



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA EM SAÚDE
MESTRADO PROFISSIONAL EM INFORMÁTICA EM SAÚDE

Regis Luciano da Rocha Santos

**APLICABILIDADE DE UM *SOFTWARE* DE REALIDADE VIRTUAL NA
REABILITAÇÃO DA CAPSULITE ADESIVA DO OMBRO**

Florianópolis
2025

Regis Luciano da Rocha Santos

**APLICABILIDADE DE UM SOFTWARE DE REALIDADE VIRTUAL NA
REABILITAÇÃO DA CAPSULITE ADESIVA DO OMBRO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Informática em Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Informática em Saúde. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Informação e Comunicação em Saúde/eSaúde.

Orientador: Prof. Dr. Martín Augusto Gagliotti Vigil

Florianópolis
2025

Regis Luciano da Rocha Santos

Aplicabilidade de um software de realidade virtual na reabilitação da capsulite adesiva do ombro

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado, em 14 de Julho de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Alessandro Haupenthal, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Daniel Berejuck, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Martín Augusto Gagliotti Vigil, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Martín Augusto Gagliotti Vigil, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2025

À minha filha, Alana Feier Santos:
Você é minha maior motivação, que este trabalho
lhe inspire a seguir investigando os fatos através da
lupa da ciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria Rocha Santos, por ter me ensinado a importância da paciência diante dos desafios, e às minhas irmãs, Rita e Leila Santos, por sempre me mostrarem força e resiliência.

À minha esposa, Carmen Feier, por ter sido a principal incentivadora na escolha pela pesquisa aplicada e pela parceria direta ao longo deste processo. À minha filha, Alana, por estar ao meu lado durante toda a jornada e por me lembrar do valor da presença.

Aos amigos que contribuíram direta ou indiretamente, em especial ao Fabio Lorensi do Canto, pelo apoio acadêmico consistente.

Aos colaboradores e bolsistas do Laboratório Biomec (UFSC), agradeço pela disponibilidade e suporte técnico durante os dias de coleta de dados.

Registro meu reconhecimento ao Prof. Dr. Martin Vigil, pela orientação comprometida, pela paciência durante o desenvolvimento deste trabalho e pela postura ética e humana ao longo da pesquisa.

Por fim, uma menção ao meu pai (in memoriam), cujo incentivo e apoio à educação foram fundamentais na minha trajetória.

RESUMO

A capsulite adesiva do ombro é uma condição musculoesquelética marcada por dor intensa e limitação progressiva da amplitude de movimento, impactando significativamente a funcionalidade e a qualidade de vida. A realidade virtual (RV) tem se destacado como ferramenta complementar na reabilitação, oferecendo um ambiente interativo com potencial de engajamento terapêutico. Este estudo teve como objetivo investigar a aplicabilidade do software Reach, desenvolvido para o dispositivo Meta Quest 2, em um contexto simulado de reabilitação da capsulite adesiva. Foram realizadas sessões experimentais com captura tridimensional do movimento em duas condições distintas (mobilidade livre e restrita do ombro), utilizando análise cinemática dos gestos executados ao longo das fases do jogo. Os dados foram interpretados à luz de parâmetros funcionais relacionados à aplicação clínica de softwares terapêuticos. Os resultados demonstraram resposta inicial compatível com as limitações impostas, mas revelaram padrão motor conservador mesmo na ausência de restrição. A limitação na adaptação progressiva dos estímulos motores, mesmo em condição de mobilidade livre, evidencia que o Reach não atende de maneira satisfatória os critérios de aplicabilidade adotados. Sua lógica automatizada, sem possibilidade de personalização terapêutica, reforça a necessidade de uso apenas como recurso complementar e dependente da curadoria ativa de um profissional. O estudo contribui para a avaliação crítica de tecnologias imersivas aplicadas à fisioterapia, sugerindo direções para o aprimoramento da progressão motora e da integração clínica desses recursos.

Palavras-chave: capsulite adesiva; realidade virtual; reabilitação; análise de movimento; fisioterapia.

ABSTRACT

Frozen shoulder is a musculoskeletal condition characterized by intense pain and progressive limitation of range of motion, significantly impacting function and quality of life. Virtual reality (VR) has emerged as a complementary tool in rehabilitation by providing an interactive environment with therapeutic engagement potential. This study aimed to investigate the applicability of the Reach software, developed for the Meta Quest 2 device, in a simulated rehabilitation context for frozen shoulder. Experimental sessions were conducted with three-dimensional motion capture under two distinct conditions (free and restricted shoulder mobility), using kinematic analysis of the gestures performed during the game phases. The data were interpreted based on functional parameters related to the clinical application of therapeutic software. The results showed an initial response consistent with the imposed limitations but revealed a conservative motor pattern even in the absence of restrictions. The limited progressive adaptation of motor stimuli, even under free mobility conditions, indicates that Reach does not satisfactorily meet the applicability criteria adopted in this study. Its automated logic, lacking therapeutic personalization, reinforces the recommendation for its use only as a complementary resource, dependent on active professional supervision. This study contributes to the critical evaluation of immersive technologies applied to physiotherapy, suggesting directions for improving motor progression and clinical integration of such systems.

Keywords: adhesive capsulitis; virtual reality; rehabilitation; motion analysis; physiotherapy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Visão do jogador durante o jogo <i>Firefly Assessment</i> | 18 |
| Figura 2 - Experiências diárias após a avaliação..... | 18 |
| Figura 3 - Interface do jogo <i>Space Gunner</i> | 19 |
| Figura 4 - Interface do jogo <i>Tube Trouble</i> | 19 |
| Figura 5 - Interface do jogo <i>Bullseye</i> | 20 |
| Figura 6 - Interface do jogo <i>Star Beams</i> | 20 |
| Figura 7 - Modelo <i>Plug-in Gait Full Body</i> : vista anterior..... | 28 |
| Figura 8 - Modelo <i>Plug-in Gait Full Body</i> : vista posterior..... | 28 |
| Figura 9 - Modelo <i>Plug-in Gait Full Body</i> : vista lateral..... | 29 |
| Figura 10 - Planos de movimentos X, Y e Z..... | 32 |
| Figura 12 - Boxplot dos ângulos do eixo X na simulação de “mobilidade restrita”..... | 34 |
| Figura 14 - Boxplot dos ângulos do eixo Y na simulação de “mobilidade restrita”..... | 36 |
| Figura 15 - Boxplot dos ângulos do eixo Z na condição de “mobilidade livre”..... | 37 |
| Figura 16 - Boxplot dos ângulos do eixo Z na simulação de “mobilidade restrita”..... | 37 |

LISTA DE SIGLAS

ADM – Amplitude de Movimento

AVD – Atividade da Vida Diária

CLAV – Clavícula (marcador anatômico posicionado na extremidade distal da clavícula)

LELB – Cotovelo Esquerdo (*Left Elbow*) – marcador posicionado sobre o epicôndilo lateral

LSHO – Ombro Esquerdo (*Left Shoulder*) – marcador posicionado sobre o acrômio
Reach – *Reach Shoulder Health*

RELB – Cotovelo Direito (*Right Elbow*) – marcador posicionado sobre o epicôndilo lateral

RSHO – Ombro Direito (*Right Shoulder*) – marcador posicionado sobre o acrômio

STRN – Esterno (*Sternum*) – marcador posicionado na região manubrial

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 REVISÃO DA LITERATURA..... | 12 |
| 1.1.1 Capsulite Adesiva..... | 13 |
| 1.1.2 Realidade Virtual em Saúde..... | 14 |
| 1.1.3 Fisioterapia com Realidade Virtual..... | 14 |
| 1.1.4 A Realidade Virtual aplicada à capsulite adesiva..... | 15 |
| 1.2 ÓCULOS META QUEST 2..... | 17 |
| 1.3 SOFTWARE REACH..... | 18 |
| 1.4 PROBLEMA E PERGUNTA DE PESQUISA..... | 22 |
| 1.5 JUSTIFICATIVA..... | 22 |
| 1.6 ADEQUAÇÃO À LINHA DE PESQUISA..... | 23 |
| 3 OBJETIVOS..... | 24 |
| 3.1 OBJETIVO GERAL..... | 25 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 25 |
| 4 METODOLOGIA..... | 25 |
| 4.1 PROCEDIMENTOS E COLETA DE DADOS..... | 27 |
| 4.2 EXECUÇÃO DAS FASES DO JOGO..... | 28 |
| 4.3 INSTRUMENTAÇÃO E CAPTURA DE MOVIMENTO..... | 28 |
| 4.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS..... | 30 |
| 5 RESULTADOS..... | 32 |
| 5.1 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES LIVRE E RESTRITA NO EIXO X..... | 34 |
| 5.2 COMPARAÇÃO CONDIÇÕES LIVRE E RESTRITA NO EIXO Y..... | 35 |
| 5.3 COMPARAÇÃO CONDIÇÕES LIVRE E RESTRITA NO EIXO Z..... | 37 |
| 6 DISCUSSÃO..... | 39 |
| 6.1 PROMOÇÃO DE MOVIMENTOS FUNCIONAIS NOS PLANOS TERAPÊUTICOS DA CAPSULITE ADESIVA..... | 40 |
| 6.2 ADAPTAÇÃO PROGRESSIVA E RESPOSTA AO DESEMPENHO..... | 41 |
| 6.3 ENGAJAMENTO E MOTIVAÇÃO TERAPÊUTICA..... | 41 |
| 6.5 IMPLICAÇÃO DOS RESULTADOS E RELAÇÕES COM A PESQUISA..... | 43 |
| 6.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO..... | 43 |
| 7 CONCLUSÃO..... | 45 |

1 INTRODUÇÃO

A dor crônica representa um desafio global para a saúde pública, sendo responsável por impactos significativos na funcionalidade, na saúde mental e na qualidade de vida das pessoas acometidas. A *International Association for the Study of Pain* passou a classificar, em 2020, a dor crônica primária como uma condição em si, caracterizada por dor persistente por mais de três meses, associada a sofrimento emocional ou comprometimento funcional, sem explicação por outra condição específica (Nicholas et al., 2019). Nesse contexto, as disfunções musculoesqueléticas crônicas do ombro se destacam por sua prevalência, complexidade e impacto sociofuncional.

A adesão a programas de fisioterapia voltados para essas condições nem sempre é satisfatória. Pacientes frequentemente relatam dificuldade em manter a continuidade das sessões devido à dor, à frustração com a lentidão do progresso ou à natureza repetitiva dos exercícios terapêuticos. Em paralelo, fisioterapeutas enfrentam o desafio de propor intervenções eficazes, engajadoras e adaptadas às particularidades de cada fase da recuperação funcional, sobretudo em condições com curso prolongado e flutuante.

Nos últimos anos, a tecnologia tem se mostrado uma aliada promissora nesse cenário. A realidade virtual (RV), inicialmente desenvolvida para o entretenimento digital, tem sido incorporada ao campo da saúde como ferramenta de reabilitação, apresentando potenciais benefícios clínicos, como distração atencional frente à dor, maior engajamento nas atividades terapêuticas e fornecimento de feedback sensorio-motor em tempo real. Revisões recentes apontam que intervenções com suporte de RV podem contribuir positivamente para o ganho de amplitude de movimento, alívio da dor, melhora da funcionalidade e maior motivação do paciente (Asadzadeh et al., 2021; Laver et al., 2015).

Apesar do crescente número de estudos sobre o uso da RV em diferentes contextos clínicos, ainda há escassez de investigações específicas sobre sua aplicação em condições ortopédicas complexas, como a capsulite adesiva. Essa condição se destaca por seu curso dividido em estágios clínicos e por representar uma das formas mais desafiadoras de disfunção do ombro, impactando a autonomia e o bem-estar dos pacientes.

Neste cenário, novas abordagens interativas e baseadas em tecnologias imersivas tornam-se relevantes. O software *Reach Shoulder Health*, desenvolvido para dispositivos Meta Quest, oferece uma proposta baseada em jogos e tarefas de movimento voltadas à reabilitação do ombro. No entanto, sua aplicabilidade clínica em contextos que simulam limitações

funcionais, como aquelas observadas na capsulite adesiva, ainda não foi suficientemente explorada.

A presente dissertação propõe-se a investigar a aplicabilidade do uso do software *Reach* em cenários simulados de limitação da mobilidade do ombro, baseando-se em parâmetros biomecânicos e referenciais clínicos. Ao adotar uma abordagem baseada em realidade virtual para a avaliação do movimento, espera-se contribuir para o entendimento do potencial dessa ferramenta como recurso complementar na fisioterapia ortopédica.

1.1 REVISÃO DA LITERATURA

A presente revisão narrativa da literatura foi construída a partir das bases de dados PubMed e Cochrane Library. A estratégia combinou termos livres relacionados à capsulite adesiva, realidade virtual e reabilitação, utilizando operadores booleanos. A estratégia de busca aplicada foi: ("adhesive capsulitis" OR "frozen shoulder"[title] OR "shoulder stiffness") AND ("virtual reality"[title] OR "VR" OR "immersive technology") AND ("physical therapy" OR "physiotherapy" OR "rehabilitation")

A busca foi realizada em 30/01/2025 e foram recuperados 1414 registros. Do total, 12 estudos foram incluídos na análise principal sendo em seguida aplicado a técnica de rastreamento das referências (*snowballing*), o que permitiu identificar artigos adicionais não retornados pela busca original. Também foram considerados estudos identificados por meio de recomendações de orientadores e buscas manuais com base na leitura crítica dos textos já selecionados. Os títulos e resumos foram avaliados com base nos seguintes critérios de inclusão. Estudos em humanos nos últimos 10 anos, com acesso ao texto completo e idioma em inglês envolvendo o uso de realidade virtual em reabilitação musculoesquelética, especialmente para ombro e capsulite adesiva. Ensaio clínico, revisões sistemáticas ou estudos observacionais com descrição de métodos e/ou resultados clínicos. Incluíram-se na pesquisa *guidelines*, artigos com aplicações práticas, tecnológicas ou com foco em adesão e engajamento de pacientes, pesquisas que analisaram parâmetros biomecânicos de movimento relacionados a exercícios com RV, desde que os achados apresentassem relevância clínica ou metodológica para a compreensão do uso dessa tecnologia na reabilitação do ombro.

Foram excluídos *pré-prints*, estudos exclusivamente teóricos, sem aplicação clínica, trabalhos duplicados, com amostra não relacionada à reabilitação física e protocolos de pesquisa

sem resultados. A partir da estratégia de busca e seleção descrita, os resultados encontrados são apresentados a seguir.

1.1.1 Capsulite Adesiva

A capsulite adesiva (CA), conhecida como "ombro congelado", é uma condição musculoesquelética inflamatória caracterizada por dor intensa e rigidez progressiva, com prejuízo significativo da amplitude de movimento (ADM) do ombro. Esse comprometimento funcional impacta diretamente as atividades da vida diária e a qualidade de vida dos pacientes, especialmente mulheres entre 40 e 60 anos (Zreik et al., 2016; Chan et al., 2017).

A CA pode ser classificada como primária, quando não há causa aparente, ou secundária, quando associada a condições como diabetes mellitus, hipotireoidismo ou traumatismos. O curso clínico da doença é dividido em três fases: dolorosa, rigidez e recuperação (Huang et al., 2020).

Na fase dolorosa, o paciente apresenta dor difusa e progressiva, predominante à noite e em repouso, com início de limitação da mobilidade. A fase de rigidez é marcada pela perda acentuada da ADM, sendo a rotação externa o movimento mais afetado, seguida pela abdução e flexão (Chan et al., 2017; Huang et al., 2020).

A redução da amplitude de movimento nestes planos está relacionada à fibrose e ao espessamento da cápsula articular inferior e anterior. Segundo Millar et al. (2022), a cápsula glenoumeral inferior apresenta contração e perda de distensibilidade nos estágios iniciais da doença, o que explica a limitação mais precoce da rotação externa — movimento que depende do alongamento dessa região durante a elevação e rotação do úmero. Essa restrição mecânica contribui para padrões motores compensatórios e aumento da dor, dificultando a execução de tarefas funcionais básicas.

Por fim, a fase de recuperação envolve a redução gradual da dor e a melhora progressiva da mobilidade, embora em alguns casos a ADM não seja totalmente restabelecida (Zreik et al., 2016).

O diagnóstico da CA é eminentemente clínico, baseado na história do paciente e na restrição de movimento ativo e passivo em mais de um plano. A rotação externa reduzida é considerada um dos principais marcadores clínicos da condição (Huang et al., 2020).

O tratamento conservador é a abordagem de primeira linha, com foco na reabilitação funcional e no controle da dor. Durante a fase dolorosa, as intervenções visam o alívio da dor e a

manutenção da mobilidade funcional com exercícios leves e analgesia. Na fase de rigidez, priorizam-se técnicas que promovam mobilidade articular e alongamento progressivo, respeitando os limites de dor (Chan et al., 2017). Na fase de recuperação, a terapia deve ser intensificada com foco no ganho funcional e no retorno às atividades diárias.

A adesão ao tratamento fisioterapêutico, combinada à compreensão das fases evolutivas da CA, é essencial para a definição de metas terapêuticas realistas e para o planejamento adequado da progressão dos exercícios ao longo do tempo (Gunawan et al., 2020).

1.1.2 Realidade Virtual em Saúde

A realidade virtual é um ambiente tridimensional gerado por computador que permite ao usuário interagir em tempo real com um cenário simulado. Inicialmente utilizada em contextos de entretenimento e treinamento, a RV passou a integrar outras áreas, como a educação, a psicologia e a saúde. Revisões recentes já investigaram o uso da RV no manejo de dor crônica e aguda, assim sua aplicação terapêutica tem se expandido especialmente devido à sua capacidade de distrair o usuário de estímulos nocivos, contribuindo para a modulação da dor e redução da ansiedade (Chuan et al., 2021).

Dois elementos essenciais definem a RV: imersão, que se refere à sensação de presença no ambiente virtual; e interação, que permite ao usuário executar ações e receber feedbacks do sistema. Essas características fazem da RV uma ferramenta valiosa em intervenções não farmacológicas para o controle da dor e ansiedade.

Inicialmente explorada em contextos como o tratamento de queimaduras, a RV evoluiu para ser integrada à reabilitação de pacientes com AVC, Parkinson, doenças ortopédicas e condições musculoesqueléticas crônicas. Em particular, sua capacidade de distrair o paciente da dor, promover movimentos funcionais em ambientes gamificados e oferecer feedbacks em tempo real tem sido considerada útil para favorecer a adesão terapêutica e o aprendizado motor (Scapin et al., 2018; Asadzadeh et al., 2021).

A utilização da realidade virtual na reabilitação de distúrbios musculoesqueléticos tem ganhado destaque, em parte, por sua associação com melhora na motivação e adesão ao tratamento, especialmente quando combinada a elementos de gamificação e interação remota (Berton et al., 2020). Interfaces gamificadas, sensores de movimento e ambientes imersivos passaram a ser utilizados para estimular a função motora, ampliar a adesão ao tratamento e

fornecer experiências reabilitadoras mais toleráveis, sobretudo em pacientes com dor persistente ou quadros musculoesqueléticos incapacitantes.

1.1.3 Fisioterapia com Realidade Virtual

A reabilitação imersiva assistida por RV tem se consolidado como uma abordagem promissora na fisioterapia, especialmente por sua capacidade de promover participação ativa, motivação contínua e imersão sensório-motora durante as sessões terapêuticas. Por meio da simulação de cenários realistas, tarefas gamificadas e feedbacks em tempo real, com a RV os pacientes podem experimentar movimento ou operação controlável, de forma a alcançar a reconstrução ou restauração de funções físicas e a adesão ao tratamento (Cai et al., 2021; Campo-Prieto et al., 2021).

Revisões recentes demonstram que a RV pode impactar positivamente variáveis como capacidade funcional, força muscular, amplitude de movimento, dor e qualidade de vida, sendo especialmente útil em condições neuromusculares e musculoesqueléticas (Asadzadeh et al., 2021). Em uma meta-análise com pacientes pós-AVC, Chen et al. (2022) observaram melhora significativa nas funções motoras e amplitude de movimento (ADM) dos membros superiores em protocolos que incluíram RV como suporte terapêutico.

Gumaa e Rehan Youssef (2019), ao revisar a eficácia da RV em reabilitação ortopédica, concluíram que a tecnologia é promissora para dor cervical crônica e síndrome do impacto do ombro. No entanto, os resultados permanecem inconclusivos em outras condições, indicando a necessidade de mais estudos clínicos de qualidade para chegar a conclusões mais sólidas. Mesmo com essa limitação, a RV representa uma alternativa viável para contextos em que a adesão à terapia é comprometida por fatores como medo do movimento, dor intensa ou desmotivação. Brepohl (2023) salienta que a realidade virtual pode auxiliar no redirecionamento atencional da dor, estimular a participação ativa e criar experiências mais toleráveis e seguras para pacientes com condições musculoesqueléticas crônicas. Assim, a incorporação dessa tecnologia ao arsenal terapêutico da fisioterapia deve considerar não apenas os desfechos clínicos, mas também aspectos motivacionais, ergonômicos e de acessibilidade.

1.1.4 A Realidade Virtual aplicada à capsulite adesiva

A aplicação da realidade virtual (RV) na reabilitação da capsulite adesiva (CA) tem ganhado destaque como abordagem complementar para lidar com os desafios característicos da doença, como a dor intensa na fase inicial, rigidez progressiva e baixa adesão ao tratamento tradicional devido ao curso prolongado dessa condição.

Estudos recentes têm investigado a eficácia da RV nesse contexto. Em um ensaio clínico randomizado, Demir et al. (2024) demonstraram que pacientes com CA submetidos a um programa de exercícios com suporte de RV apresentaram reduções estatisticamente significativas na dor e melhora em aspectos da qualidade de vida mental, quando comparados ao grupo controle tratado com fisioterapia convencional. Ambos os grupos foram submetidos a cinco sessões semanais durante quatro semanas, com ganhos em amplitude de movimento e funcionalidade.

Gunawan et al. (2020) compararam exercícios de alongamento com a técnica *Overhead Pulley* e jogos de RV em pacientes com ombro congelado, observando benefícios similares entre os grupos. Já Wankhade et al. (2022) relataram que a fisioterapia guiada por *headset* de RV, combinada com mobilização articular (técnica de Maitland), produziu resultados superiores em dor, amplitude de movimento e engajamento do paciente, em comparação à fisioterapia tradicional isolada.

No campo técnico, Mangal et al. (2017) e Lee et al. (2021) exploraram o uso de sensores como o Kinect para mensurar a mobilidade articular do ombro em pacientes com CA, sugerindo que sistemas de reabilitação baseados em sensores e gamificação podem ser usados em domicílio com boa aceitação e interatividade. Sagayam et al. (2020), por sua vez, propuseram um protótipo baseado em IoT e sensores ultrassônicos, mas com foco mais tecnológico do que clínico, com limitações quanto à aplicação prática.

A autora Brepohl (2023), em uma revisão narrativa focada no complexo do ombro, enfatiza que a RV pode ser uma aliada importante na reabilitação de quadros dolorosos, como a capsulite adesiva, ao proporcionar ambientes imersivos toleráveis, redirecionar a atenção da dor e incentivar a participação ativa mesmo em pacientes com medo de movimento. No entanto, a autora alerta para a ausência de protocolos personalizados, a falta de distinção entre os estágios clínicos da CA e o risco de exercícios inadequados para fases com limitação articular severa — reforçando a necessidade de softwares que respeitem o curso clínico da patologia.

A literatura destaca que o fornecimento de feedbacks sensório-motores através de exercícios com VR em tempo real, especialmente quando vinculados ao desempenho do usuário, podem favorecer o aprendizado motor, a motivação e a continuidade do tratamento (Asadzadeh et al., 2021). Tais elementos, aliados ao engajamento promovido por tarefas imersivas e responsivas, são considerados componentes relevantes na aplicabilidade terapêutica de sistemas de realidade virtual, especialmente em condições crônicas como a capsulite adesiva (Dejaco et al., 2024).

Jogos imersivos com realidade virtual integrados com estímulos motores em um ambiente lúdico e monitorável podem ter uma aplicabilidade clínica importante na condição de CA. No presente estudo, o software *Reach* será avaliado quanto à adequação dos planos de movimento que promove, à luz das restrições articulares típicas da CA e da aplicabilidade clínica para reabilitação funcional do ombro.

1.2 ÓCULOS META QUEST 2

Os óculos Meta Quest 2, desenvolvidos pela empresa Meta (anteriormente conhecida como Facebook Reality Labs), é um dispositivo de realidade virtual (RV) autônomo, sem fio, projetado inicialmente para proporcionar experiências imersivas em jogos, entretenimento e interações sociais (Meta, 2022). Equipado com resolução de 1832 x 1920 pixels por olho, taxa de atualização de 90 Hz, e o processador Qualcomm Snapdragon XR2, o aparelho oferece uma experiência visual de alta definição, com rastreamento eficiente do movimento corporal por meio de sensores internos e controladores intuitivos.

Sua fácil portabilidade e o custo relativamente acessível (cerca de 399 dólares no momento da realização deste estudo) tornam o Meta Quest 2 uma alternativa promissora também para o uso clínico, especialmente em programas de reabilitação física baseados em RV. A literatura destaca que a aceitação por parte dos pacientes tende a ser maior quando os dispositivos terapêuticos são intuitivos e envolventes, o que favorece a adesão ao tratamento (Sevcenko & Lindgren, 2022).

Nesse contexto, Carnevale et al. (2022) investigaram a acurácia do Meta Quest 2 em mensurar deslocamentos e rotações corporais, avaliando sua viabilidade como ferramenta de monitoramento da cinemática articular durante exercícios de reabilitação do ombro. O estudo comparou as medidas geradas pelo sistema de rastreamento interno (*inside-out tracking*) do *headset* com as obtidas por um sistema óptico de referência (Qualisys®), tradicionalmente

utilizado em laboratórios de biomecânica. Apesar de o Meta Quest 2 ter apresentado um erro absoluto maior que sistemas de alta precisão, os autores concluíram que sua performance foi suficientemente acurada para aplicações clínicas, especialmente considerando a praticidade, mobilidade sem fio e o baixo custo do equipamento. Eles defendem que, para intervenções fisioterapêuticas com pacientes com disfunções musculoesqueléticas do ombro, o Quest 2 representa uma opção viável e funcional.

1.3 SOFTWARE REACH

O *Reach Shoulder Health* é um software de realidade virtual voltado ao movimento e treinamento funcional de membros superiores, desenvolvido pela empresa norte-americana Triad Labs. Lançado em 2023, na versão 1.00.198, o sistema está disponível para dispositivos Meta Quest (Quest 2, 3, 3S e pro) e foi projetado com o suporte técnico de fisioterapeutas, embora ainda não possua aprovação da *Food and Drug Administration* como dispositivo médico. Sua missão é tornar a reabilitação uma experiência mais eficaz e agradável, utilizando tecnologia imersiva para coleta de dados em tempo real e criação de planos de cuidado dinâmicos.

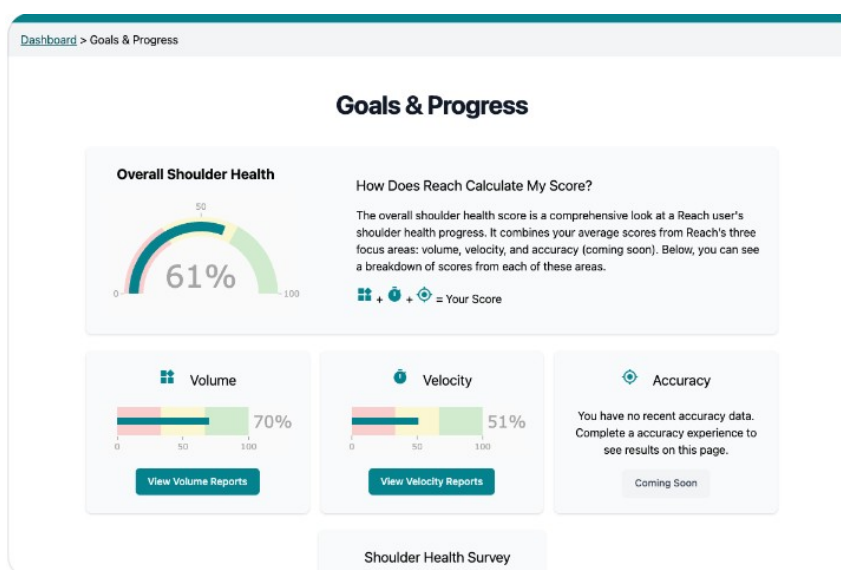
O Reach estrutura-se em uma fase avaliativa inicial seguida de cinco fases de movimento distintas. A experiência inicia-se com uma pesquisa de dor prévia, em que o usuário responde duas perguntas objetivas: “Qual o seu nível de dor em movimento?” e “Qual seu nível de dor em repouso?”, utilizando uma escala de 0 a 5. Após essa etapa, o usuário é conduzido ao Firefly Assessment, uma avaliação basal da capacidade funcional dos membros superiores, em que o jogador deve capturar vaga-lumes espalhados em diferentes direções no ambiente virtual, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Visão do jogador durante o jogo *Firefly Assessment*

Fonte: Reach VR, 2023.

Após a avaliação, o sistema propõe experiências diárias personalizadas que ajustam o nível de desafio de acordo com as limitações identificadas, promovendo a prática contínua e a progressão funcional. O progresso do usuário é monitorado através de um portal analítico online, que fornece relatórios e visualizações tridimensionais dos padrões de movimento. O painel *Goals and Progress* do Reach disponibiliza esses dados em formato gráfico, permitindo o acompanhamento longitudinal da evolução de volume, precisão e velocidade para cada braço avaliado conforme apresentado na Figura 2.

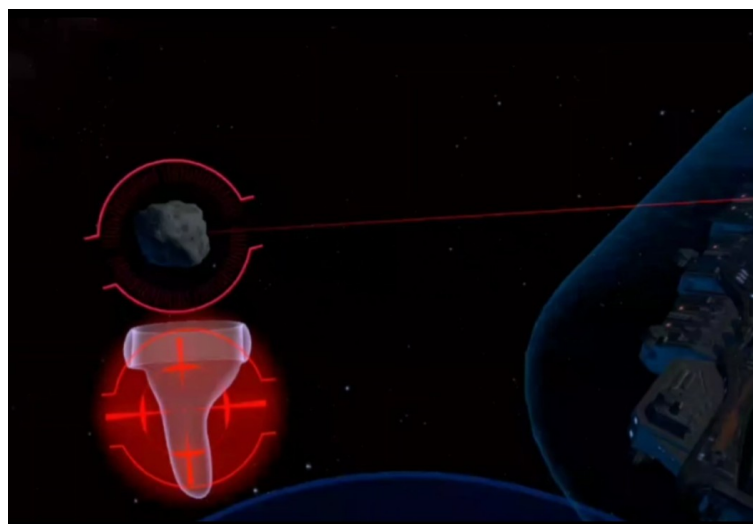
Figura 2 - Experiências diárias após a avaliação



Fonte: Reach VR, 2023.

Além da avaliação inicial, o Reach oferece cinco fases que exploram diferentes componentes do movimento funcional. A primeira fase chama-se *Space Gunner*, onde o usuário posiciona uma mira virtual sobre rochas espaciais e ativa alvos coloridos (azul para braço direito, vermelho para esquerdo), promovendo ações coordenadas entre alcance, posicionamento e controle visual-motor, como mostrado na Figura 3.

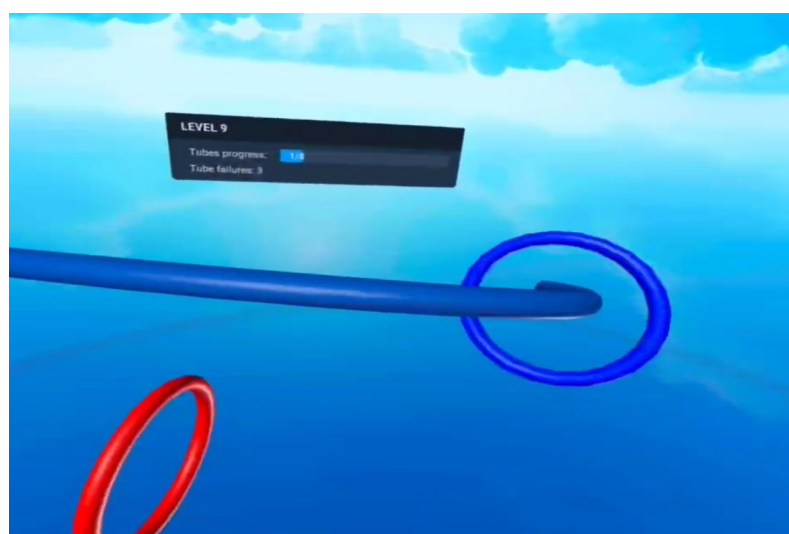
Figura 3 - Interface do jogo *Space Gunner*



Fonte: Reach VR, 2023.

A segunda fase é denominada *Tube Trouble*. Nela, o movimento é conduzido ao longo de tubos tridimensionais, exigindo que argolas sejam passadas com precisão por caminhos curvos e retos conforme o lado designado, ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Interface do jogo *Tube Trouble*



Fonte: Reach VR, 2023.

Bullseye é a quarta fase e simula um teste de acurácia, onde o jogador dispara flechas em alvos móveis flutuantes, enfatizando velocidade e precisão gestual, como demonstrado na Figura 5.

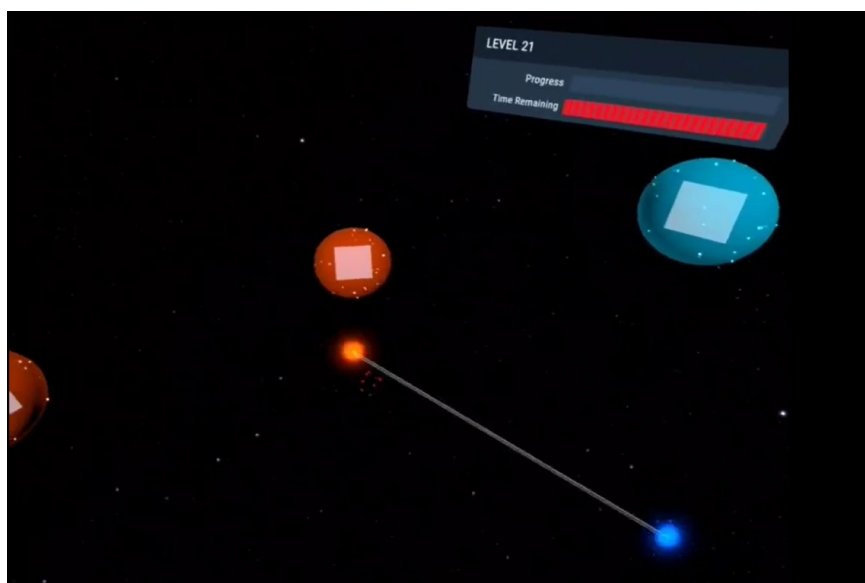
Figura 5 - Interface do jogo *Bullseye*



Fonte: Reach VR, 2023.

A quinta e última fase é denominada *Star Beams*. Ela requer que o usuário conecte formas geométricas idênticas espalhadas no espaço, estimulando integração sensório-motora e amplitude de movimento multissegmentar, como visto na Figura 6.

Figura 6 - Interface do jogo *Star Beams*



Fonte: Reach VR, 2023.

Do ponto de vista técnico, o software baseia sua medição principalmente no volume de movimento. O volume é estimado tridimensionalmente a partir da área total percorrida pelo braço do usuário. Essa métrica é registrada a cada centésimo de segundo por sensores.

1.4 PROBLEMA E PERGUNTA DE PESQUISA

Considerando a controvérsia e a complexidade inerentes ao tratamento da CA, bem como os riscos potenciais à segurança dos pacientes e a lacuna do conhecimento existente ao negligenciar o desenvolvimento e a validação de novas ferramentas terapêuticas, torna-se imperativo investigar a aplicabilidade do software de Realidade Virtual (RV) Reach na reabilitação dessa condição do ombro. Assim, a pergunta de pesquisa desse projeto se delinea da seguinte forma: O software de RV Reach demonstra potencial de aplicabilidade na abordagem terapêutica da CA do ombro?

1.5 JUSTIFICATIVA

A capsulite adesiva (CA) do ombro caracteriza-se por dor intensa e progressiva limitação da amplitude de movimento, impactando significativamente a funcionalidade e a qualidade de vida dos pacientes. Apesar da existência de múltiplas abordagens terapêuticas, a literatura aponta lacunas quanto à adesão ao tratamento, à eficácia de longo prazo e à adequação dos protocolos às diferentes fases da patologia (Brepohl, 2023).

Nesse cenário, a realidade virtual (RV) tem emergido como uma ferramenta promissora na reabilitação musculoesquelética, oferecendo um ambiente imersivo, interativo e potencialmente mais engajador. Estudos recentes indicam benefícios em variáveis como dor, função e amplitude de movimento (Asadzadeh et al., 2021; Wang et al., 2023), ainda que ressaltem a escassez de investigações que avaliem de forma crítica a aplicabilidade funcional e clínica dos softwares disponíveis, especialmente em populações específicas como pacientes com CA (Brepohl, 2023).

O dispositivo Meta Quest 2, por sua vez, representa um avanço técnico relevante ao permitir experiências imersivas sem fio, com maior mobilidade e facilidade de uso. Apesar de seu desenvolvimento voltado ao entretenimento, diferentes pesquisas sugerem sua viabilidade em contextos terapêuticos, desde que seja assegurada a precisão dos registros de movimento e a adaptação dos conteúdos às necessidades clínicas (Longo et al., 2023).

Dentre os desafios atuais, destaca-se a falta de critérios bem definidos para avaliar a adequação terapêutica de sistemas e design de softwares de RV aplicados à reabilitação do ombro. A presente pesquisa justifica-se por propor uma avaliação estruturada da aplicabilidade do software Reach — desenvolvido para o Meta Quest 2 — em um cenário simulado de limitação articular do ombro, com base em critérios clínico-funcionais extraídos da literatura. A análise integra dados cinemáticos tridimensionais e observações qualitativas, oferecendo uma perspectiva crítica sobre os pontos fortes e limitações da ferramenta, e contribuindo para o avanço da integração entre tecnologias digitais emergentes e a prática fisioterapêutica baseada em evidências.

1.6 ADEQUAÇÃO À LINHA DE PESQUISA

Esta dissertação insere-se na Linha de Pesquisa 1 – Tecnologias de Informação e Comunicação em Saúde/e-Saúde do Programa de Mestrado Profissional em Informática em

Saúde da UFSC. O estudo avalia a aplicabilidade de um software de realidade virtual como ferramenta de apoio à reabilitação funcional do ombro, especificamente na capsulite adesiva, dialogando diretamente com os eixos de desenvolvimento, análise e avaliação de tecnologias digitais aplicadas à prática clínica em saúde.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicabilidade do software de Realidade Virtual (RV) Reach na reabilitação da capsulite adesiva do ombro, com foco na análise de suas potencialidades e limitações em contexto simulado, a fim de subsidiar investigações futuras sobre sua utilização clínica.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os critérios fundamentais para a aplicabilidade de softwares de realidade virtual em programas de reabilitação do ombro, com base na revisão da literatura.
- Realizar sessões simuladas com o software Reach em diferentes condições de mobilidade articular, registrando observações sobre sua aplicabilidade em relação aos critérios pré-estabelecidos.
- Conduzir uma análise qualitativa sistemática dos dados coletados durante as simulações, evidenciando as potencialidades e limitações do software quanto à variedade gestual, estímulos motores e adaptação às restrições simuladas.

4 METODOLOGIA

Com base na revisão narrativa da literatura, foram definidos critérios fundamentais para avaliar a aplicabilidade terapêutica do software Reach em contextos simulados de reabilitação do ombro, especialmente na capsulite adesiva. Esses critérios incluem: (a) Promoção de movimentos funcionais nos planos da capsulite adesiva, com foco em abdução, flexão e rotação externa — movimentos mais afetados na capsulite adesiva (Millar et al. 2021; Gunawan et al., 2020); (b) Adaptação progressiva e resposta ao desempenho (Steiner et al., 2020); (c) Engajamento e motivação terapêutica (Asadzadeh et al., 2021); (d) Possibilidade de personalização clínica das tarefas, permitindo curadoria ativa por parte do profissional de saúde, com a seleção e ajuste de atividades baseadas em objetivos terapêuticos específicos — como a simulação de tarefas da vida diária pessoal (por exemplo, vestir uma camisa, alcançar prateleiras ou realizar cuidados com os cabelos) (Levac et al., 2015; Dejacó et al., 2024).

Para análise desses critérios, foram conduzidas duas sessões experimentais com o software Reach, utilizando o dispositivo Meta Quest 2. As simulações foram realizadas em dois cenários: uma condição de mobilidade livre e outra de restrição ativa nos movimentos de flexão, abdução e rotação externa, simulando os padrões motores típicos das fases iniciais da capsulite adesiva (Gunawan et al., 2020).

As sessões foram realizadas com o próprio pesquisador — fisioterapeuta com experiência clínica em reabilitação do ombro — atuando como participante, o que permitiu controle experimental sobre a execução dos gestos e aplicação padronizada das restrições articulares. Em ambas as condições, todas as fases do software (*Firefly Assessment*, *Space Gunner*, *Tube Trouble*, *Bullseye* e *Star Beams*) foram completadas nas sequências propostas pelo jogo e os dados cinemáticos foram registrados por meio de sistema de captura tridimensional Vicon Nexus (Oxford Metrics Group, UK), considerado padrão ouro para análise de movimento do ombro (van den Hoorn et al., 2025).

Os dados cinemáticos foram interpretados qualitativamente, com foco na análise do comportamento do software frente às limitações impostas, especialmente em relação aos critérios de promoção de movimentos funcionais e adaptação progressiva. Já os demais critérios — engajamento terapêutico e personalização clínica — foram avaliados a partir de observações sistemáticas realizadas durante as sessões, permitindo uma análise crítica de sua aplicabilidade na reabilitação funcional do ombro.

O experimento foi conduzido no dia 18/11/2024, no Laboratório de Biomecânica (Biomec) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando um sistema de captura de movimento tridimensional para análise cinemática dos gestos realizados.

4.1 PROCEDIMENTOS E COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada em duas sessões consecutivas de interação com o software Reach, empregando o dispositivo Meta Quest 2 como plataforma de realidade virtual. Cada sessão seguiu a seguinte sequência de etapas. A primeira foi a avaliação Inicial com Questionário de Dor.

Antes do início das tarefas motoras, o participante respondeu a um questionário subjetivo de dor composto por duas questões: uma pergunta referente à dor em movimento e outra à dor em repouso, ambas graduadas em uma escala de 0 a 5. Para fins de padronização do experimento, foi adotado o nível 5 (dor mais intensa) em ambas as condições, tanto na simulação de mobilidade livre quanto na restrita.

Em seguida, jogou-se a fase "*Firefly Assessment*", na qual o participante foi instruído a coletar vaga-lumes utilizando um copo virtual, primeiro com o braço direito e, posteriormente, com o esquerdo. Essa fase é projetada para avaliar a amplitude de movimento inicial do usuário. Conforme informado pelos desenvolvedores do software, a dificuldade das fases subsequentes é adaptada automaticamente com base na escala de dor subjetiva e no desempenho registrado durante a fase *Firefly*.

Após a fase de avaliação inicial, o participante respondeu ao *Shoulder Health Survey*, um questionário oficial do Reach composto por 13 perguntas que abordam o nível de dor e a limitação funcional em atividades da vida diária (AVDs), como alcançar prateleiras altas, lavar o cabelo e vestir roupas. O *Shoulder Health Survey* apresenta semelhanças estruturais com instrumentos validados na literatura, como o *Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand* (DASH) e o *Shoulder Pain and Disability Index* e na proposta do Reach serve como um acompanhamento longitudinal da evolução do paciente através do site oficial. Sua análise não foi incluída nos objetivos deste estudo. O questionário foi aplicado como parte do fluxo natural do software, mas seus dados não foram integrados à análise principal.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos a partir de sessões conduzidas com o próprio autor, fisioterapeuta com experiência em reabilitação do ombro, que atuou como único participante das simulações biomecânicas, assegurando controle experimental sobre os gestos executados.

4.2 EXECUÇÃO DAS FASES DO JOGO

Durante a experimentação, foram simulados dois cenários distintos para representar as seguintes condições clínicas de mobilidade do ombro.

- a. Mobilidade de ombro restrita: nesta condição, os movimentos de flexão, abdução e rotação externa foram limitados com o objetivo de reproduzir a restrição funcional típica observada nas fases iniciais da capsulite adesiva. De acordo com Gunawan et al. (2020), a limitação combinada desses três movimentos constitui um dos principais critérios clínicos para caracterização da capsulite adesiva, sendo amplamente utilizada como referência válida para a simulação de déficits articulares em protocolos experimentais de avaliação terapêutica. A restrição de movimento foi realizada sem uso de dispositivos físicos como coletes ou contenções. O autor limitou ativamente os gestos dos membros superiores, impedindo elevação acima de 45° nos planos de abdução, flexão e rotação externa, de forma a simular funcionalmente o padrão motor observado nas fases iniciais da CA.
- b. Mobilidade de ombro livre: neste cenário, os movimentos foram realizados sem restrições artificiais, permitindo a execução fluida e completa dos gestos propostos no ambiente virtual.

Em ambas as condições experimentais, o participante completou todas as fases disponibilizadas pelo software Reach, a saber: *Firefly Assessment*, *Space Gunner*, *Tube Trouble*, *Bullseye* e *Star Beams*. Cada fase do jogo foi executada integralmente, com duração média aproximada de 2,5 minutos. Durante a fase de avaliação inicial (*Firefly Assessment*), o participante foi instruído a capturar vaga-lumes utilizando um copo virtual, sendo que, na condição de mobilidade restrita, aplicou-se a limitação intencional da amplitude de movimento conforme o protocolo experimental. Essa estratégia de restrição controlada foi mantida consistentemente ao longo de todas as fases subsequentes, assegurando a uniformidade da simulação biomecânica entre as diferentes etapas do jogo.

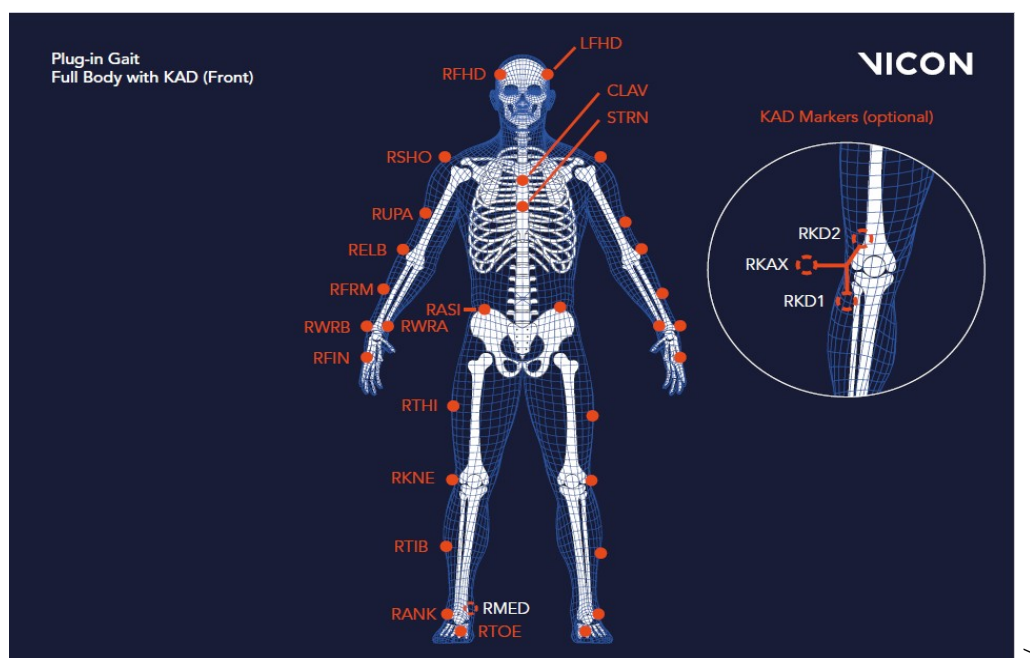
4.3 INSTRUMENTAÇÃO E CAPTURA DE MOVIMENTO

Para garantir a precisão na coleta de dados cinemáticos, foi utilizado um sistema de captura de movimento tridimensional VICON MX Systems composto por oito câmeras infravermelhas operando a uma frequência de aquisição de 200 Hz, com precisão espacial estimada em 0,1 mm em um volume de captura de 3m³.

O sistema foi calibrado seguindo protocolos padrão, incluindo a calibração dinâmica com a *Active Wand*, a verificação da qualidade da luminosidade ambiente, o ajuste da resolução e o foco individual das câmeras. Para a coleta, foram posicionados marcadores reflexivos de 14 mm nos principais pontos anatômicos definidos pelo modelo biomecânico *Plug-in Gait Full Body* conforme ilustrado nas figuras 7, 8 e 9.

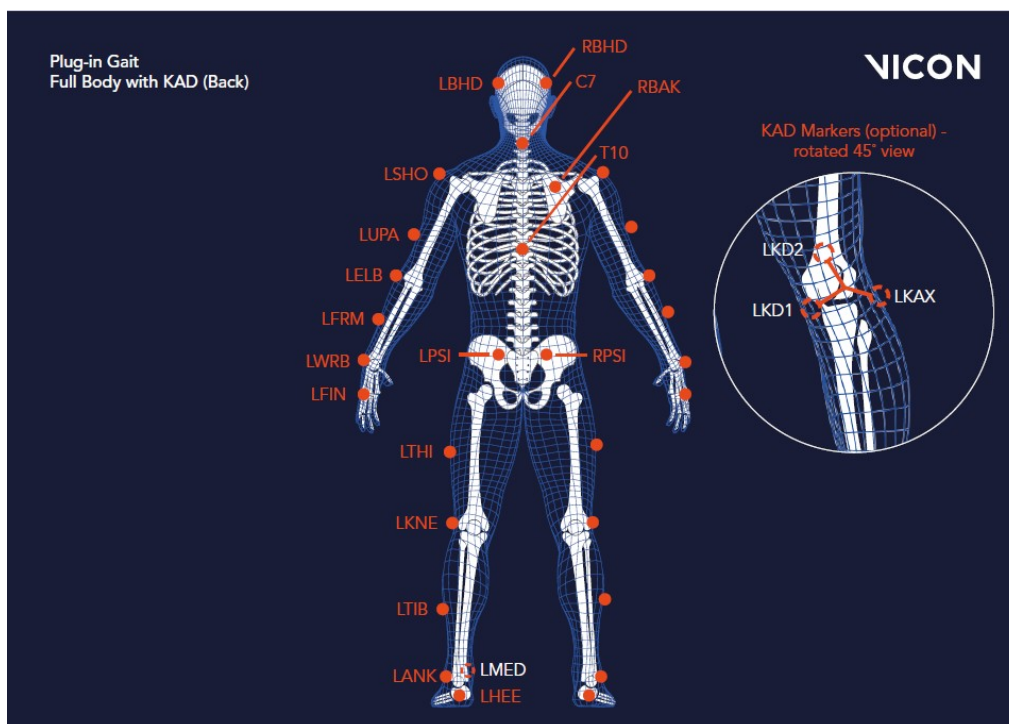
A captura dos movimentos foi realizada em tempo real enquanto o participante executava as fases do Reach sob ambas as condições simuladas (mobilidade restrita e livre). Os dados capturados foram exportados no formato .c3d (*Coordinate 3D File*), assegurando a integridade tridimensional das trajetórias para posterior análise cinemática.

Figura 7 - Modelo *Plug-in Gait Full Body*: vista anterior



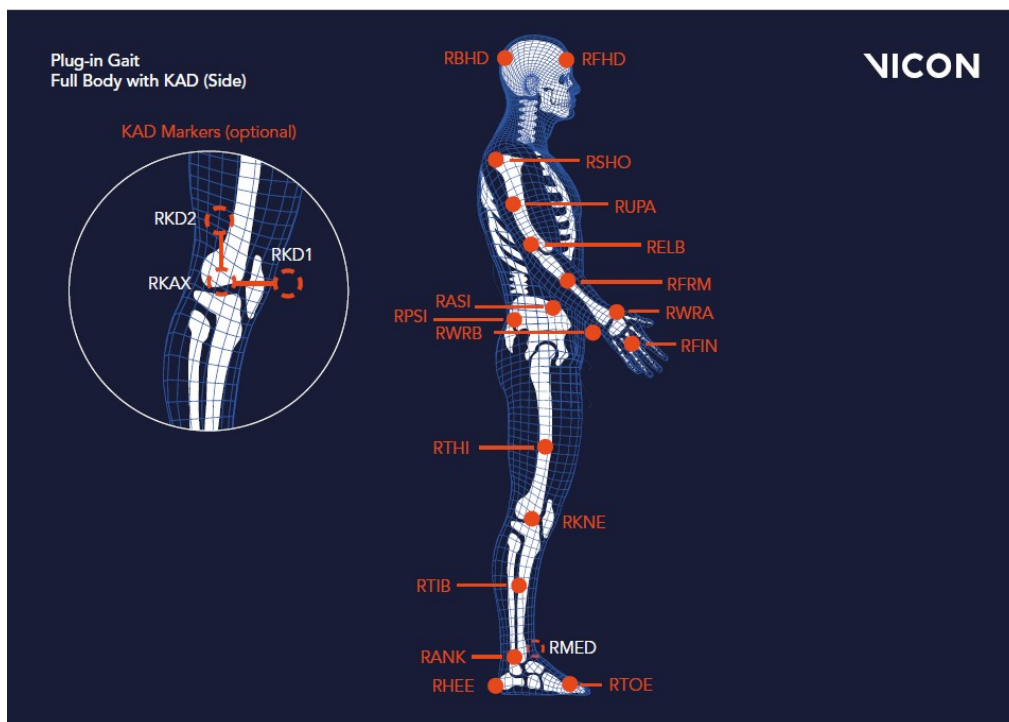
Fonte: Adaptado de Vicon (2023).

Figura 8 - Modelo *Plug-in Gait Full Body*: vista posterior



Fonte: Adaptado de Vicon (2023).

Figura 9 - Modelo *Plug-in Gait Full Body*: vista lateral



Fonte: Adaptado de Vicon (2023).

4.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

A análise biomecânica foi conduzida em múltiplas etapas, primeiramente foi realizado a rotulagem e preenchimento de falhas, onde os dados brutos foram tratados no software VICON Nexus para rotulagem automática dos marcadores e correção de *gaps* devido a oclusões. Adicionalmente, solicitou-se que o Vicon calculasse os ângulos dos membros superiores nos eixos x, y e z para a seguinte modelagem tridimensional, com exportação das coordenadas espaciais reconstruídas e dos ângulos articulares no formato .c3d para posterior análise.

Para a análise gráfica dos dados, os arquivos .c3d de todas as fases do jogo foram concatenados, unificando as sessões simuladas em uma única sequência temporal contínua. Esse processo exigiu o ajuste dos eixos de tempo, de forma que o término de uma sessão coincidissem corretamente com o início da seguinte, permitindo a análise conjunta dos gestos. Em seguida, foram selecionados apenas os marcadores anatômicos de interesse para os membros superiores, incluindo ombro esquerdo (LSHO), ombro direito (RSHO), cotovelo esquerdo (LELB), cotovelo direito (RELB), clavícula (CLAV) e esterno (STRN), e com base nesses dados, foram gerados gráficos boxplot para visualizar a distribuição da amplitude de movimento nos eixos de abdução, flexão e rotação externa. As rotinas de leitura, tratamento, concatenação e exportação dos dados foram desenvolvidas em Python e estão publicadas em notebooks interativos no Google Colab (REGISLUCIANO, 2025a; REGISLUCIANO, 2025b), garantindo a rastreabilidade e reprodutibilidade do processamento realizado.

Durante o processamento dos dados angulares computados pelo Vicon, foi identificado um número significativo de ângulos discrepantes (*outliers*), por exemplo, ângulos superiores a 200°, inconsistentes com a cinemática anatômica esperada. Uma possível explicação para essas anomalias está relacionada à conversão de ângulos de Euler, técnica que o Vicon utiliza para computar ângulos e que é suscetível a distorções em determinadas sequências de movimento e configurações articulares. Diante disso, aplicou-se o método estatístico do Intervalo Interquartil para desconsiderar *outliers* nas análises dos resultados.

Os dados também foram interpretados utilizando o software Mokka (Barre & Armand, 2014), que permitiu a visualização tridimensional dos gestos realizados, facilitando a análise qualitativa dos movimentos por fase.

Após a depuração dos dados, a análise foi organizada com base nos critérios previamente definidos de aplicabilidade terapêutica do software, conforme estabelecido na revisão da literatura. Os dados cinemáticos angulares foram interpretados à luz da capacidade do Reach em promover movimentos funcionais nos planos críticos da CA, modular progressivamente os desafios propostos, fornecer estímulos sensório-motores relevantes e apresentar comportamentos compatíveis com uma lógica clínica adaptativa. Essa abordagem permitiu confrontar os dados quantitativos com os elementos qualitativos observados durante as sessões, compondo um panorama crítico da atuação do software em contextos simulados.

5 RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação do software Reach, com foco em sua resposta às limitações impostas durante as simulações e organizados conforme os critérios previamente estabelecidos na metodologia, incluindo a promoção de movimentos funcionais relevantes à capsulite adesiva e a adaptação progressiva.

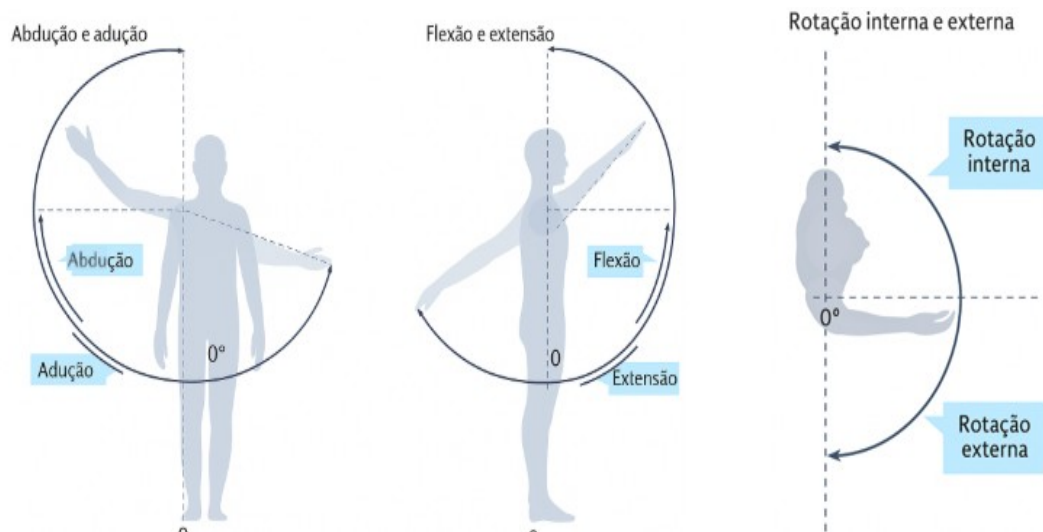
O gráfico do tipo boxplot permite visualizar, de forma resumida, a distribuição dos dados angulares durante as tarefas. A caixa representa o intervalo interquartil (entre os quartis Q1 e Q3), abrangendo 50% dos valores da amostra em torno da mediana — indicada por uma linha interna. Os valores fora dessa faixa seguem até os limites mínimos e máximos (bigodes), sendo aqueles que excedem o intervalo $Q1 - 1,5 \times (Q3 - Q1)$ ou $Q3 + 1,5 \times (Q3 - Q1)$ considerados outliers. Esses gráficos possibilitam observar a variabilidade, a simetria e o alcance gestual dos movimentos realizados ao longo das fases do jogo.

A análise considerou não apenas a distribuição da amplitude de movimento nos planos funcionais comprometidos na capsulite adesiva, mas também a forma como o sistema respondeu às restrições impostas pelas condições simuladas de mobilidade (livre e restrita).

Para contextualizar os dados apresentados na forma de boxplots, é importante compreender a relação entre os eixos cartesianos utilizados na modelagem biomecânica e os planos anatômicos do ombro. O eixo X representa os movimentos de abdução e adução no plano frontal; o eixo Y, os movimentos de flexão e extensão no plano sagital; e o eixo Z, os movimentos de rotação interna e externa no plano transversal. A Figura 10 ilustra esses planos X, Y e Z de movimento conforme descrito por Millar et al. (2022).

Destaca-se ainda que o ponto de 0° adotado nas análises não corresponde à posição anatômica clássica, mas a um referencial técnico definido pelo modelo biomecânico e pelo sistema de captura de movimento. Nesse modelo, os ângulos são calculados em relação aos eixos locais e ao vetor de orientação dos segmentos, sendo os valores positivos ou negativos interpretados a partir da variação cinemática do gesto, e não como posições clínicas absolutas.

Figura 10 - Planos de movimentos X, Y e Z

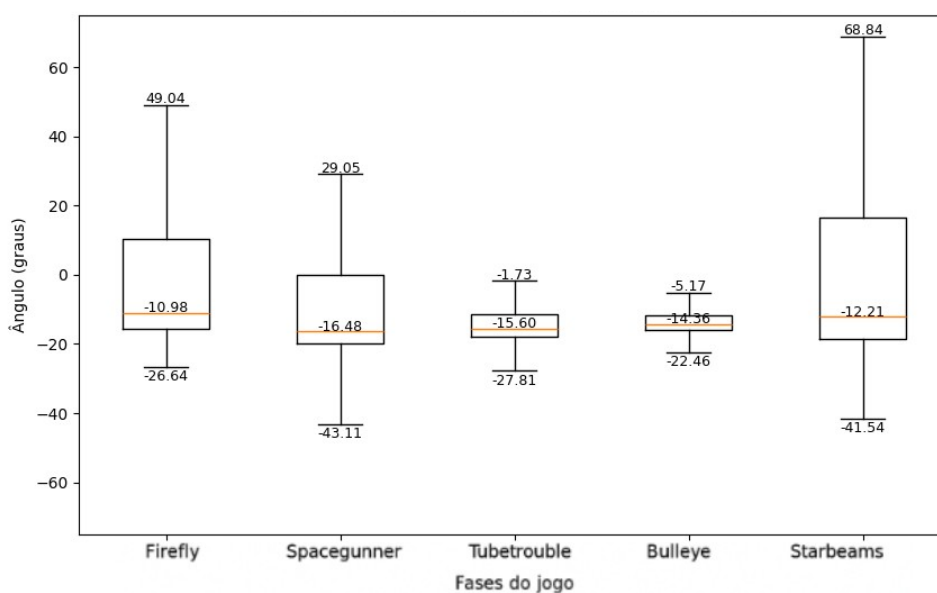


Fonte: Millar et al. (2022).

5.1 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES LIVRE E RESTRITA NO EIXO X

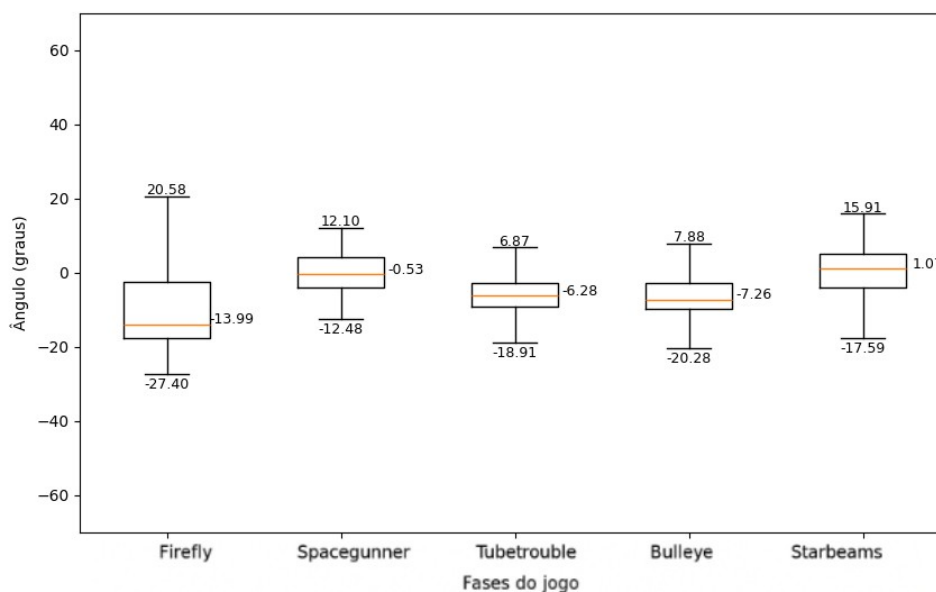
As Figuras 11 e 12 apresentam a distribuição da amplitude de movimento (ADM) no eixo X, referente aos gestos de abdução e adução do ombro, nas condições de mobilidade livre e restrita, respectivamente.

Figura 11 - Boxplot dos ângulos do eixo X na condição de “mobilidade livre”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Boxplot dos ângulos do eixo X na simulação de “mobilidade restrita”



Fonte: Elaborado pelo autor.

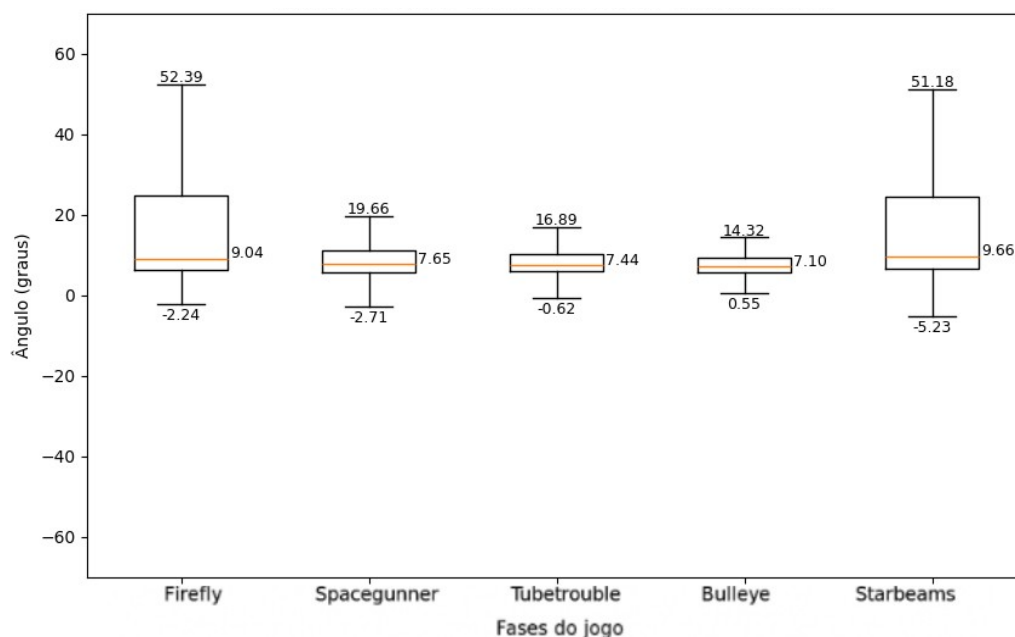
Na condição de mobilidade livre (Figura 11), observa-se que a fase *Firefly* — vagalumes, utilizada como referência inicial pelo software — já apresenta uma distribuição relativamente ampla dos movimentos, indicando bom envolvimento articular no plano frontal, ainda que com mediana negativa. As fases subsequentes demonstraram maior dispersão entre os valores, sugerindo gestos com maior amplitude e variabilidade, coerentes com a liberdade de movimento que realizamos na fase de avaliação nessa condição. A fase *Starbeams* foi a que mais se destacou, com uma mediana mais próxima daquela observada na fase de avaliação, refletindo padrão semelhante no eixo X. Em contraste, a fase *Tubetrouble* manteve um boxplot mais compacto e menos disperso, sinalizando menor exigência gestual no plano frontal.

Na condição de mobilidade restrita (Figura 12), os boxplots revelaram uma clara limitação da ADM. A fase *Firefly*, neste contexto, evidenciou esse comportamento restrito, funcionando como um marcador eficaz da limitação imposta, que se manteve, em maior ou menor grau como dito, ao longo das demais fases do jogo. Elas apresentaram caixas visivelmente comprimidas, menor dispersão e com medianas mais próximas a zero quando comparadas com a fase livre que ficaram mais negativas, refletindo também um padrão motor contido.

5.2 COMPARAÇÃO CONDIÇÕES LIVRE E RESTRITA NO EIXO Y

As Figuras 13 e 14 apresentam os resultados de amplitude de movimento (ADM) no eixo Y, correspondente aos gestos de flexão e extensão do ombro, nas condições de mobilidade livre e restrita, respectivamente.

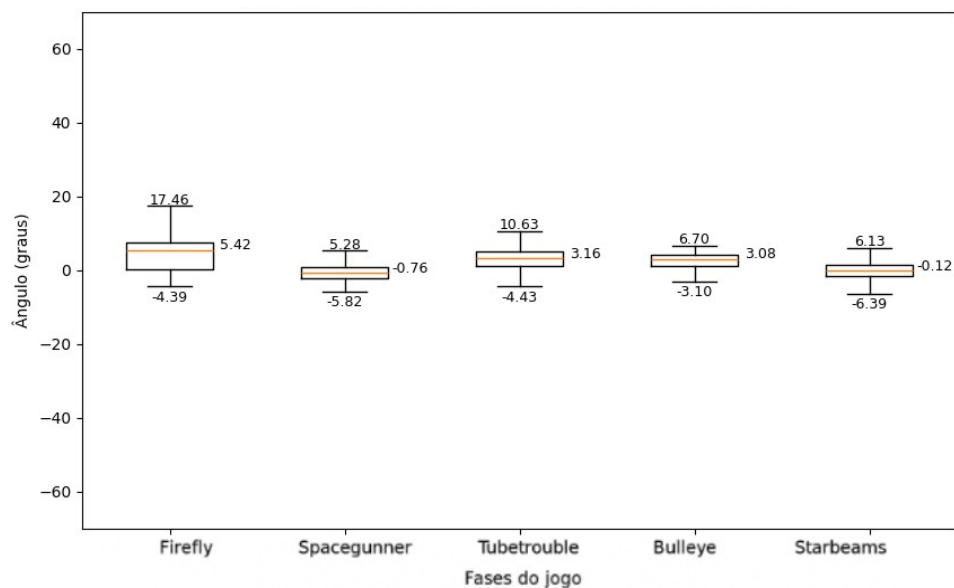
Figura 13 - Boxplot dos ângulos do eixo Y na condição de “mobilidade livre”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na condição de mobilidade livre (Figura 13), a fase *Firefly* demonstrou um padrão de movimentação mais funcional, com boa dispersão dos dados e maior amplitude, mesmo essa sendo uma fase avaliação inicial, sugerindo uma exploração maior do ambiente. As fases subsequentes mantiveram esse padrão, com destaque para *Starbeams*, cuja mediana elevada e grande dispersão reforçam o alto nível de exigência no plano sagital. Em contraste, fases como *Tubetrouble* e *Bulleye* apresentaram distribuição mais compacta, sinalizando menor demanda de flexão.

Figura 14 - Boxplot dos ângulos do eixo Y na simulação de “mobilidade restrita”



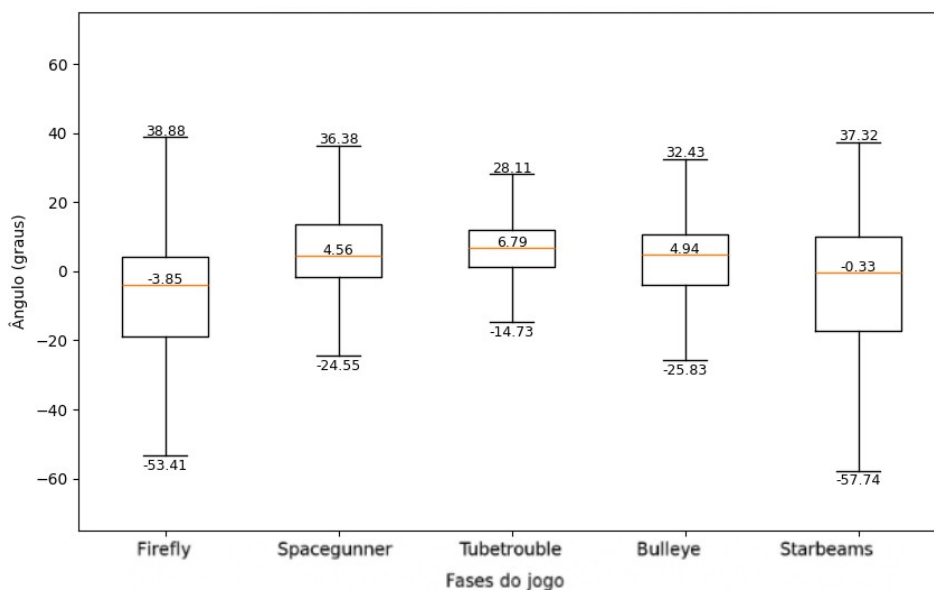
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na condição restrita (Figura 14), os boxplots revelaram uma diminuição considerável da ADM ao longo das fases. As caixas mais estreitas e medianas mais próximas de zero indicam movimentos mais contidos, compatíveis com a limitação simulada. Mesmo fases como *Starbeams*, que se destacaram na condição livre, apresentaram padrão restrito semelhante às demais.

5.3 COMPARAÇÃO CONDIÇÕES LIVRE E RESTRITA NO EIXO Z

As Figuras 15 e 16 mostram a distribuição da amplitude de movimento no eixo Z, que representa os movimentos de rotação interna e externa do ombro.

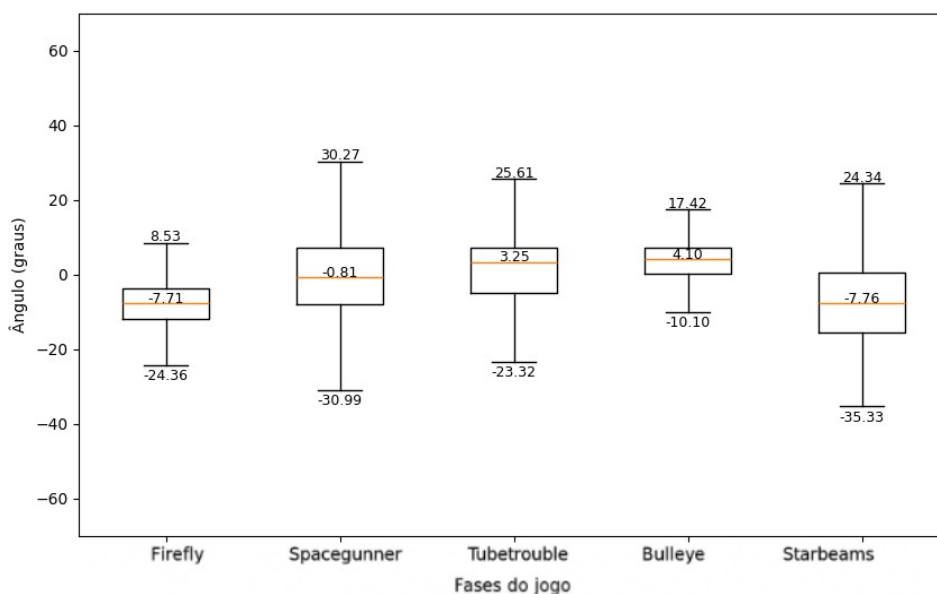
Figura 15 - Boxplot dos ângulos do eixo Z na condição de “mobilidade livre”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo na condição de mobilidade livre (Figura 15), o eixo Z apresentou, de maneira geral, ADM mais limitada em comparação aos demais. Algumas fases promoveram maior envolvimento rotacional mais ampla, como a fase *Starbeams*, com distribuição ampla dos dados e variação significativa entre os gestos, porém apresentando uma mediana negativa próxima a zero. A fase *Tubetrouble*, por outro lado, manteve um padrão mais limitado, com baixa variação e envolvimento rotacional reduzido, mesmo na ausência de simulação de dor.

Figura 16 - Boxplot dos ângulos do eixo Z na simulação de “mobilidade restrita”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na condição restrita (Figura 16), todos os boxplots mostraram ADM visivelmente reduzida, com movimentos concentrados e caixas comprimidas. O comportamento da fase *Firefly*, sob essa condição, novamente padrão rotacional limitado. Esse comportamento foi mantido de forma geral nas demais fases indicando que a rotação externa se apresentou com maior limitação.

Além dos dados cinemáticos relacionados à amplitude de movimento, foram também analisados aspectos funcionais do software Reach quanto ao fornecimento de feedbacks de desempenho e à possibilidade de ajuste individualizado das tarefas propostas. Durante as sessões, foram observadas as respostas do sistema em relação à entrega de estímulos motivacionais e à adequação dos desafios às condições simuladas. Essas informações complementares permitiram avaliar os critérios de engajamento terapêutico e personalização clínica, os quais são discutidos a seguir quanto à sua relevância na aplicabilidade do software para a reabilitação da CA.

6 DISCUSSÃO

A realidade virtual (RV) aplicada à reabilitação musculoesquelética tem se mostrado uma abordagem promissora, especialmente pela sua capacidade de promover engajamento, reduzir a dor e facilitar o controle motor funcional (Asadzadeh et al., 2021; Wang et al., 2023). No entanto, o sucesso clínico dessas ferramentas depende da aderência a critérios terapêuticos específicos, como a promoção de movimentos funcionais, adaptação progressiva aos diferentes níveis de limitação, entrega de feedbacks sensório-motores eficazes, uso adequado de elementos de gamificação, possibilidade de personalização clínica e coerência com as fases clínicas da patologia (Levac et al., 2015; Steiner et al., 2020; Brepohl, 2023; Dejacó et al., 2024).

Neste estudo, a análise da aplicabilidade do software Reach foi conduzida com base nesses critérios, avaliando sua capacidade de promover estímulos motores adequados em um contexto simulado de reabilitação da CA do ombro. Os dados foram interpretados a partir da comparação de amplitudes de movimento sob condições de mobilidade livre e restrita, com apoio de análise cinemática tridimensional.

6.1 PROMOÇÃO DE MOVIMENTOS FUNCIONAIS NOS PLANOS TERAPÊUTICOS DA CAPSULITE ADESIVA

A capsulite adesiva do ombro é clinicamente marcada por limitação progressiva da amplitude de movimento, com prejuízo mais acentuado nos planos de abdução, flexão e rotação externa, sobretudo nas fases iniciais da condição (Le et al., 2017). A reabilitação deve, portanto, promover o estímulo progressivo desses planos articulares incentivando o ganho gradual de amplitude.

Na condição de mobilidade restrita simulada, os dados do Reach demonstraram que o algoritmo respondeu à limitação com redução esperada nas amplitudes. Por exemplo, na fase *Firefly*, a mediana da abdução (eixo X) foi de $-13,9^\circ$, e nas demais fases manteve-se próxima a esse valor. A flexão (eixo Y) apresentou medianas entre -0.7 a 5.4 , e a rotação externa (eixo Z) variou de -7.7 a 4.1 , com caixas compactas nos boxplots, indicando um padrão motor com baixo envolvimento articular, coerente com o cenário de limitação funcional.

Contudo, na condição de mobilidade livre — onde se esperava estímulo mais amplo — as amplitudes ainda permaneceram conservadoras. A fase *Starbeams* foi a que mais se destacou em abdução, com valores variando de $-41,5^\circ$ a $68,8^\circ$, mas com mediana negativa ($-2,6^\circ$), sugerindo prevalência de gestos em adução leve. Na flexão, os valores máximos se aproximaram de 50° , mas as medianas das fases não ultrapassaram 10° . Já na rotação externa, mesmo sem restrição imposta, a amplitude permaneceu limitada, com valores concentrados abaixo de 15° , e distribuição angular inferior à esperada para indivíduos saudáveis (flexão $\sim 160^\circ$, abdução $\sim 150-165^\circ$, rotação externa $\sim 90^\circ$; Gill et al., 2020).

Esses achados indicam que, embora o Reach demonstre sensibilidade inicial às limitações impostas, sua resposta automatizada tende a operar com excesso de cautela, provavelmente pelo escore máximo de dor informado na fase inicial. A limitação dos estímulos motores mesmo na ausência de restrições articulares compromete o potencial do software em favorecer ganhos funcionais mais significativos, especialmente nas fases mais avançadas da reabilitação da CA, nas quais a ampliação progressiva da amplitude de movimento torna-se um objetivo terapêutico central.

6.2 ADAPTAÇÃO PROGRESSIVA E RESPOSTA AO DESEMPENHO

Softwares terapêuticos baseados em RV devem ser capazes de adaptar progressivamente o desafio proposto, ajustando parâmetros como amplitude, velocidade e complexidade gestual conforme o desempenho do paciente (Steiner et al., 2020; Brepohl, 2023). O Reach, embora apresente um mecanismo de adaptação automática a partir da fase *Firefly* e da escala de dor subjetiva, demonstrou limitações nesse aspecto. Os dados não indicaram uma progressão clara de exigência motora ao longo das fases do jogo, mesmo na condição de mobilidade livre. A ausência de um padrão crescente de amplitude ou complexidade compromete sua função como ferramenta de estímulo progressivo — um elemento-chave na recuperação funcional.

Essa resposta automatizada, ainda que segura, se não for supervisionada ou ajustada de maneira progressiva por um profissional capacitado poderá reduzir o potencial de ganho funcional da ferramenta.

6.3 ENGAJAMENTO E MOTIVAÇÃO TERAPÊUTICA

A entrega de feedbacks eficazes durante tarefas motoras é um componente essencial da reabilitação com suporte de realidade virtual — especialmente em condições com medo de movimento ou baixo controle motor, como na capsulite adesiva (Bourdin et al., 2019; Chan et al., 2017). Além disso, quando associados a indicadores de progresso e reforço positivo, esses feedbacks contribuem diretamente para o engajamento e a adesão do paciente ao tratamento (Dejaco et al., 2024).

No uso do Reach, observou-se um ambiente virtual com imersão visual básica, como validação de acertos em todas as fases e apresentação virtual atrativa. Entretanto, não foram identificados mecanismos de reforço positivo explícito, como recompensas progressivas, simulações de gestos funcionais voltados às atividades da vida diária (AVDs) ou retornos relacionados à qualidade e amplitude dos movimentos executados.

A ausência desses elementos de engajamento, sobretudo quando se busca níveis crescentes de complexidade ou quando há baixa autoeficácia como em fases mais avançadas da reabilitação da capsulite adesiva, tornam o software descolado da realidade clínica de reabilitação baseada em metas. Como apontado por Dejaco et al. (2024), o engajamento do paciente em programas de RV não depende apenas da ludicidade do ambiente, mas da percepção contínua de progresso funcional, controle sobre os próprios gestos e reconhecimento explícito do desempenho por parte do sistema. Dessa forma entende-se que há o risco de frustração terapêutica, caso o paciente não perceba progresso durante as sessões.

6.4 PERSONALIZAÇÃO CLÍNICA

Segundo Millar et al. (2021) a reabilitação da CA deve ser conduzida de forma supervisionada. A possibilidade de personalização das tarefas terapêuticas e de curadoria ativa por parte do profissional de saúde constitui um elemento central para a efetividade de intervenções com realidade virtual, sobretudo em condições como a capsulite adesiva, cujo curso clínico é dividido em estágios com demandas terapêuticas distintas. Como destacado por Dejaco et al. (2024), a ausência de ajustes individualizados compromete a precisão na progressão motora e pode reduzir significativamente o engajamento do paciente ao longo do processo reabilitativo.

No presente estudo, o Reach foi testado em sua configuração automatizada, sem intervenções manuais no controle das fases, uma vez que o software, em sua versão atual, não oferece suporte à personalização direta das tarefas ou dos desafios propostos. Essa limitação estrutural impede a modulação da complexidade gestual e o ajuste clínico das fases conforme os objetivos terapêuticos. Tal restrição afasta o sistema da prática clínica ideal, na qual a adaptação progressiva da carga, a seleção dos gestos e a curadoria das etapas são indispensáveis para garantir segurança, adesão e efetividade do tratamento, como já discutido por Levac et al. (2015) ao enfatizar a necessidade de recursos que auxiliem o fisioterapeuta na seleção terapêutica de jogos baseada em metas clínicas.

6.5 IMPLICAÇÃO DOS RESULTADOS E RELAÇÕES COM A PESQUISA

Os resultados desta pesquisa indicam que o software Reach apresenta características relevantes para a reabilitação da CA, como ambiente imersivo seguro, estruturação em fases e sensibilidade inicial a limitações articulares. No entanto, a análise baseada em critérios clínicos e funcionais evidenciou a necessidade de aprimoramentos voltados à personalização dos estímulos, ajuste progressivo da complexidade e maior alinhamento com as fases clínicas da patologia.

Os achados reforçam a importância de uma curadoria profissional ativa, capaz de modular o uso da ferramenta conforme o estágio clínico da CA — priorizando controle da dor e mobilidade leve nas fases iniciais, e promovendo amplitudes funcionais nas etapas de recuperação avançada.

A ausência de mecanismos de personalização manual, integração com os dados clínicos subjetivos e feedbacks específicos sobre o desempenho motor ressalta a necessidade de desenvolvimento de protocolos clínicos complementares, que associem o uso da RV a decisões terapêuticas individualizadas. Esses aspectos são especialmente relevantes em condições de evolução lenta e multifásica, como a CA.

Como contribuição, este estudo oferece subsídios para a avaliação crítica de softwares imersivos, como o Reach, sob uma perspectiva fisioterapêutica aplicada, destacando critérios essenciais para sua utilização clínica. Também aponta caminhos para o desenvolvimento de futuros recursos digitais, como dashboards interativos, trilhas de progressão adaptativas e sistemas de feedback ajustáveis, ampliando a integração entre tecnologia, prática clínica e ciência do movimento.

6.6 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Uma das limitações técnicas deste estudo foi a ausência de análise longitudinal por meio do sistema interno do software Reach. Devido a restrições logísticas do laboratório e à complexidade do uso do sistema Vicon Nexus para captura cinemática, não foi possível realizar sessões distribuídas no tempo, o que inviabilizou a avaliação dos efeitos cumulativos e da adaptação progressiva do usuário — um aspecto metodológico importante, já apontado na literatura como fundamental para mensurar a efetividade em longo prazo (Asadzadeh et al., 2021).

Outro ponto a ser considerado é a ausência de análise das respostas do *Shoulder Health Survey*, questionário integrado ao fluxo operacional do Reach. Embora tenha sido aplicado como parte do protocolo, seus dados não foram correlacionados com os registros cinemáticos nem utilizados para fins de avaliação longitudinal. Estudos futuros poderão explorar seu potencial como ferramenta complementar de monitoramento clínico.

Adicionalmente, o Reach solicita a avaliação subjetiva da dor apenas uma vez ao dia, o que limita sua responsividade intra-sessão. A impossibilidade de testar variações na escala de dor ou simular diferentes perfis clínicos dentro da mesma sessão impediu a análise de como o algoritmo ajustaria os desafios motores frente a flutuações de percepção dolorosa, comuns na capsulite adesiva.

Do ponto de vista técnico, também foram observadas perdas ocasionais de dados (gaps) na captação de movimento pelo sistema Vicon, decorrentes de obstruções, reflexos ou desalinhamentos dos marcadores. Embora comuns em sistemas ópticos, essas falhas podem interferir na continuidade da análise e afetar a reconstrução precisa de trajetórias, especialmente em gestos rápidos ou de transição entre fases. As correções realizadas no Vicon Nexus e as inspeções no software Mokka minimizaram esses efeitos, mas não os eliminaram completamente.

A simulação da limitação articular com indivíduos saudáveis permitiu maior controle experimental, mas representa uma limitação importante quanto à generalização dos resultados. Esse tipo de simulação não reproduz integralmente os fatores clínicos e psicossociais associados à capsulite adesiva real, como inflamação, hipervigilância, medo do movimento e baixa autoeficácia — aspectos que impactam diretamente a resposta ao exercício (De Baets et al., 2020).

O estudo também não incluiu múltiplas sessões clínicas com pacientes reais, o que impediu a observação de variáveis como fadiga muscular, sobrecarga articular ou o desenvolvimento de *cybersickness* — conjunto de sintomas como náuseas, tontura e desconforto visual, que pode ocorrer em exposições prolongadas à realidade virtual.

Embora a análise por boxplots tenha possibilitado uma visão geral da distribuição das amplitudes articulares nas diferentes fases do jogo, não se sabe se o software Vicon considera os potenciais compensações corporais durante a interpretação biomecânica dos gestos.

É importante destacar que este estudo não teve caráter intervencionista, nem buscou medir a eficácia clínica do Reach sobre desfechos terapêuticos. O foco foi a análise da aplicabilidade do software em contexto simulado, a partir de critérios técnicos, clínicos e funcionais. Futuros estudos que busquem avaliar os efeitos do Reach sobre dor, função e amplitude de movimento deverão ser conduzidos por meio de ensaios clínicos randomizados, com múltiplas sessões, acompanhamento longitudinal e amostras compostas por pacientes com CA em diferentes fases clínicas.

Contudo, essas limitações não invalidam os achados deste trabalho, mas reforçam a necessidade de interpretá-los com cautela ao extrapolar para contextos clínicos reais. Ao identificar lacunas na estrutura funcional do software e sugerir direções para aprimoramento técnico e terapêutico, este estudo contribui para o avanço do uso de tecnologias imersivas aplicadas à reabilitação do ombro.

7 CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como propósito avaliar a aplicabilidade do software de realidade virtual Reach no contexto da reabilitação da capsulite adesiva (CA) do ombro. O estudo se estruturou a partir da identificação de critérios clínico-funcionais na literatura científica, da realização de sessões simuladas com uso do software sob diferentes condições de mobilidade articular e da análise qualitativa de suas funcionalidades frente aos desafios terapêuticos da CA.

Os achados permitiram observar que o Reach incorpora elementos relevantes, como sensibilidade inicial às restrições impostas pela simulação de rigidez e ambiente seguro para prática motora. No entanto, foram identificadas limitações importantes quanto à progressão dos estímulos motores. O padrão de resposta do software mostrou-se conservador, com amplitudes articulares reduzidas mesmo em condição de mobilidade livre — especialmente nos planos de abdução, flexão e rotação externa. Esse comportamento restritivo sugere que o software compromete a progressão funcional nas fases mais avançadas da reabilitação, onde se exige maior desafio motor. Além disso, observou-se a ausência de gestos funcionais voltados às atividades da vida diária (AVDs), feedbacks sobre o desempenho e mecanismos de personalização ou curadoria ativa por parte do profissional de saúde.

Conclui-se, assim, que o Reach apresenta aplicabilidade limitada na reabilitação da CA, particularmente nas fases iniciais, onde segurança e engajamento são prioritários. Contudo, sua efetividade clínica em estágios mais avançados não é atendida de forma satisfatória, sendo recomendado apenas como recurso complementar, sempre sob supervisão profissional e embasado em protocolos estruturados.

No campo da Informática em Saúde, esta pesquisa contribui ao propor uma abordagem crítica sobre a avaliação funcional de softwares terapêuticos imersivos, considerando tanto aspectos técnicos quanto clínicos. Apesar das limitações metodológicas, os resultados oferecem subsídios para o aprimoramento da lógica interna desses sistemas, com ênfase em personalização, integração clínica e alinhamento com os objetivos terapêuticos da fisioterapia baseada em evidências.

REFERÊNCIAS

ALMUREEF, S. S.; ALI, W. M.; SHAMSI, S.; ZAHRANI, M. B. A. Effectiveness of mobilization with conventional physiotherapy in frozen shoulder: a systematic review. *Journal of Physical Therapy Science*, v. 32, n. 10, p. 686–692, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4361726>. Acesso em: 9 jun. 2025.

ASADZADEH, A.; SAMAD-SOLTANI, T.; SALAHZADEH, Z.; REZAEI-HACHESU, P. Effectiveness of virtual reality-based exercise therapy in rehabilitation: a scoping review. *Informatics in Medicine Unlocked*, v. 23, 100562, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.imu.2021.100562>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BARRE, A.; ARMAND, S. Mokka: a free, open-source software for motion capture data visualization and analysis. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, n. 84, p. 24–30, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/sm/2014006>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BAVAN, L. et al. Adherence monitoring of rehabilitation exercise with inertial sensors: a clinical validation study. *Gait & Posture*, v. 70, p. 211–217, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.03.008>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BERTON, A. et al. Virtual reality, augmented reality, gamification, and telerehabilitation: psychological impact on orthopedic patients' rehabilitation. *Healthcare*, v. 8, n. 3, p. 293, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/healthcare8030293>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BOURDIN, P.; MARTINI, M.; SANCHEZ-VIVES, M. V. Altered visual feedback from an embodied avatar unconsciously influences movement amplitude and muscle activity. *Scientific Reports*, v. 9, 19747, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56034-5>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BREALEY, S. et al. Surgical treatments compared with early structured physiotherapy in secondary care for adults with primary frozen shoulder: the UK FROST three-arm RCT. *Health Technology Assessment (Winchester, England)*, v. 24, n. 71, p. 1–162, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3310/hta24710>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BREPOHL, P. C. A.; LEITE, H. Virtual reality applied to physiotherapy: a review of current knowledge. *Virtual Reality*, v. 27, p. 71–95, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00654-2>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CAI, H. et al. Evaluating the effect of immersive virtual reality technology on gait rehabilitation in stroke patients: a study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*, v. 22, n. 1, p. 91, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13063-021-05031-z>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CAMPO-PRIETO, P.; CANCELA, J. M.; RODRÍGUEZ-FUENTES, G. Immersive virtual reality as physical therapy in older adults: present or future (systematic review). *Virtual Reality*, v. 25, n. 3, p. 801–817, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00495-x>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CHALLOUMAS, D. et al. Comparison of treatments for frozen shoulder: a systematic review and meta-analysis. *JAMA Network Open*, v. 3, n. 12, e2029581, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.29581>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CHAN E, FOSTER S, SAMBELL R, LEONG P. Clinical efficacy of virtual reality for acute procedural pain management: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2018 Jul 27;13(7):e0200987. doi: 10.1371/journal.pone.0200987. PMID: 30052655; PMCID: PMC6063420. Acesso em: 9 jun. 2025.

CHEN, J.; OR, C. K.; CHEN, T. Effectiveness of using virtual reality-supported exercise therapy for upper extremity motor rehabilitation in patients with stroke: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Medical Internet Research*, v. 24, n. 6, e24111, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2196/24111>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CHEN, Y.-P. et al. Wearable motion sensor device to facilitate rehabilitation in patients with shoulder adhesive capsulitis: pilot study to assess feasibility. *Journal of Medical Internet Research*, v. 22, n. 7, e17032, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2196/17032>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CHUAN, A. et al. Virtual reality for acute and chronic pain management in adult patients: a narrative review. *Anaesthesia*, v. 76, n. 5, p. 695–704, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/anae.15202>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CUI, J.; YEH, S.-C.; LEE, S.-H. Wearable sensors integrated with virtual reality: a self-guided healthcare system measuring shoulder joint mobility for frozen shoulder. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/7681237>. Acesso em: 9 jun. 2025.

DEMIR, O. B. et al. Effects of virtual reality exercise on pain, joint motion, and quality of life in patients with frozen shoulder: a randomized controlled study. *Physiotherapy Theory and Practice*, p. 1–12, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593985.2024.2443027>. Acesso em: 9 jun. 2025.

DEJACO, B. et al. Experiences of physiotherapists considering virtual reality for shoulder rehabilitation: a focus group study. *Digital Health*, v. 10, 20552076241234738, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/20552076241234738>. Acesso em: 9 jun. 2025.

DIAS, D. Eficácia da mobilização com movimento de Mulligan em pacientes com dor no ombro. 2020. 200 f. il. [Manuscrito]. Salvador: Daniela Dias da Silva Garzedin. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/32628>. Acesso em: 9 jun. 2025.

DYER, B. P. et al. Diabetes as a risk factor for the onset of frozen shoulder: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*, v. 13, n. 1, e062377, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-062377>. Acesso em: 9 jun. 2025.

DOLGANOV, M. V.; KARPOVA, M. I. [Virtual reality in upper extremity dysfunction: specific features of usage in acute stroke]. *Voprosy Kurortologii, Fizioterapii, I Lechebnoi*

Fizicheskoj Kultury, v. 96, n. 5, p. 19–28, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.17116/kurort20199605119>. Acesso em: 9 jun. 2025.

EXPERT REVIEWS. Meta Quest 2 review: the only VR headset you need. 2020. Disponível em: <https://www.expertreviews.co.uk/headsets/1412409/oculus-quest-2-review-uk>. Acesso em: 10 jun. 2024.

GILL, T. K. et al. Shoulder range of movement in the general population: age and gender stratified normative data using a community-based cohort. *BMC Musculoskeletal Disorders*, v. 21, n. 1, 676, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03665-9>. Acesso em: 9 jun. 2025.

GUNAWAN, D.; KUSHARYANINGSIH, R. H.; HANDAJANI, N. I. Association between stretching exercise with virtual reality game and over head pulley of frozen shoulder patients. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, v. 14, n. 2, p. 1507–1512, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.37506/ijfmt.v14i2.3138>. Acesso em: 9 jun. 2025.

GUMAA, M.; REHAN YOUSSEF, A. Is virtual reality effective in orthopedic rehabilitation? a systematic review and meta-analysis. *Physical Therapy*, v. 99, n. 10, p. 1304–1325, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ptj/pzz093>. Acesso em: 9 jun. 2025.

HAERING, D.; RAISON, M.; BEGON, M. Measurement and description of three-dimensional shoulder range of motion with degrees of freedom interactions. *Journal of Biomechanical Engineering*, v. 136, n. 8, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4027665>. Acesso em: 9 jun. 2025.

HANCHARD, N. C. A. et al. Physiotherapy for primary frozen shoulder in secondary care: developing and implementing stand-alone and post-operative protocols for UK FROST and inferences for wider practice. *Physiotherapy*, v. 107, p. 150–160, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physio.2019.07.004>. Acesso em: 9 jun. 2025.

HAND, C. et al. Long-term outcome of frozen shoulder. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, v. 17, n. 2, p. 231–236, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jse.2007.05.009>. Acesso em: 9 jun. 2025.

KUMAR, R. R. P. et al. Real-time range of motion measurement of physical therapeutic exercises. *Journal of Computer and Communications*, v. 5, n. 9, p. 16–27, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jcc.2017.59003>. Acesso em: 9 jun. 2025.

LAVAR, K. E. et al. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/14651858>. Acesso em: 9 jun. 2025.

LE, H. V. et al. Adhesive capsulitis of the shoulder: review of pathophysiology and current clinical treatments. *Shoulder & Elbow*, v. 9, n. 2, p. 75–84, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1758573216676786>. Acesso em: 9 jun. 2025.

LEE, S.-H. et al. Motor indicators for the assessment of frozen shoulder rehabilitation via a virtual reality training system. *Electronics*, v. 10, n. 6, 740, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics10060740>. Acesso em: 9 jun. 2025.

LEVAC, D.; ESPY, D.; FOX, E.; PRADHAN, S.; DEUTSCH, J. E. “Kinect-ing” with clinicians: a knowledge translation resource to support decision making about video game use in rehabilitation. *Physical Therapy*, Oxford, v. 95, n. 3, p. 426–440, mar. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2522/ptj.20130618>. Acesso em: 09 jun. 2025.

LONGO, U. G. et al. Immersive virtual reality for shoulder rehabilitation: evaluation of a physical therapy program executed with oculus quest 2. *BMC Musculoskeletal Disorders*, v. 24, n. 1, 859, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06861-5>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MANGAL, N. K.; PAL, S.; KHOSLA, A. Frozen shoulder rehabilitation using Microsoft Kinect. In: *2027 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT)*. Anais [...], p. 1–6, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IGEHT.2017.8094043>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MERTENS, M. G. C. A. M. et al. Factors influencing treatment outcome of physical therapy in frozen shoulder patients: a systematic review. *European Journal of Physiotherapy*, v. 24, n. 3, p. 174–190, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21679169.2020.1827029>. Acesso em: 9 jun. 2025.

META. Meta Quest 2. 2022. Disponível em: <https://www.meta.com/en/products/oculus-quest-2/>. Acesso em: 19 fev. 2023.

MILLAR, N. L. et al. Frozen shoulder. *Nature Reviews Disease Primers*, v. 8, 59, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41572-022-00386-2>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MINNS LOWE, C. et al. Clinical effectiveness of non-surgical interventions for primary frozen shoulder: a systematic review. *Journal of Rehabilitation Medicine*, v. 51, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2340/16501977-2578>. Acesso em: 9 jun. 2025.

NICHOLAS, M. et al. The IASP classification of chronic pain for ICD-11: chronic primary pain. *Pain*, v. 160, n. 1, p. 28–37, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001390>. Acesso em: 9 jun. 2025.

NOROUZI-GHEIDARI, N. et al. Feasibility, safety and efficacy of a virtual reality exergame system to supplement upper extremity rehabilitation post-stroke: a pilot randomized clinical trial and proof of principle. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 1, p. 113, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17010113>. Acesso em: 14 ago. 2024.

OCULUS. Rezzil One. 2023. Disponível em: https://www.oculus.com/experiences/quest/3600836956645933/?locale=pt_BR. Acesso em: 25 mar. 2023.

OTA, T.; NAKAMURA, T.; KUZUOKA, H. Effects of gamification and communication in virtual reality frozen shoulder rehabilitation for enhanced rehabilitation continuity. *IEEE*

Access, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279269>. Acesso em: 19 jan. 2025.

PAGE, M. J. et al. Manual therapy and exercise for adhesive capsulitis (frozen shoulder). *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011275>. Acesso em: 2 dez. 2024.

PANDEY, V.; MADI, S. Clinical guidelines in the management of frozen shoulder: an update! *Indian Journal of Orthopaedics*, v. 55, n. 2, p. 299–309, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43465-021-00351-3>. Acesso em: 3 mar. 2025.

PATEL, R. et al. A comprehensive update of adhesive capsulitis and minimally invasive treatment options. *Psychopharmacology Bulletin*, v. 50, n. 4 Suppl 1, p. 91–107, 2020. Acesso em: 29 jun. 2024.

REGISLUCIANO. muidadorcotovelo. [código-fonte em Python]. Disponível em: <https://colab.research.google.com/gist/regisluciano/5cd57f68b3a1e7d9a2ade46cd5eb3806/muidadorcotovelo.ipynb>. Acesso em: 8 maio 2025.

REGISLUCIANO. muidadorlivre. [código-fonte em Python]. Disponível em: <https://colab.research.google.com/gist/regisluciano/f2e4c505157e5c0835d536893fb62dfb/muidadorlivre.ipynb>. Acesso em: 8 maio 2025.

SAGAYAM, K. M. et al. IoT based virtual reality game for physio-therapeutic patients. *Annals of Emerging Technologies in Computing*, v. 4, n. 4, p. 39–51, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33166/AETiC.2020.04.005>. Acesso em: 10 out. 2024.

SCAPIN, S. et al. Virtual reality in the treatment of burn patients: a systematic review. *Burns*, v. 44, n. 6, p. 1403–1416, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2017.11.002>. Acesso em: 26 nov. 2024.

SEVCENKO, K.; LINDGREN, I. The effects of virtual reality training in stroke and Parkinson's disease rehabilitation: a systematic review and a perspective on usability. *European Review of Aging and Physical Activity*, v. 19, n. 1, 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s11556-022-00283-3>. Acesso em: 18 jul. 2024.

STEINER, B.; ELGERT, L.; SAALFELD, B.; WOLF, K. H. Gamification in rehabilitation of patients with musculoskeletal diseases of the shoulder: scoping review. *JMIR Serious Games*, Toronto, v. 8, n. 3, e19914, 25 ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2196/19914>. Acesso em: 22 abr. 2025.

TANG, P. et al. The efficacy of virtual reality on the rehabilitation of musculoskeletal diseases: umbrella review. *Journal of Medical Internet Research*, v. 27, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.2196/64576>. Acesso em: 26 abr. 2025.

TECHRADAR. Meta Quest 2 review: Meta Quest 2 offers small changes that make big differences. 2022. Disponível em: <https://www.techradar.com/reviews/oculus-quest-2-review>. Acesso em: 8 jun. 2024.

VAN DEN HOORN, W. et al. The future of clinical active shoulder range of motion assessment, best practice, and its challenges: narrative review. *Sensors*, v. 25, 667, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25030667>. Acesso em: 21 nov. 2024.

VICON MOTION SYSTEMS LTD. Marker placement for Plug-in Gait full body model. 2023. Disponível em: <https://help.vicon.com/space/Nexus216/11607226/Full+body+modeling+with+Plug-in+Gait>. Acesso em: 27 abr. 2025.

WHELTON, C.; PEACH, C. A. Review of diabetic frozen shoulder. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, v. 28, n. 3, p. 363–371, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00590-017-2068-8>. Acesso em: 13 set. 2024.

WANKHADE, S.; PHANSOPKAR, P.; CHITALE, N. Effect of virtual reality aided physical therapy in adjunct to traditional therapy in frozen shoulder patients. *Journal of Medical Pharmaceutical and Allied Sciences*, v. 11, n. 4, p. 5167–5171, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.55522/jmpas.V11I4.1314>. Acesso em: 6 jun. 2025.

WANG, L. et al. Positive effects of neuromuscular exercises on pain and active range of motion in idiopathic frozen shoulder: a randomized controlled trial. *BMC Musculoskeletal Disorders*, v. 24, n. 1, 50, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06173-8>. Acesso em: 2 ago. 2024.