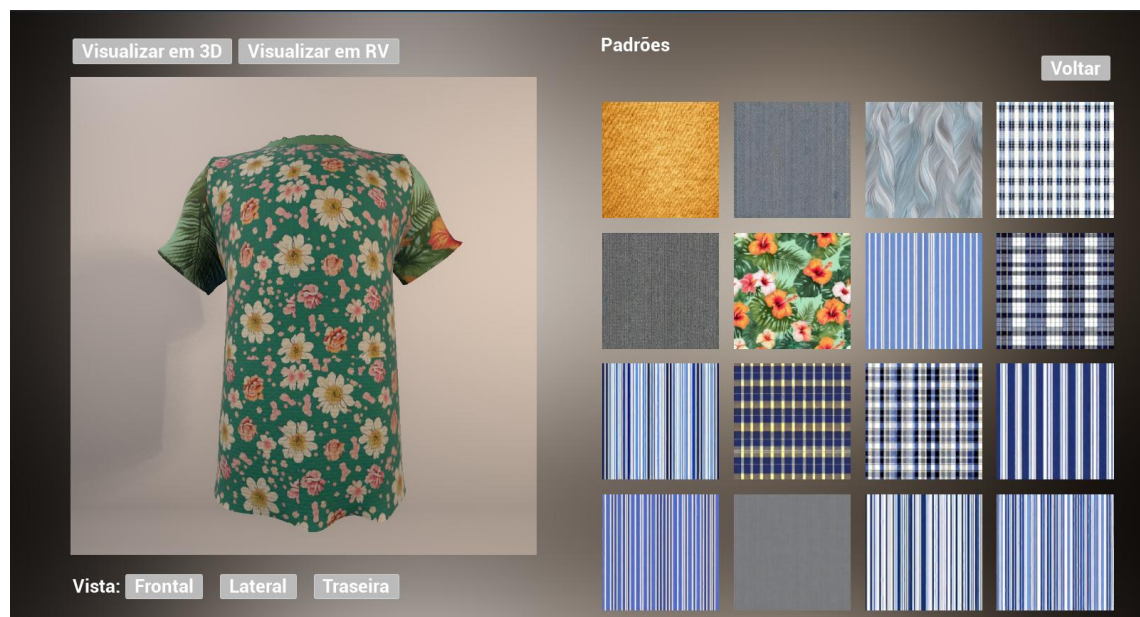


Figura 4.21: Interface de integração de padrões e texturas gerados por Inteligência Artificial para aplicar nas peças digitais do FabricX.

A integração dos padrões permitiu alargar as possibilidades que o utilizador tem para personalizar uma peça, deixando de estar limitado apenas a materiais ou texturas criadas de forma manual, assim é possível ter a todo o momento novas texturas criadas por IA, tornando o processo mais flexível. Através da ligação criada, o sistema envia um pedido à API, recebe a resposta em formato JSON e processa as imagens disponibilizadas em Base64, convertendo-as em texturas utilizáveis dentro do ambiente Unreal.

Depois de recebidos e convertidos, os padrões são adicionados automaticamente ao menu de personalização da peça. Cada padrão passa a ser tratado como uma textura aplicável ao material dinâmico da região selecionada, podendo ser aplicado nas diferentes partes da peça. Esta abordagem permite que o utilizador aceda a padrões atualizados diretamente dentro do FabricX, sem necessidade de importação manual de ficheiros.

De um ponto de vista mais técnico, cada padrão é como uma textura aplicada sobre a superfície da peça através das coordenadas UV do modelo, estas coordenadas estabelecem a correspondência entre a imagem bidimensional do padrão e a geometria tridimensional da peça. Assim o padrão é colocado corretamente sobre a malha, respeitando a organização da peça.

Depois de aplicado, o padrão é atualizado em tempo real na peça, permitindo ao utilizador observar imediatamente o resultado da alteração.

Apesar da geração e criação de padrões seja realizada fora da aplicação, o FabricX ajusta e valida esses padrões, reforçando a plataforma como uma ponte de ligação entre diversas ferramentas externas.

4.5 Fase 4: Colaboração Multiutilizador e Sincronização

A quarta e última fase do desenvolvimento do FabricX é a implementação da parte colaborativa. Depois de realizadas as outras fases anteriormente descritas foi necessário permitir que vários utilizadores pudessem aceder ao mesmo ambiente virtual e interagir com a peça de forma partilhada.

Uma vez que a análise de tecidos e a criação de peças digitais não é uma atividade ou um processo individual, é importante disponibilizar mecanismos que permitam a participação de diferentes utilizadores no mesmo ambiente. Designers, técnicos, responsáveis de produto e outros utilizadores podem ter necessidade de observar a mesma peça, discutir alterações, comparar materiais e validar decisões em conjunto. Assim, esta fase é uma das principais deste projeto.

Para criar esta funcionalidade, foi usada a lógica de ligação baseada nos papéis de *host* e cliente. O *host* é o utilizador responsável por criar a sessão e iniciar o ambiente partilhado, enquanto os restantes utilizadores se ligam como clientes através do endereço da sessão como ilustrado na Figura 4.22.

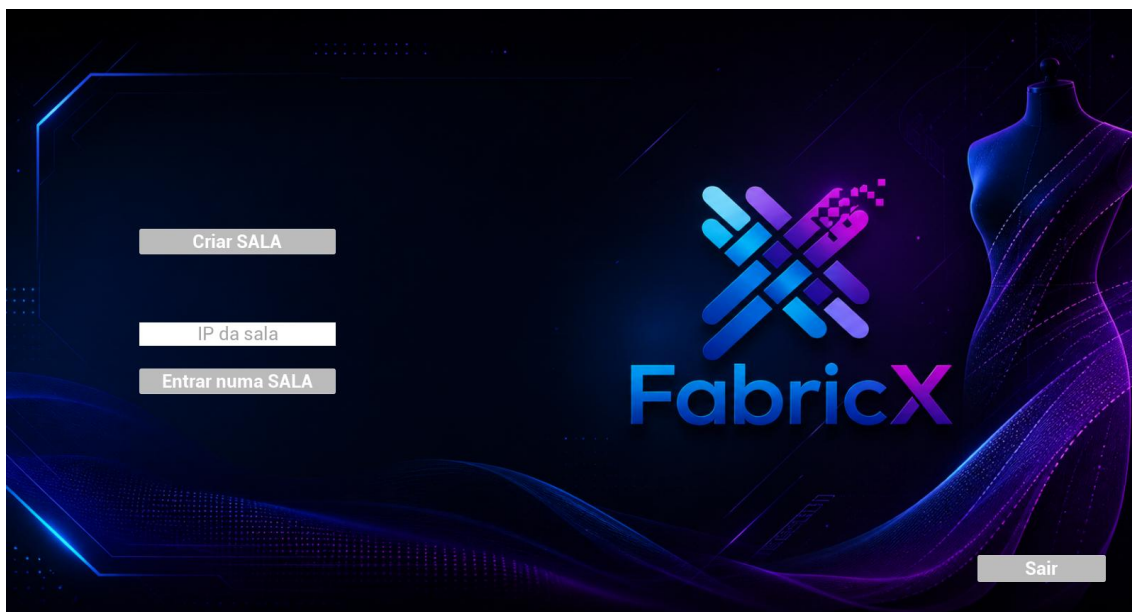


Figura 4.22: Interface inicial do FabricX para criação ou entrada numa sala colaborativa através do modo *host* ou cliente.

Esta organização é uma estrutura cliente-servidor, na qual o estado do ambiente é mantido consistentemente entre os diferentes participantes.

Esta fase também incorpora a sincronização das alterações realizadas sobre a peça, sempre que um utilizador modifica uma peça essas mudanças vão ser refletidas para os restantes participantes,

de forma a que todos os utilizadores observem a mesma versão da peça, evitando incoerências na análise e garantindo uma experiência colaborativa mais consistente.

Esta fase encontra-se organizada em três partes principais: o modo *host* e cliente, o sistema de comunicação entre utilizadores e a sincronização de alterações entre utilizadores. Em conjunto, estas componentes permitem transformar a aplicação de uma ferramenta individual de visualização e personalização numa plataforma colaborativa para análise e validação de vestuário digital.

4.5.1 Modo Host e Cliente

No caso do *host*, o utilizador inicia uma nova instância da sessão e fica responsável por disponibilizar o ambiente aos restantes participantes. O *host* funciona como a referência principal do estado da sessão, garante que os elementos do ambiente possam ser partilhados com os clientes ligados na sessão.

Já no modo cliente, o utilizador não cria uma nova sessão, pois ele conecta-se a uma sessão já criada através do endereço IP da sala. Quando a ligação é feita e realizada com sucesso, o cliente entra no mesmo ambiente do *host*, passando a visualizar os mesmos elementos dessa mesma sessão. Esta lógica permite que vários utilizadores estejam no mesmo espaço sem que cada um tenha uma versão independente da aplicação.

Esta organização é importante para evitar inconsistências, uma vez que as alterações importantes devem ser comunicadas a partir de uma referência comum.

Esta implementação foi realizada através do sistema de rede do Unreal Engine [71], uma instância da aplicação assume o papel de servidor da sessão, enquanto as restantes instâncias se ligam a esse ambiente como clientes.

Para implementar esta lógica, foi criado um *Widget Blueprint* que fica associado à interface inicial do FabricX, a figura 4.22. Nesta interface, os botões de entrada foram ligados a eventos específicos, permitindo ao utilizador escolher se pretende iniciar a aplicação como *host* ou entrar numa sessão já existente como cliente.

A Figura 4.23 apresenta a lógica implementada para o modo *host* e cliente. Quando o utilizador seleciona a opção para começar como *host*, o evento *OnClicked* associado ao botão executa a abertura do nível principal da aplicação. Neste caso, o nível é aberto com a opção *listen*, permitindo que essa instância funcione como servidor da sessão e aceite ligações de outros utilizadores.

No modo cliente, o processo é diferente. O utilizador introduz o endereço IP da sessão na interface e ao clicar no botão correspondente, o *Blueprint* obtém esse valor a partir do campo de texto. Esse endereço é depois utilizado para abrir a ligação à sessão existente, permitindo que o cliente entre no mesmo ambiente criado pelo *host*.

Depois da entrada no nível principal, o *Blueprint* altera o modo de entrada para *Game Only* e oculta o cursor do rato, permitindo que o utilizador passe a interagir diretamente com o ambiente 3D.

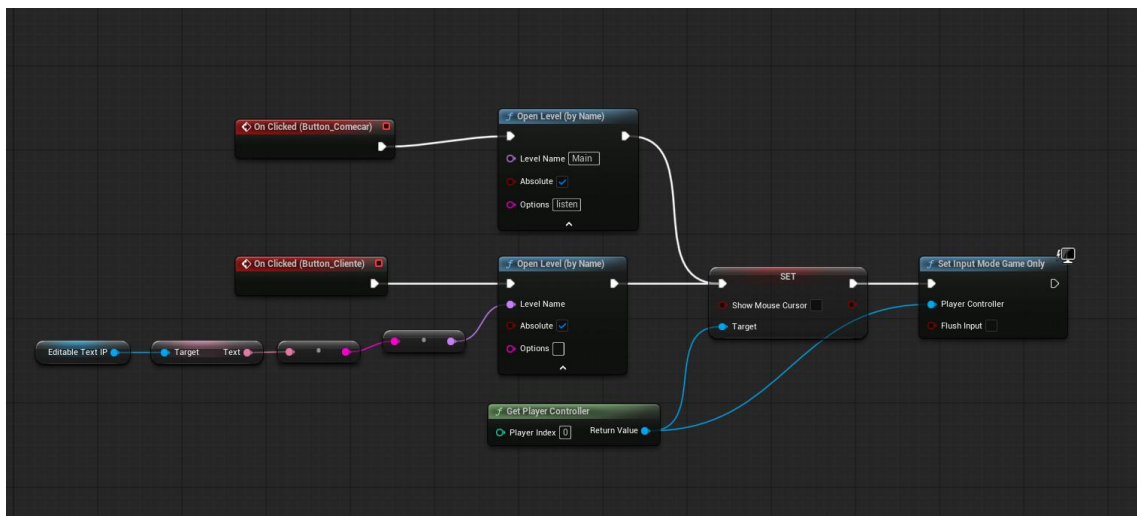


Figura 4.23: Lógica em *Blueprint* utilizada para iniciar uma sessão como *host* ou estabelecer ligação como cliente através de endereço IP.

4.5.2 Sistema de Comunicação entre Utilizadores

Também foi implementado um sistema para os utilizadores comunicarem entre si, com o objetivo de reforçar a colaboração. Como ilustrado na Figura 4.24, no canto inferior esquerdo inclui uma zona de chat, onde os utilizadores conseguem comunicar e do canto superior direito tem os controlos associados à comunicação por voz e os utilizadores que estão presentes na sala. O chat permite que os utilizadores escrevam mensagens durante a sessão, facilitando a troca de comentários, sugestões ou indicações



Figura 4.24: Interface colaborativa do FabricX, incluindo sistema de chat, controlo de microfone, lista de utilizadores e comandos de interação no ambiente virtual.

Caso o utilizador não pretenda escrever pode comunicar através de voz, permitindo uma interação ainda mais direta entre os utilizadores.

Como referenciado antes a interface apresenta uma lista de utilizadores presentes na sessão, permitindo aos utilizadores identificar rapidamente quem se encontra ligado ao ambiente partilhado. Deste modo, o sistema de comunicação implementado complementa a componente multiutilizador do FabricX. A colaboração não depende apenas da sincronização visual da peça, mas também da capacidade dos utilizadores comunicarem entre si durante a sessão.

A funcionalidade do chat foi desenvolvida através de *Widget Blueprints*, permitindo ligar a caixa de texto da interface ao sistema de comunicação entre utilizadores.

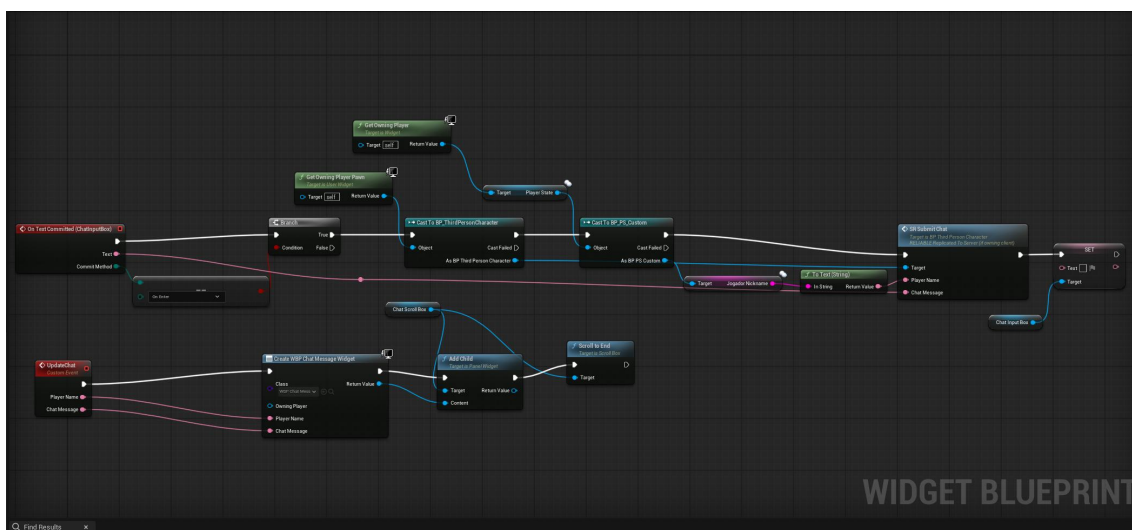


Figura 4.25: Lógica em *Blueprint* utilizada para enviar e apresentar mensagens no sistema de chat do FabricX.

Como ilustrado na Figura 4.25, o processo começa quando o utilizador escreve uma mensagem na caixa de texto do chat e pressiona a tecla *Enter* para enviar a mensagem. Este comportamento é identificado pelo evento *On Text Committed*, que verifica se a mensagem foi submetida pelo utilizador.

Depois da validação feita, o *Blueprint* obtém a referência do jogador e vai buscar as informações associadas ao utilizador, como o nome apresentado na sessão. A mensagem escrita e o nome do jogador são então enviados para uma função responsável por submeter o conteúdo do chat. Esta função permite que a mensagem seja vista dentro da sessão colaborativa, tornando-a visível para os restantes utilizadores.

Após o envio da mensagem, o sistema cria um novo elemento para representar a mensagem no painel do chat. Este elemento é então adicionado à área de mensagens e a interface é atualizada automaticamente, colocando sempre a última mensagem enviada como primeira. Desta forma, o chat permite uma comunicação simples e imediata entre os utilizadores durante a análise colaborativa da peça.

Além da implementação descrita, é necessário fazer a implementação do chat, para distribuir as mensagens para todos os utilizadores dentro da sessão. Esta parte é crucial porque num ambiente

colaborativo, a mensagem enviada por um utilizador deve ser recebida por todos os participantes ligados à mesma sala.

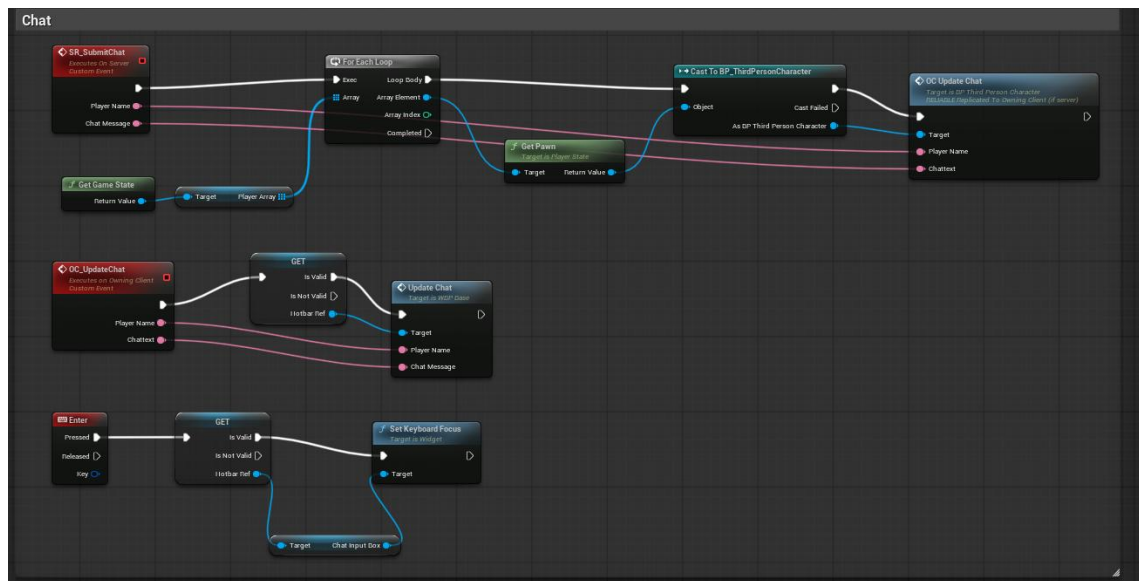


Figura 4.26: Lógica em *Blueprint* utilizada para distribuir as mensagens de chat pelos utilizadores ligados à sessão colaborativa.

Como ilustrado na Figura 4.26, quando uma mensagem é submetida, é chamado o evento *SR_SubmitChat*, responsável por enviar o nome do jogador e o conteúdo da mensagem para o servidor. Permitindo que o servidor funcione como intermediário na distribuição da mensagem pelos restantes utilizadores da sessão.

De seguida, o *Blueprint* percorre a lista de jogadores ligados através de um ciclo *For Each Loop*. Para cada jogador presente na sessão, é obtida a respetiva referência e é chamado o evento *OC_UpdateChat*, responsável por atualizar o chat no cliente correspondente. Desta forma, a mensagem enviada por um utilizador é replicada para todos os participantes, garantindo que todos visualizam a mesma informação no painel de chat.

4.5.3 Sincronização de Alterações entre Utilizadores

Após efetuada a ligação entre o *host* e os clientes é necessário garantir que as alterações realizadas por um utilizador sejam enviadas e atualizadas para todos os restantes participantes da sessão, esta sincronização é importante para que todos os utilizadores observem a mesma versão da peça, independentemente de quem realizou a alteração.

Sempre que um utilizador altera algum elemento da peça, essa informação é comunicada aos restantes participantes permitindo que a peça seja atualizada de forma consistente em todas as instâncias da aplicação.

De um ponto de vista mais técnico, esta lógica é suportada pelo sistema de replicação do Unreal Engine. A alteração realizada pelo utilizador é vista como um evento importante para a sessão e deve ser transmitida através da rede para que os restantes clientes recebam a atualização

correspondente, assim evita-se que cada utilizador tenha uma representação diferente da peça, possibilitando a discussão e validação das opções visuais de forma partilhada.

No Unreal Engine, a replicação é o mecanismo que serve para manter os objetos e as variáveis sincronizados entre o servidor e os clientes. Quando algo é marcado para replicação, o Unreal garante que isso é transmitido pela rede para as restantes instâncias da aplicação. No contexto do FabricX, esta funcionalidade foi utilizada para sincronizar alterações feitas na peça.

Nesta implementação, a alteração realizada na peça pelo utilizador é inicialmente enviada para o servidor através de um evento. O servidor passa então a assumir essa alteração como válida e comunica-a aos restantes clientes ligados à sessão. Desta forma, evita-se que cada utilizador veja uma versão diferente da peça, garantindo que todos observam a mesma configuração visual.

A sincronização não depende de uma confirmação final por parte do utilizador. Sempre que é executada uma operação que altera o estado partilhado da peça, essa alteração é enviada ao servidor e propagada aos restantes participantes da sessão. Desta forma, os outros utilizadores conseguem acompanhar as modificações durante a utilização do ambiente, em vez de aguardarem que o utilizador termine todas as operações. A atualização ocorre, portanto, em função dos eventos de alteração realizados na interface e não através de uma atualização contínua do estado da peça a cada instante. A implementação atual não estabelece um bloqueio exclusivo da peça ou das respetivas regiões durante a edição. Assim, diferentes utilizadores podem realizar alterações durante a mesma sessão. Quando as alterações afetam propriedades ou regiões diferentes, estas podem coexistir sem conflito. Caso dois utilizadores alterem praticamente em simultâneo a mesma propriedade da mesma região, o servidor processa os eventos recebidos e o último estado aplicado passa a ser o estado sincronizado entre os participantes. Esta abordagem mantém a interação simples e em tempo real, embora mecanismos mais avançados de controlo de concorrência, como bloqueio temporário de regiões ou indicação de qual utilizador está a editar determinado elemento, possam ser considerados numa evolução futura.

Como ilustrado na Figura 4.27, quando é selecionada uma nova textura, o *Blueprint* identifica a zona da peça que deve ser atualizada através de um *Switch on String*. Esta zona pode corresponder à totalidade da peça, ao tronco, aos ombros ou à gola. Consoante a opção escolhida, a textura é guardada na variável correspondente, como *Tex Tronco*, *Tex Ombros* ou *Tex Gola*. Após esta definição, é chamada a função responsável por aplicar o padrão no material através do servidor.

A Figura 4.28 apresenta a lógica responsável por aplicar as texturas ao material dinâmico da peça. Inicialmente, o sistema verifica se o material da peça é válido. Caso ainda não exista uma instância dinâmica, esta é criada e associada à peça. De seguida, os parâmetros de textura do material são atualizados através do nó *Set Texture Parameter Value*, permitindo aplicar padrões às diferentes regiões da peça. Esta abordagem permite modificar visualmente a peça em tempo real sem criar materiais separados para cada combinação possível.

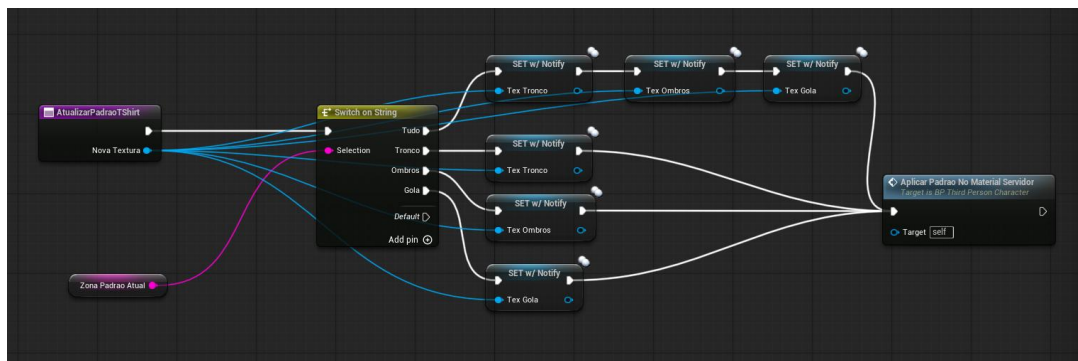


Figura 4.27: Lógica em *Blueprint* utilizada para atualizar o padrão da T-shirt de acordo com a região selecionada.

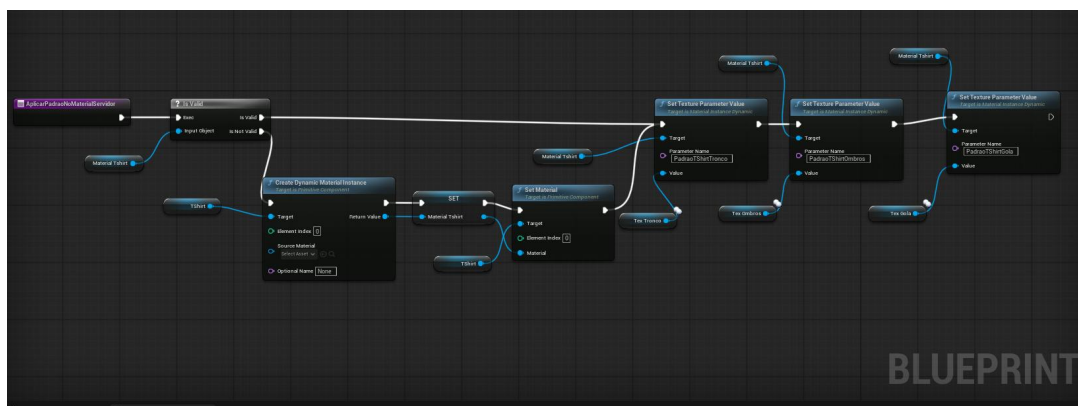


Figura 4.28: Aplicação do padrão ao material dinâmico da peça através de *Blueprint*.

A Figura 4.29 mostra a lógica de sincronização realizada no servidor. O evento *Server_AtualizarPadrao_TShirt* é executado no servidor e recebe como parâmetros a nova textura e a zona da peça que foi alterada. Em seguida, o *Blueprint* obtém a referência da peça existente na cena e atualiza a zona correspondente através da função responsável por aplicar o padrão.

Este evento funciona como ponto central da sincronização, uma vez que a alteração deixa de ser apenas local e passa a ser comunicada através da rede. Assim, quando um utilizador altera o padrão de uma determinada zona da peça, essa alteração é enviada para o servidor e posteriormente refletida nas restantes instâncias ligadas à sessão.

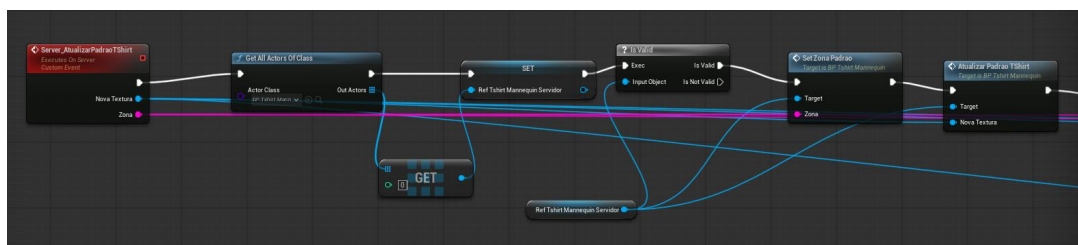


Figura 4.29: Evento replicado utilizado para sincronizar a atualização do padrão entre os utilizadores da sessão.

Capítulo 5

Testes, Resultados e Discussão

Depois de realizado o desenvolvimento do FabricX, a solução foi avaliada com a colaboração da Riopelle, uma empresa de referência no setor têxtil nacional e entidade participante no projeto, com o objetivo de compreender de que forma diferentes utilizadores interagem com a aplicação, identificar possíveis dificuldades de utilização e recolher opiniões sobre a solução desenvolvida.

A avaliação esteve mais focada na facilidade de utilização da interface, na compreensão do fluxo de navegação, na personalização das peças, na visualização dos materiais, na componente colaborativa e no potencial de utilização do FabricX.

A participação de utilizadores com diferentes perfis profissionais permitiu ter resultados mais abrangentes e concretos. A avaliação foi realizada depois de os utilizadores utilizarem o FabricX. Foi entregue um questionário composto por questões de resposta de escolha múltipla e com questões que possibilitam recolher comentários.

Após realizados os testes, os resultados obtidos serão apresentados e discutidos, permitindo assim, uma avaliação crítica do desempenho das aplicações e a identificação de possíveis melhorias.

5.1 Metodologia de Avaliação

A avaliação foi feita de modo a compreender a forma como diferentes utilizadores interagem com o FabricX, destacando os aspetos positivos, as dificuldades de utilização e o que pode vir a ser melhorado. Dito isto, foi definido um conjunto de tarefas práticas que permitiram aos participantes explorar as principais funcionalidades desenvolvidas.

Inicialmente a avaliação foi feita com uma apresentação do FabricX, no qual foi explicado o problema atual, a motivação do projeto, a solução que é o FabricX e a sua arquitetura. De seguida, cada participante teve oportunidade de interagir com a aplicação, seguindo vários casos de uso previamente definidos. Durante a participação de cada utilizador, foram observadas as dificuldades que cada um encontrou, se compreenderam facilmente as funcionalidades e a forma como reagiram a cada evento.

No final, foi entregue a cada um dos participantes um questionário. O questionário incluiu questões, avaliadas numa escala de cinco pontos, em que 1 corresponde a “Discordo totalmente” e 5 corresponde a “Concordo totalmente”. Para além destas questões, foram também incluídas perguntas, no qual permite recolher comentários sobre os aspetos mais valorizados e sugestões para futuras melhorias.

5.1.1 Participantes

No total participaram na avaliação quatro utilizadores com perfis distintos: um gestor de projeto, um artista 3D, um engenheiro informático e um utilizador sem ligação direta à área têxtil. A seleção de participantes com diferentes níveis de experiência foi realizada de forma intencional, procurando abranger um conjunto diversificado de perspetivas relativamente à utilização do FabricX.

Para além do perfil profissional, foi também considerada a caracterização dos participantes segundo variáveis como o género, a faixa etária e o nível de experiência com tecnologias digitais, modelação 3D e ferramentas relacionadas com o setor têxtil. Esta caracterização permite contextualizar melhor os resultados obtidos e compreender de que forma diferentes experiências prévias podem influenciar a interação com a aplicação.

Tabela 5.1: Caracterização dos participantes na avaliação do FabricX

Participante	Género	Faixa etária	Perfil	Experiência 3D	Experiência têxtil
P1	Masculino	35-44 anos	Gestor de projeto	Básica	Avançada
P2	Masculino	18-24 anos	Artista 3D	Avançada	Intermédia
P3	Masculino	18-24 anos	Engenheiro informático	Intermédia	Básica
P4	Feminino	25-34 anos	Utilizador sem ligação direta à área têxtil	Básica	Nenhuma

Os participantes com maior contacto com tecnologias digitais e modelação tridimensional focaram a sua avaliação sobretudo na interação, na qualidade da visualização, na personalização e no potencial técnico da aplicação. Por outro lado, o participante sem experiência direta na área têxtil analisou principalmente a facilidade de compreensão da aplicação, a clareza da interface e a simplicidade das diferentes operações disponíveis.

A diversidade dos perfis permitiu, assim, recolher opiniões sobre diferentes dimensões da solução, desde aspetos mais técnicos até à experiência de utilização por parte de um utilizador menos familiarizado com este tipo de ferramentas.

Importa, contudo, referir que o número reduzido de participantes não permite realizar uma análise estatística representativa com base em variáveis como o género ou a faixa etária. Estas características são, por isso, utilizadas sobretudo para descrever e contextualizar a amostra e não para estabelecer diferenças significativas entre grupos de utilizadores.

5.1.2 Casos de Uso Avaliados

Para tornar o processo de avaliação mais claro, foram definidos casos de uso que representam as principais ações que um utilizador pode realizar no FabricX. Estes casos de uso permitiram orientar os testes e garantir que todos os participantes avaliavam funcionalidades semelhantes.

Tabela 5.2: Casos de uso utilizados na avaliação do FabricX.

Caso de Uso	Objetivo	Tarefas realizadas pelo utilizador
CU1 – Entrada na aplicação	Avaliar a compreensão do fluxo inicial do FabricX	Entrar na aplicação, compreender o menu inicial e aceder ao ambiente principal
CU2 – Seleção e visualização da peça	Avaliar a facilidade de seleção e observação da peça digital	Selecionar uma peça, vestir a peça no avatar e visualizar a peça no ambiente
CU3 – Personalização por regiões	Avaliar a utilidade da divisão da peça em zonas editáveis	Selecionar uma região da peça, como tronco, ombros ou gola, e alterar apenas essa zona
CU4 – Alteração de cor e material	Avaliar a facilidade de alteração visual da peça	Alterar por exemplo a cor através dos valores RGB e selecionar materiais ou tecidos disponíveis
CU5 – Aplicação de padrões	Avaliar a aplicação de padrões gerados por Inteligência Artificial	Selecionar um padrão, aplicá-lo à peça e ajustar escala e rotação
CU6 – Importação de material por certificado digital	Avaliar a compreensão dos mapas e dados associados ao material	Visualizar ou importar mapas do material, como cor base, normal map, rugosidade, metalicidade, deslocamento e transparência
CU7 – Propriedades físicas da peça	Avaliar a perceção do comportamento físico do tecido	Ativar a física da peça e observar alterações associadas a propriedades como gramagem, rigidez, elasticidade, fricção e cisalhamento
CU8 – Pré-visualização 3D	Avaliar a capacidade de análise isolada da peça	Visualizar a peça num ambiente de pré-visualização, rodar a peça e testar diferentes condições de iluminação
CU9 – Visualização da peça no avatar	Avaliar a facilidade de visualização da peça vestida no avatar	Visualizar a peça como fica num avatar, com as diferentes animações
CU10 – Colaboração multiutilizador	Avaliar o potencial colaborativo da aplicação	Entrar numa sessão partilhada, observar alterações realizadas por outro utilizador e testar comunicação por chat ou voz

Os casos de uso apresentados na Tabela 5.2 foram definidos com base nas funcionalidades principais desenvolvidas no FabricX. Cada caso de uso corresponde a uma ação concreta dentro da aplicação e permitiu avaliar não apenas se a funcionalidade estava disponível, mas também se era compreensível e útil para o utilizador.

Esta organização torna o processo de teste mais claro, uma vez que permite compreender quais as funcionalidades avaliadas e como cada participante interagiu com a aplicação. Desta forma, uma pessoa externa ao projeto consegue reproduzir o processo de avaliação, seguindo a mesma sequência de tarefas.

5.1.3 Instrumento de Recolha de Dados

Após a realização dos casos de uso, foi entregue um questionário aos participantes. O questionário incluiu questões de resposta fechada, avaliadas numa escala de cinco pontos, em que 1 corresponde a “Discordo totalmente” e 5 corresponde a “Concordo totalmente”. Para além destas questões, foram também incluídas perguntas abertas, permitindo recolher comentários sobre os aspetos mais valorizados e sugestões para futuras melhorias.

As questões foram organizadas de forma a avaliar diferentes dimensões do FabricX, incluindo a facilidade de utilização, a clareza da interface, a personalização da peça, a compreensão dos materiais e certificados digitais, a simulação física, a colaboração multiutilizador e o potencial de utilização em contexto industrial.

O questionário utilizado não corresponde diretamente a um instrumento normalizado, como o *System Usability Scale* (SUS), tendo sido desenvolvido especificamente para avaliar as funcionalidades e características do FabricX. As questões foram definidas com base nos principais requisitos e funcionalidades da aplicação e avaliadas através de uma escala de Likert de cinco níveis.

1. A interface do FabricX foi fácil de compreender?
2. O processo de personalização da peça foi intuitivo?
3. Os botões, menus e opções estavam claros?
4. A aplicação de materiais e padrões foi fácil de realizar?
5. A possibilidade de alterar regiões específicas da peça, como tronco, ombros ou gola, foi útil?
6. A atualização em tempo real das alterações ajudou no processo de decisão?
7. Considera útil poder testar vários materiais ou padrões sem produzir protótipos físicos?
8. A importação de materiais a partir de certificados digitais pareceu útil?
9. A visualização dos mapas do material, como cor base, normal map, rugosidade e transparência, foi compreensível?

10. Considera importante transformar dados técnicos de tecidos numa representação visual?
11. Esta funcionalidade poderia ajudar na interpretação dos certificados digitais dentro da empresa?
12. A possibilidade de ativar a física da peça foi relevante para a análise?
13. Considera importante que o comportamento físico da peça se aproxime do comportamento real do tecido?
14. Considera útil vários utilizadores poderem estar no mesmo ambiente virtual?
15. A visualização partilhada da mesma peça pode facilitar a tomada de decisão?
16. A aplicação poderia ajudar na comunicação entre designers, técnicos e clientes?
17. A aplicação poderia reduzir a necessidade de protótipos físicos?
18. Considera que o FabricX tem potencial para ser utilizado em contexto industrial?

As questões abertas permitiram identificar os aspetos mais valorizados pelos participantes e recolher sugestões para futuras versões do FabricX.

5.2 Resultados

O projeto também foi apresentado a empresas em eventos académicos, permitindo que a aplicação fosse testada por diferentes utilizadores. Após a realização dos casos de uso definidos na metodologia de avaliação, os participantes responderam a um questionário de avaliação baseado numa escala de Likert de cinco pontos [45].

Como já referido anteriormente, as respostas ao questionário foram analisadas de forma quantitativa, através da pontuação atribuída a cada questão, e de forma qualitativa, através das respostas abertas. A escala utilizada variou entre 1 e 5, em que 1 corresponde a “Discordo totalmente” e 5 corresponde a “Concordo totalmente”. Para facilitar a leitura dos resultados, as pontuações foram convertidas para uma escala normalizada de 0 a 100.

A normalização foi realizada através da seguinte expressão:

$$Pontuacao_{normalizada} = \frac{Valor - 1}{4} \times 100$$

Desta forma, uma resposta com valor 1 corresponde a 0%, uma resposta com valor 3 corresponde a 50% e uma resposta com valor 5 corresponde a 100%. Esta conversão permitiu representar graficamente os resultados de forma mais clara e comparar a avaliação obtida em cada questão.

Conforme indicado pelos resultados apresentados na Figura 5.1, os participantes avaliaram positivamente o FabricX. A maioria das pontuações atribuídas foi elevada, indicando uma perceção favorável relativamente à facilidade de utilização, à personalização das peças, à visualização dos

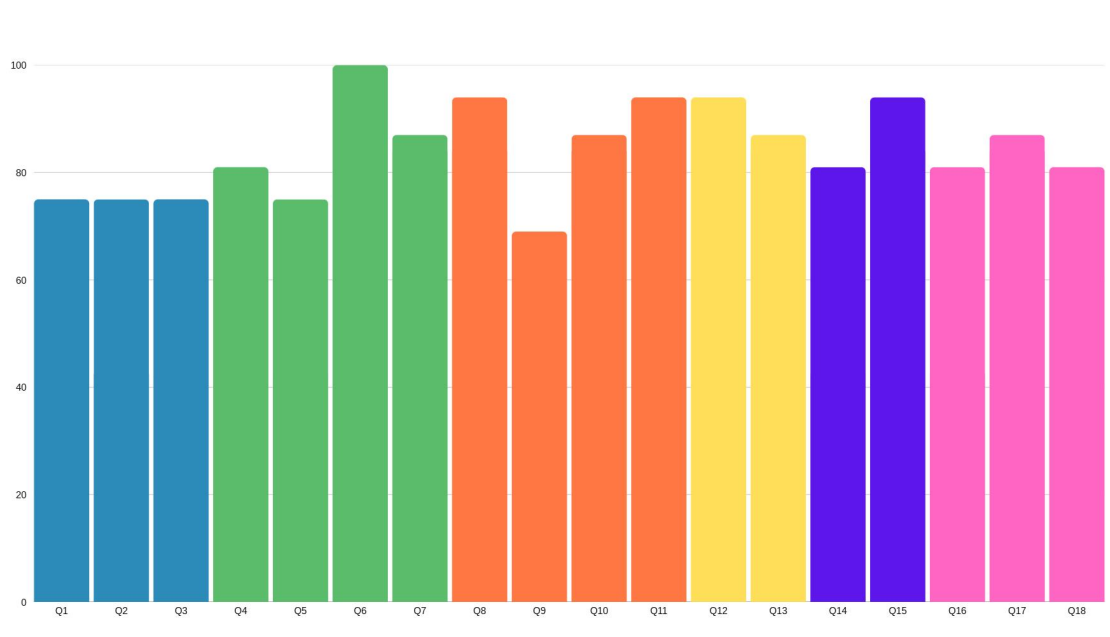


Figura 5.1: Pontuação normalizada das questões do questionário de avaliação do FabricX.

materiais, à atualização em tempo real, à componente colaborativa e ao potencial de utilização da plataforma.

A pontuação média normalizada obtida foi de 84,38%, o que demonstra o potencial da plataforma para auxiliar na visualização, personalização e análise de peças digitais. Este resultado indica que, apesar de se tratar de uma primeira versão funcional, os utilizadores compreenderam o funcionamento geral da aplicação e reconheceram valor nas funcionalidades desenvolvidas.

As questões abertas permitiram identificar os aspetos mais valorizados pelos participantes e recolher sugestões para futuras versões do FabricX.

- **O que mais gostou no FabricX:**

- Visualização dos tecidos e respetiva animação em tempo real;
- Personalização da peça;
- Realismo da representação visual.

- **Que sugestões deixaria para futuras versões do FabricX:**

- Melhoria da interface e da experiência do utilizador.

De forma geral, os resultados mostram que os participantes reconheceram o valor do FabricX, principalmente na possibilidade de testar materiais e padrões em tempo real, visualizar a peça digital de forma interativa e explorar funcionalidades colaborativas no mesmo ambiente virtual.

5.3 Discussão

Os resultados obtidos pelos participantes demonstraram que o FabricX foi avaliado de forma positiva, sobretudo nas funcionalidades da personalização da peça, a atualização das alterações em tempo real, a visualização dos materiais e a componente colaborativa. A pontuação média normalizada de 84,38% indica que os utilizadores perceberam o funcionamento geral do FabricX e que reconhecem o potencial da aplicação no futuro e da sua utilização para análise e validação de peças digitais.

De facto um dos aspetos mais valorizados durante o processo foram as alterações em tempo real, tornando esta funcionalidade muito importante no fluxo do FabricX, porque permite ao utilizador experimentar diferentes materiais, cores e padrões sem necessidade de interromper o processo de análise ou criar novas versões da peça e partilhar de forma sistemática o seu trabalho com os outros utilizadores que estejam na mesma sessão, tornando o processo de personalização rápido, visual e interativo.

A possibilidade de personalizar uma peça por regiões também foi uma funcionalidade muito elogiada, devido ao facto do utilizador conseguir ter um melhor controlo sobre o resultado final, permitindo testar combinações de materiais e padrões numa mesma peça.

Os participantes valorizaram a possibilidade de visualizar a peça num avatar e em ambiente tridimensional, uma vez que esta representação facilita a perceção da forma, do caimento, dos materiais aplicados e do comportamento visual da peça.

A componente física também foi vista como uma funcionalidade com potencial, apesar de precisar de ser melhorada. A possibilidade de ajustar as propriedades físicas em tempo real foi muito valorizada.

A parte do multiutilizador foi igualmente valorizada, uma vez que permite a vários utilizadores observarem a mesma peça no mesmo ambiente virtual e trabalhando na mesma peça ao mesmo tempo, trocando ideias, tornando esta funcionalidade muito útil em contextos de desenvolvimento de produto, nos quais designers, técnicos, responsáveis de produto e clientes precisam de discutir alterações, comparar materiais e validar decisões em conjunto.

Apesar da avaliação positiva, foram também identificadas limitações. As principais sugestões apresentadas pelos participantes foram a melhoria da interface e da experiência do utilizador. Em particular, foi referida a necessidade de melhorar a organização visual dos menus, tornar os controlos mais claros e incluir mecanismos de ajuda que expliquem melhor alguns conceitos técnicos associados aos materiais e certificados digitais.

Esta observação é especialmente importante porque o FabricX reúne conceitos técnicos que podem não ser familiares para todos os utilizadores, como *normal map*, *roughness*, *metallic*, *displacement*, *alpha* ou propriedades físicas do tecido. Assim, com esta observação, em versões futuras, pode ser útil colocar descrições simples, ícones ou mensagens de apoio para os diferentes parâmetros, melhorando assim a utilização da aplicação para utilizadores sem conhecimentos técnicos aprofundados em modelação 3D ou simulação de tecidos.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Conclusão Geral

Esta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento do FabricX que é uma plataforma interativa para a visualização, personalização e análise de peças digitais de vestuário, no qual estabelece uma relação e ligação entre ferramentas de prototipagem 3D, motores de jogo, certificados digitais de tecidos, padrões gerados externamente e funcionalidades colaborativas.

O trabalho desenvolvido começou pela necessidade de tornar a informação técnica associada aos tecidos mais acessível, visual e interativa. Em diferentes contextos, os dados das propriedades dos materiais são representados em documentos técnicos ou certificados digitais, o que torna o utilizador comum não ter perceção do material pois não têm um conhecimento especializado, dito isto esta aplicação procura transformar os dados em elementos visuais aplicáveis a peças digitais, permitindo uma análise mais intuitiva e contextualizada.

Ao longo da dissertação é demonstrado que a combinação de softwares de prototipagem como o CLO3D e o Unreal Engine permitem criar um fluxo de trabalho que consiga preparar, importar e explorar peças. O CLO3D foi utilizado como ferramenta de criação e simulação inicial da peça, enquanto o Unreal Engine foi o software escolhido para desenvolver o FabricX, permitindo assim implementar funcionalidades de visualização, personalização, simulação inicial e colaboração multiutilizador.

A solução desenvolvida e criada permitiu então importar uma peça, se necessário preparar o mapa UV da peça, criar uma máscara de segmentação por regiões e depois aplicar materiais, padrões, cores e propriedades visuais de forma interativa na peça. Para além disso, foram implementadas interfaces que permitem ao utilizador seleccionar peças, alterar avatares, personalizar materiais, pré-visualizar a peça em diferentes modos e ajustar determinadas propriedades associadas ao seu comportamento visual e físico.

Outro aspeto muito importante no trabalho foi a integração do FabricX com sistemas externos desenvolvidos no âmbito do projeto. A ligação aos certificados digitais de tecidos permitiu associar mapas e propriedades de materiais à peça, enquanto a integração com padrões gerados

por Inteligência Artificial possibilitou expandir as opções de personalização visual, assumindo-se assim uma aplicação capaz de unir diferentes contributos técnicos num só espaço.

Por fim, a implementação da componente multiutilizador, através de uma lógica baseada em *host* e cliente, foi possível preparar o sistema para sessões partilhadas, nas quais diferentes utilizadores conseguem aceder ao mesmo ambiente virtual e acompanhar alterações realizadas sobre a peça.

Assim conclui-se que o FabricX é uma primeira versão funcional de uma plataforma capaz de apoiar a análise digital de tecidos e peças de vestuário, combinando visualização tridimensional, personalização interativa, integração de dados técnicos e colaboração virtual, capaz de ser expandida e melhorada ainda mais para ter um maior impacto nesta área.

6.2 Cumprimento dos Objetivos

Os objetivos definidos no início da dissertação, foram todos atingidos. O primeiro objetivo é a análise dos dados de certificados digitais de tecidos, que são analisados através da identificação dos principais mapas e parâmetros que podem influenciar a representação visual de um material, como a cor base, o mapa de normais, a rugosidade, a metalicidade, o deslocamento e a transparência, sendo também possível ao utilizador importar materiais associados a certificados digitais, permitindo ao utilizador visualizar, em tempo real, o impacto de cada parâmetro na aparência final da peça.

As funcionalidades implementadas que permitem alterar materiais, padrões, cores, texturas e regiões específicas da peça, a utilização de máscaras de segmentações, a visualização da peça num avatar ou com física, são todos objetivos extras que foram analisados durante o processo e vistos como importantes de serem realizados para ter uma plataforma coesa e realista.

Outro objetivo alcançado foi a ligação do FabricX com o sistema de padrões gerados por Inteligência Artificial, embora essa criação ocorra externamente, é possível de forma automática importar esses padrões e aplicá-los na peça.

O segundo objetivo mais importante do trabalho foi a componente do multiutilizador que também foi alcançada, no qual permite ao FabricX a utilização colaborativa, garantindo que diferentes utilizadores possam aceder à mesma sessão e visualizar alterações realizadas sobre a peça.

Para finalizar, a realidade virtual foi um objetivo, não obrigatório mas pretendido pela minha parte, para tornar o FabricX ainda melhor e com mais funcionalidades, mas devido à falta de tempo não foi possível concretizar totalmente a implementação da RV, apesar de terem sido feitos testes e a estrutura já está criada para uma futura integração, deixando assim a possibilidade de expansão para este tipo de interação em trabalho futuro.

6.3 Trabalho Futuro

Este trabalho tem muito potencial de evolução, uma vez que pode estar sempre a ser melhorado através da criação de novas funcionalidades ou aperfeiçoar as que já existem.

As tarefas mais importantes serão a implementação total da Realidade Virtual como funcionalidade de visualização de uma peça e a estabilização da simulação física. A integração da RV é uma evolução natural, uma vez que já está iniciada a sua implementação, de modo a permitir a análise das peças de uma forma mais imersiva, com maior perceção de escala, profundidade e proximidade ao objeto.

A componente mais difícil e crítica do trabalho futuro é a estabilização e melhoria da simulação física dos materiais, uma vez que a parte física dos certificados digitais não é uma vertente que as empresas apostem muito, logo a informação que nos chega da parte física não é muito fidedigna. Embora o FabricX já inclua uma primeira abordagem à alteração de parâmetros físicos, como peso, rigidez, elasticidade e fricção, a representação fiel do comportamento real dos tecidos continua a ser um processo complexo. A dificuldade principal é a tradução dos dados técnicos dos certificados digitais para parâmetros que funcionam no Unreal Engine, uma vez que nem sempre existe uma ligação direta entre as propriedades reais do tecido e os valores utilizados pelo motor de jogo.

Por esse motivo, é necessário tempo e dedicação para haver testes, pesquisas e comparações com referências reais de forma a conseguir ter um produto final coerente, previsível e próximo do material original.

Depois destas etapas principais, o planeamento inclui tarefas complementares, com o objetivo de melhorar a aplicação, corrigir erros, melhorar a experiência de utilização e preparar uma versão mais estável e completa do FabricX.

6.4 Considerações Finais

O desenvolvimento deste projeto foi um processo muito difícil, repleta de decisões técnicas complexas, períodos de adaptação e momentos de aprendizagem. Ao longo deste percurso, não se tratou apenas de desenvolver uma aplicação que funcione, mas também de entender, testar e escolher as ferramentas tecnológicas mais adequadas aos objetivos definidos para o projeto, sendo uma das decisões mais importantes a transição do Unity para o Unreal Engine.

Inicialmente, o projeto foi desenvolvido no Unity, o software lecionado durante o mestrado e licenciatura e no qual me sentia mais à vontade de realizar, mas consoante ia desenvolvendo mais o FabricX verificou-se que o Unity não correspondia às necessidades e ao nível de qualidade visual e realismo pretendido. A representação dos materiais, a integração com ambientes tridimensionais mais realistas, o suporte a funcionalidades avançadas e o potencial de evolução para cenários de Realidade Virtual levaram à necessidade de reconsiderar a escolha tecnológica inicialmente prevista.

Dito isto, fui obrigado a mudar para o Unreal Engine, um software que nunca tinha ouvido falar nem trabalhado. Esta alteração foi um desafio muito complicado, uma vez que implicou a aprendizagem de uma nova ferramenta, a compreensão da sua lógica de funcionamento e uma forma totalmente diferente de programar. Foi necessário então aprender a programar em *Blueprints*, o qual exigiu tempo e dedicação para superar esta barreira, de forma a alcançar os resultados apresentados.

Apesar destas dificuldades, a mudança foi fundamental para ter a qualidade final da solução desenvolvida. O Unreal Engine permitiu construir uma aplicação com maior potencial visual, melhor integração com avatares digitais, suporte a materiais mais complexos e uma base tecnológica mais adequada à implementação de funcionalidades futuras, nomeadamente a Realidade Virtual e a colaboração multiutilizador.

Gostaria de salientar que o desenvolvimento do FabricX foi realizado num período relativamente curto, comparado a outros trabalhos da mesma área. Num intervalo de seis meses, foi possível estruturar a aplicação, importar e preparar peças digitais, desenvolver interfaces de personalização, implementar materiais dinâmicos, integrar padrões e certificados digitais, explorar componentes de simulação física e implementar a colaboração multiutilizador.

O FabricX serve como uma base para projetos futuros, embora existam algumas limitações e funcionalidades a melhorar, a solução que foi desenvolvida mostra claramente o potencial de usar motores de jogo na criação de ambientes interativos voltados para o setor têxtil.

Para terminar, esta dissertação não deve ser vista como um ponto final, mas sim como um ponto de partida para o desenvolvimento de uma plataforma com um grande potencial. A inclusão de novas funcionalidades, o aprimoramento da simulação física dos materiais e a integração de tecnologias como a Realidade Virtual são caminhos essenciais para tornar a solução mais completa, realista e alinhada com as exigências do setor têxtil e da moda.

Referências

- [1] Dhiani Tresna Absari, Arif Djunaidy, e Tony Dwi Susanto. Design science research methodology concept and its application in the development of online community communication system for selotapak village. Em *2022 9th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, páginas 236–241, 2022.
- [2] Aleena Chia. The metaverse, but not the way you think: game engines and automation beyond game development. *Critical Studies in Media Communication*, 39:191–200, 06 2022.
- [3] Tao Gao. The application of virtual reality technology in clothing product development. *Journal of Computing and Electronic Information Management*, 15:16–19, 11 2024.
- [4] Olha Popelo, Kostiantyn Shaposhnykov, Oleksandr Popelo, Oksana Hrubliak, Volodymyr Malysh, e Zhanna Lysenko. The influence of digitalization on the innovative strategy of the industrial enterprises development in the context of ensuring economic security. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 13:39–49, 02 2023.
- [5] Da Som Koo, Jae Sang An, e Hye Jun Yoon. Classification and analysis of fabric types for shirts: A comparison between virtual and real fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19:15589250241262318, 2024.
- [6] Siyuan Chen, Adam Thompson, Tim Dodwell, Stephen Hallett, e Jonathan Belnoue. A comparison between robust design and digital twin approaches for non-crimp fabric (ncf) forming. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 193:108864, 03 2025.
- [7] Dongliang Zhang, Yongjin Liu, Jin Wang, e Jituo Li. An integrated method of 3d garment design. *The Journal of The Textile Institute*, 109:1–11, 02 2018.
- [8] Cheng-Hsiu Chen, Jheng-Wei Su, Min-Chun Hu, Chih-Yuan Yao, e Hung-Kuo Chu. Pannelformer: Sewing pattern reconstruction from 2d garment images. Em *Proceedings of the 2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, páginas 443–452, Waikoloa, HI, USA, January 2024. IEEE.
- [9] Chaitya Vohera, Heet Chheda, Dhruveel Chouhan, Ayush Desai, e Vijal Jain. Game engine architecture and comparative study of different game engines. Em *Proceedings of the 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, páginas 1–6, Kharagpur, India, July 2021. IEEE.
- [10] Lav Soni e Amanpreet Kaur. Merits and demerits of unreal and unity: A comprehensive comparison. Em *Proceedings of the 2024 International Conference on Computational Intelligence for Green and Sustainable Technologies (ICCIGST)*, páginas 1–5, Vijayawada, India, July 2024. IEEE.

- [11] Matthew J Page, Joanne E McKenzie, Patrick M Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C Hoffmann, Cynthia D Mulrow, Larissa Shamseer, Jennifer M Tetzlaff, Elie A Akl, Sue E Brennan, Roger Chou, Julie Glanville, Jeremy M Grimshaw, Asbjørn Hróbjartsson, Manoj M Lalu, Tianjing Li, Elizabeth W Loder, Evan Mayo-Wilson, Steve McDonald, Luke A McGuinness, Lesley A Stewart, James Thomas, Andrea C Tricco, Vivian A Welch, Penny Whiting, e David Moher. The prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, 2021.
- [12] Michael Wilkinson, Sean Brantley, e Jing Feng. A mini review of presence and immersion in virtual reality. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 65:1099–1103, 11 2021.
- [13] Orestis Sarakatsanos, Elisavet Chatzilari, Spiros Nikolopoulos, Ioannis Kompatsiaris, Dong-joe Shin, David Gavilan, e Jim Downing. A vr application for the virtual fitting of fashion garments on avatars. Em *Proceedings of the 2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, páginas 40–45. IEEE, October 2021.
- [14] Adrian Hoppe, Kai Westerkamp, Sebastian Maier, Florian Van de Camp, e Rainer Stiefelhagen. Multi-user collaboration on complex data in virtual and augmented reality. Em *Human-Computer Interaction. Interaction Technologies*, páginas 258–265. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [15] Mohammad Keshavarzi, Allen Yang, Woojin Ko, e Luisa Caldas. Optimization and manipulation of contextual mutual spaces for multi-user virtual and augmented reality interaction. Em *Proceedings of the 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, páginas 353–362. IEEE, March 2020.
- [16] Sam Van Damme, Javad Sameri, Susanna Schwarzmann, Qing Wei, Riccardo Trivisonno, Filip De Turck, e Maria Torres Vega. Impact of latency on QoE, performance, and collaboration in interactive multi-user virtual reality. *Applied Sciences*, 14(6):2290, 2024.
- [17] Boyuan Li e Byung Lee. Optimizing real-time multi-layer garment simulation in ue chaos cloth. *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, 11:439–455, 06 2025.
- [18] X. Du, M. Yu, Z. Zhang, M. Tong, Y. Zhu, e C. Xue. A task- and role-oriented design method for multi-user collaborative interfaces. *Sensors*, 25(6):1760, 2025.
- [19] Junyi Wang e Yue Qi. A multi-user collaborative ar system for industrial applications. *Sensors*, 22:1319, 02 2022.
- [20] Benjamin Reynolds, James Hobin, Yuanzhi Cao, Martin Klaudiny, Daniel A Dangond, Kaize Xie, Keranie Theodosiou, Rik De Leeuw, Shiva Kashalkar, e Valentin Heun. The pop-up metaverse: A multi-user, multi-tasking spatial computing environment for collaborative spatial problem-solving. Em *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [21] Orestis Sarakatsanos, Anastasios Chalikias, Machi Boikou, Elisavet Chatzilari, Michaela Jauk, Ursina Hafliger, Spiros Nikolopoulos, e Ioannis Kompatsiaris. Vr designer: enhancing fashion showcases through immersive virtual garment fitting. *Virtual Reality*, 28, 03 2024.

- [22] Florbela P. Fernandes, Helena Torres, Pedro Pinto, e Silvestre Malta. *5th Symposium of Applied Science for Young Researchers: Book of Abstracts*. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2025.
- [23] Muyi Bao, Zeren Tao, Xiaohan Wang, Jiashuo Liu, e Qilei Sun. Comparative performance analysis of rendering optimization methods in unity tuanjie engine, unity global and unreal engine. Em *Proceedings of the 2024 IEEE Smart World Congress (SWC)*, páginas 1627–1632. IEEE, 2024.
- [24] Modelagem através do clo3d: redução de custos no processo de pilotagem e produção têxtil. Monografia de especialização, Universidade de São Paulo, Escola de Comunicações e Artes, São Paulo, Brasil, 2022.
- [25] Tae-Seok Kang, Dong-Yeon Lee, e Jinmo Kim. Production of digital fashion contents based on augmented reality using clo 3d and vuforia. *Journal of the Korea Computer Graphics Society*, 26:21–29, 07 2020.
- [26] C K Gomathy. Group decision making in an organization. *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 07, 05 2023.
- [27] Ruzica Stevkovska Stojanovska e Maja Jankoska. Ready-made garment transformed in 2d pattern making design. Em *Proceedings of the 11th International Conference TEX TEH 2023*, Bucharest, Romania, October 2023. National Research and Development Institute for Textiles and Leather (INCDTP).
- [28] Zhixin Fang, Libai Cai, e Gang Wang. Metahuman creator the starting point of the meta-verse. Em *2021 International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS)*, páginas 154–157, 2021.
- [29] Sema Erdem, Nurdan Buyukkamaci, e Şafak Birol. Environmental benefits of virtual sampling for garment production. *Journal of Cleaner Production*, 538:147401, 01 2026.
- [30] Xiaoqun Dai e Yan Hong. Fabric mechanical parameters for 3d cloth simulation in apparel cad: A systematic review. *Computer-Aided Design*, 167:103638, 2024.
- [31] Valeriia Shcherbak, Oleksandr Dorokhov, Viktoriia Riashchenko, Mariya Storozhuk, Andrej Bertoneclj, e Maja Meško. From virtual prototyping to digital fashion: How emerging technologies are setting new standards for sustainability in the creative industries. *Sustainability*, 18(7), 2026.
- [32] Ying Zang, Yuanqi Hu, Xinyu Chen, Yuxia Xu, Suhui Wang, Chunan Yu, Lanyun Zhu, Deyi Ji, Xin Xu, e Tianrun Chen. From air to wear: Personalized 3d digital fashion with ar/vr immersive 3d sketching, 2025.
- [33] Claire Ellul, Neve Hamilton, Alexandros Pieri, e George Floros. Exploring data for construction digital twins: Building health and safety and progress monitoring twins using the unreal gaming engine. *Buildings*, 14(7):2216, 2024.
- [34] Thi Tuan Linh Pham, Tzu-Ling Huang, Gen-Yih Liao, Yu-Jen Chou, T. C. E. Cheng, e Ching-I Teng. Cooperate to play: How in-game cooperation knowledge impacts online gamer loyalty. *Computers in Human Behavior*, 143:107686, 2023.

- [35] Michael Wilkinson, Sean Brantley, e Jing Feng. A mini review of presence and immersion in virtual reality. Em *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 65, 2021.
- [36] Ayesha Williams-Bhatti, D. Carruthers, e Andrew Wilson. Sepsis collab: A virtual reality training simulation for sepsis treatment. Em *2023 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, 2023.
- [37] John Brooke. SUS: A “quick and dirty” usability scale. Em Patrick W. Jordan, Bruce Thomas, Bernard A. Weerdmeester, e Ian L. McClelland, organizadores, *Usability Evaluation in Industry*, páginas 189–194. Taylor & Francis, London, 1996.
- [38] Taeheon Kim, Jun Ma, e Min Hong. Real-time cloth simulation in extended reality: Comparative study between unity cloth model and position-based dynamics model with gpu. *Applied Sciences*, 15(12):6611, 2025.
- [39] Zhongtian Zheng, Tongtong Wang, Qijia Feng, e Zherong Pan. Proxy asset generation for cloth simulation in games. *ACM Transactions on Graphics*, 43(4):1–12, 2024.
- [40] Boyang Yu, Frederic Cordier, e Hyewon Seo. Inverse garment and pattern modeling with a differentiable simulator. *arXiv preprint arXiv:2403.06841*, 2024.
- [41] Diogo Araújo, Rita Gomes, Ivan Gomes, Luís Romero, e Pedro Miguel Faria. Case study in generative adversarial networks for textile patterns generation. *IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems*, 19(2):87–101, 2024.
- [42] Ian Huang, Guandao Yang, e Leonidas J. Guibas. BlenderAlchemy: Editing 3D graphics with vision-language models. Em Aleš Leonardis, Elisa Ricci, Stefan Roth, Olga Russakovsky, Torsten Sattler, e Gül Varol, organizadores, *Computer Vision – ECCV 2024, 18th European Conference, Proceedings, Part LXXXIX*, volume 15147 de *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 297–314, Cham, Switzerland, 2025. Springer Nature Switzerland. Presented at ECCV 2024, Milan, Italy, 29 September–4 October 2024.
- [43] Válter Gomes, Pedro Machado, Gualter Barros, Sérgio Conceição, Luís Romero, e Pedro Miguel Faria. Development of a scalable digital sample archive for the textile sector. Em *Proceedings of the 5th Symposium of Applied Science for Young Researchers (SASYR 2025)*, páginas 57–59, Viana do Castelo, Portugal, 2025. Instituto Politécnico de Bragança.
- [44] Jay Holben. Three-point lighting. *American Cinematographer: The International Journal of Film & Digital Production Techniques*, 100:14–22, 2019.
- [45] Rensis Likert. A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22(140):1–55, 1932.
- [46] Epic Games. Unreal engine. <https://www.unrealengine.com/>, 2026. Acedido em: 11 abril 2026.
- [47] Unity Technologies. Unity real-time development platform. <https://unity.com/>, 2026. Acedido em: 11 abril 2026.
- [48] CLO Virtual Fashion Inc. Clo 3d. <https://www.clo3d.com>, 2024. Software de design e simulação de vestuário em 3D. Acedido em: 8 abril 2026.

- [49] Unity Technologies. Unity manual: Cloth. <https://docs.unity3d.com/6000.4/Documentation/Manual/class-Cloth.html>. Acedido em: 7 maio 2026.
- [50] Unity Technologies. Multiplayer and networking overview. <https://docs.unity3d.com/6000.2/Documentation/Manual/multiplayer.html>, 2024. Acedido em: 11 fevereiro 2026.
- [51] Epic Games. Creating and using material instances in unreal engine. <https://dev.epicgames.com/documentation/pt-br/unreal-engine/creating-and-using-material-instances-in-unreal-engine>, 2026. Acedido em: 7 maio 2026.
- [52] Epic Games. Networking and multiplayer in unreal engine. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/networking-and-multiplayer-in-unreal-engine>, 2026. Acedido em: 7 maio 2026.
- [53] Magica Soft. Magica cloth 2 – bonecloth start guide. <https://magicasoft.jp/en/bonecloth-start-2/>, 2024. Acedido em: 11 março 2026.
- [54] Virtual Method Studio. Obi cloth – manual de configuração. <https://obi.virtualmethodstudio.com/manual/4.X/clothsetup.html>, 2024. Acedido em: 19 março 2026.
- [55] Wayline. Understanding urp, hdrp, and the built-in render pipeline in unity. <https://www.wayline.io/blog/unity-understanding-urp-hdrp-built-in>, 2023. Acedido em: 11 janeiro 2026.
- [56] Unity Technologies. Render pipeline feature comparison. <https://docs.unity3d.com/6000.2/Documentation/Manual/render-pipelines-feature-comparison.html>, 2024. Acedido em: 11 janeiro 2026.
- [57] Epic Games. Unreal engine architecture – documentation (v4.27). <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/overview-of-unreal-engine-architecture>. Acedido em: 11 março 2026.
- [58] AppTunix. Unity vs unreal engine: A detailed comparison. <https://www.apptunix.com/blog/unity-vs-unreal-engine/>. Acedido em: 30 novembro 2025.
- [59] RocketBrush. Unity vs unreal engine: Which one should you choose in 2024. <https://rocketbrush.com/blog/unity-vs-unreal-engine-which-one-should-you-choose-in-2024>. Acedido em: 30 novembro 2025.
- [60] Hackr.io. Unity vs unreal engine. <https://hackr.io/blog/unity-vs-unreal-engine>. Acedido em: 30 novembro 2025.
- [61] Kevuru Games. Unity vs unreal engine: Pros and cons. <https://kevrugames.com/blog/unity-vs-unreal-engine-pros-and-cons/>. Acedido em: 30 novembro 2025.

- [62] Learn 3D Fashion. Best 3d fashion design software in 2026: Full comparison. <https://learn3dfashion.com/3d-digital-fashion-design-software-2026>, 2026. Acedido em: 18 maio 2026.
- [63] Onbrand. Top 8 garment design software for fashion brands (2026). <https://www.onbrandplm.com/blog/garment-design-software>, 2026. Acedido em: 18 maio 2026.
- [64] Hitem3D. Fashion design software: The best tools for designers in 2026. <https://www.hitem3d.ai/blog/en-Fashion-Design-Software-The-Best-Tools-for-Designers-in-2026/>, 2026. Acedido em: 18 maio 2026.
- [65] CLO TechSupport. Clo system requirements, april 2026. <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/115000307168-CLO-system-requirements-April-2026>, 2026. Acedido em: 18 maio 2026.
- [66] Adobe. Adobe photoshop. <https://www.adobe.com/products/photoshop.html>, 2026. Acedido em: 19 maio 2026.
- [67] Blender Foundation. Blender. <https://www.blender.org/>, 2026. Acedido em: 19 maio 2026.
- [68] IEEE. Ieee xplore digital library. <https://ieeexplore.ieee.org/>, 2026. Acedido em: 21 maio 2026.
- [69] Elsevier. Scopus. <https://www.scopus.com/>, 2026. Acedido em: 21 maio 2026.
- [70] Epic Games. Metahuman documentation. <https://dev.epicgames.com/documentation/metahuman/metahuman-documentation>, 2026. Acedido em: 14 abril 2026.
- [71] Epic Games. Networking and multiplayer in unreal engine. <https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine/networking-and-multiplayer-in-unreal-engine>, 2026. Acedido em: 17 abril 2026.
- [72] Unity Technologies. Overview of .net in unity. <https://docs.unity3d.com/2023.2/Documentation/Manual/overview-of-dot-net-in-unity.html>. Acedido em: 3 junho 2026.
- [73] Unity Technologies. Native memory introduction. <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/Manual/performance-native-memory-introduction.html>. Acedido em: 3 junho 2026.
- [74] Unity Technologies. Scripting backends. <https://docs.unity3d.com/6000.1/Documentation/Manual/scripting-backends.html>. Acedido em: 3 junho 2026.
- [75] Unity Technologies. Il2cpp scripting back end. <https://docs.unity3d.com/6000.4/Documentation/Manual/scripting-backends-il2cpp.html>. Acedido em: 3 junho 2026.

- [76] Unity Technologies. Enter play mode with domain reload disabled. <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/Manual/domain-reloading.html>. Acedido em: 3 junho 2026.
- [77] Unity Technologies. Serialization rules. <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/Manual/script-serialization-rules.html>. Acedido em: 3 junho 2026.
- [78] Unity Technologies. Organizing scripts into assemblies. <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/Manual/assembly-definition-files.html>. Acedido em: 3 junho 2026.
- [79] NVIDIA. Cloth – nvidia physx sdk 3.4.1 documentation. <https://documentation.help/NVIDIA-PhysX-SDK-3.4.1/Cloth.html>. Acedido em: 18 janeiro 2026.
- [80] Unity Technologies. About havok physics for unity. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.havok.physics@1.4/manual/index.html>, 2026. Acedido em: 11 julho 2026.
- [81] Unity Technologies. Physics for ecs: Havok physics for unity and unity physics. <https://learn.unity.com/tutorial/ecs-physics-havok-physics-for-unity-and-unity-physics>, 2026. Acedido em: 11 julho 2026.
- [82] Photon Engine. Fusion 2 introduction. <https://doc.photonengine.com/fusion/current/fusion-2-intro>, 2026. Acedido em: 11 junho 2026.
- [83] Mirror Networking. Mirror networking documentation. <https://mirror-networking.gitbook.io/docs>, 2026. Acedido em: 1 julho 2026.
- [84] Epic Games. Nanite virtualized geometry in unreal engine. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/nanite-virtualized-geometry-in-unreal-engine>, 2026. Acedido em: 21 agosto 2026.
- [85] Epic Games. Lumen global illumination and reflections in unreal engine. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/lumen-global-illumination-and-reflections-in-unreal-engine>, 2026. Acedido em: 11 julho 2026.
- [86] Browzwear. What is vstitcher? <https://help.browzwear.com/en/articles/13065249-what-is-vstitcher>. Acedido em: 11 julho 2026.
- [87] Browzwear. Stitching overview. <https://help.browzwear.com/en/articles/13065399-stitching-overview>. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [88] Browzwear. Creating true to life materials. <https://help.browzwear.com/en/articles/13065661-creating-true-to-life-materials>. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [89] Browzwear. System requirements details. <https://help.browzwear.com/en/articles/13065046-system-requirements-details>. Acedido em: 11 outubro 2025.

- [90] Autodesk. Autodesk maya – 3d computer animation, modeling, simulation, and rendering software. <https://www.autodesk.com/products/maya/overview>, 2026. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [91] Creality Cloud. What is blender? a comprehensive overview. <https://www.crealitycloud.com/pt/blog/reviews/what-is-blender>. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [92] Asimov Academy. Blender: para iniciantes em modelagem e animação 3d. <https://hub.asimov.academy/blog/blender-para-iniciantes-em-modelagem-e-animacao-3d/>. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [93] Blender Foundation. About blender. https://docs.blender.org/manual/en/dev/getting_started/about/index.html. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [94] Blender Foundation. Blender requirements. <https://www.blender.org/download/requirements/>. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [95] Autodesk. System requirements for autodesk maya 2026. <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/System-Requirements-for-Autodesk-Maya-2026.html>, 2026. Acedido em: 11 outubro 2025.
- [96] Blender Addons. E-cycles or eevee. <https://blender-addons.org/articles/e-cycles-or-eevee/>. Acedido em: 21 março 2026.
- [97] European Commission. eidas – electronic identification and trust services. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/discover-eidas>, 2026. Acedido em: 5 janeiro 2026.

Anexo A

Trabalho Publicado

Collaborative Fabric Design with AI and 3D Simulation

João Santos¹, Nuno Dinis², Luís Romero¹ , and Pedro Miguel Faria¹ 

¹ ADiT-Lab, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal
jhenriquesantos@ipvc.pt, {romero, pfaria}@estg.ipvc.pt

² RIOPELE, Pousada de Saramagos, Vila Nova de Famalicão, Portugal
nuno.dinis@riopele.pt

Abstract. This short paper incorporates the use of artificial intelligence and collaborative visualisation tools to provide an alternative approach to fabric/simulating 3D environments. The main aim is to create a machine learning model that follows the approach by classifying textile parameter combinations (i.e. composition, weight, elasticity) according to their suitability or compliance level to simplify the validation process. Approved combinations are exported to 3D modeling software for virtual visualization and then integrated into Unity, enabling real-time, collaborative interaction with the simulated fabrics.

Keywords: 3D Modeling · Real-Time Collaboration · Textile Simulation · Machine Learning

1 Introduction

Traditionally, the characterization of textile behavior is reliant on physical samples, which is a slow and inefficient process in today's design practice. New technologies and AI offer the opportunity to redesign the process. This short paper presents a system that combines machine learning and 3D simulation to support the validation of fabrics and enhance collaborative practices. Based on fabric properties classified using XGBoost and simulated in CLO 3D with real-time interaction built in Unity, our method enables quicker decision-making and less reliance on physical prototypes.

2 Related Work

A number of research studies have explored alternative approaches to the topic incorporating AI into textile simulation, virtual environments and collaborative environments. Different studies utilize deep learning models, such as convolutional neural networks (CNNs), gated recurrent units (GRUs) and extreme gradient boosting (XGBoost), for analyzing fabric, as well as analyzing wrinkle models [1], fabrics with defects [2] and fabric quality assessment [3]. Other studies investigated customization of avatars in a virtual environment with traditional clothing [4] and simulated tactile sensations with electro-vibration and AI [5].

In numerous experiments participants went for Unity and VR as a substitute for learning and designing, thus showing how client-server architectures and immersive simulations can boost study environments [6] [7]. XR-based collaboration with Unity Mirror revealed limitations in scalability and device compatibility [8].

Generally speaking, there is a huge potential for AI in the domain of 3D modeling and collaborative technical that is able to change the textile and fashion industry via enhanced workflows and also more interesting and productive design and training environments.

Figura A.1: Artigo publicado no *5th Symposium of Applied Science for Young Researchers: Book of Abstracts*.



Certificate of Presentation

This is to certify that

João Santos, Instituto Politécnico de Viana do Castelo

has attended the Symposium of Applied Science for Young Researchers (SASYR) 2025, organized by 2Ai – IPCA, CeDRI – IPB, ADIT-LAB – IPVC and GECAD – P. PORTO at the Polytechnic Institute of Viana do Castelo (IPVC), on July 2, 2025, and presented the following work (Oral Communication):

Title: Collaborative Fabric Design with AI and 3D Simulation.

Authors: *João Santos; Nuno Dinis; Luís Romero; Pedro Miguel Faria.*

Viana do Castelo, July 2, 2025

On behalf of the Organizing Committee,

Silvestre Malta



Figura A.2: Certificado de apresentação oral do artigo *Collaborative Fabric Design with AI and 3D Simulation*, apresentado no *Symposium of Applied Science for Young Researchers 2025*.

International Conferences Interfaces and Human Computer Interaction 2025;
Game and Entertainment Technologies 2025;
and Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2025

COLLABORATIVE AI-DRIVEN DESIGN AND REALISTIC 3D SIMULATION OF DYNAMIC FABRIC BEHAVIOR

João Santos¹, Nuno Dinis², Luís Romero¹ and Pedro Miguel Faria¹

¹Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, Portugal

²Riopele, Vila Nova de Famalicão, Portugal

ABSTRACT

This paper incorporates the use of artificial intelligence and collaborative visualization tools to provide an alternative approach to fabric/simulating 3D environments. The main aim is to create a machine learning model that follows the approach by classifying textile parameter combinations (i.e. composition, weight, elasticity) as 'good' or 'bad' to simplify the validation process. Approved combinations are exported to 3D modeling software for virtual visualization and then integrated into Unity, enabling real-time, collaborative interaction with the simulated fabrics.

KEYWORDS

3D Modeling, Real-Time Collaboration, Textile Simulation, Machine Learning

1. INTRODUCTION

The development of three-dimensional simulation systems for analyzing textiles, clothing or footwear behavior plays an important role in evaluating how these materials behave in different fields of design. These applications, often equipped with machine learning technologies, are based on models of physical behavior to produce realistic simulations, and are used in the areas of fashion, product design, engineering and digital games, predicting results more efficiently and accurately. However, the definition and validation of fabrics in 3D environments often still depends on physical samples, and this process can be costly, time-consuming, and sometimes incompatible with more agile workflows. That said, this paper presents an innovative idea: initially, the use of a machine-learning AI model capable of classifying combinations of the parameters of a certain fabric as "good" or "bad". With this solution, you explicitly define the characteristics of a fabric (such as composition, weight, thickness, elasticity, etc.) and immediately receive an assessment of the viability of that combination. If the combination is successful, it will be exported to modeling software, allowing it to be visualized and validated in a three-dimensional environment. It will then be exported to Unity, creating a collaborative mode where different users can interact in real time with the simulated fabrics.

This paper initially presents the work related to the proposed solution, then describes the architecture of the solution exploring each part of it and finally the conclusion and future work.

This system offers significant advantages over traditional methods of testing physical fabric products, which are both expensive and time consuming, as it can test these products in virtual environments much faster, cheaper and allow for collaboration, reducing time to market, and enabling sustainable design workflows. The aim of this system is to enable virtual evaluation and collaborative visualization of fabrics, reducing the need for physical samples and accelerating the design-validation loop in textile innovation.

2. RELATED WORK

A few research studies have explored alternative approaches to the topic incorporating AI into textile simulation, virtual environments and collaborative environments. Different studies utilize deep learning models, such as convolutional neural networks (CNNs), gated recurrent units (GRUs) and extreme gradient boosting (XGBoost), for analyzing fabric, as well as analyzing wrinkle models (Yang, 2024), fabrics with

Figura A.3: Artigo *Collaborative AI-Driven Design and Realistic 3D Simulation of Dynamic Fabric Behavior*, publicado nos proceedings do *MCCSIS 2025*.

3D Simulation of Fabric Physical Properties and Behaviour

João Santos¹ [0009-0002-7150-4671], Nuno Dinis², Luís Romero¹ [0000-0003-1316-2474], and Pedro Miguel Faria¹ [0000-0001-5673-8678]

¹ ADiT-Lab, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, IPVC, Portugal
joaosantos@ipvc.pt, romero@estg.ipvc.pt, pfaria@estg.ipvc.pt

² RIOPELE, Pousada de Saramagos, Vila Nova de Famalicão, Portugal
nuno.dinis@riopele.pt

Abstract. The increasing use of three-dimensional fabric simulation has had a positive impact on the development of textile products, with ongoing improvements in analyzing fabric behavior within digital spaces. On the other hand, game engines have evolved over the years and are no longer limited to entertainment platforms, with a greater emphasis on their use as technical platforms for physical simulations, prototyping, and visualization. This article discusses the method of incorporating digital fabric certification information into a game engine environment, which enables precise graphical and physical modeling of fabric. The certified parameters regarding physical and graphical characteristics are decoded and implemented within a real-time simulation environment, which enables the simulation of the fabric in a dependable manner. The developed system also employs Virtual Reality to create an immersive environment for analyzing the behavior of the fabric in a much clearer manner compared to the two-dimensional method. In this way, the solution provided enables translating complex technical information from digital fabric certificates into meaningful visual representations. It addresses some shortfalls of current certificate-based material analysis. The findings of this research will enhance the validation of fabric material properties through improved fabric material interpretation.

Keywords: 3D Modeling · Fabric Simulation · Digital Transformation

1 Introduction

Three-dimensional simulation tools have gained ground in areas such as product design, fashion, engineering, and gaming [1]. Computer-generated fabric simulation helps predict how different materials will behave in different scenarios. This reduces the need to create physical prototypes, making development faster, more accurate, and less environmentally impactful.

At the same time, game engines are no longer just for entertainment. Software such as Unity [3] and Unreal Engine [2], which were previously used only for games, are now used for countless other technological applications in a more advanced way, to make prototypes, simulate laws of physics, and create virtual



Certificate of Presentation

This is to certify that

João Santos, Instituto Politécnico de Viana do Castelo

attended the Symposium of Applied Science for Young Researchers (SASYR) 2026, organized by 2Ai – IPCA, CeDRI – IPB, ADiT-LAB – IPVC, and GECAD – P. PORTO, held at the Polytechnic Institute of Cávado and Ave on June 19, 2026, and delivered the following Oral Communication:

Title: 3D Simulation of Fabric Physical Properties and Behaviour

Authors: *João Santos, Nuno Dinis, Luís Romero and Pedro Faria*

Barcelos, June 19, 2026

On behalf of the Organizing Committee,

Helena Torres

Assinado por: **Helena Daniela Ribeiro Torres**
Num. de Identificação: 14052815
Data: 2026.09.18 15:33:24+01'00'



Figura A.5: Certificado de apresentação oral do artigo *3D Simulation of Fabric Physical Properties and Behaviour*, apresentado no *Symposium of Applied Science for Young Researchers 2026*.