

**SIMULADORES CIRÚRGICOS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA SOBRE O USO DE REALIDADE VIRTUAL E HÁPTICA*****SURGICAL SIMULATORS: AN INTEGRATIVE REVIEW ON THE USE OF VIRTUAL REALITY AND HAPTICS******SIMULADORES QUIRÚRGICOS: UNA REVISIÓN INTEGRATIVA SOBRE EL USO DE REALIDAD VIRTUAL Y HÁPTICA***Alexandre da Silva Mota<sup>1</sup>, Wanderson Alexandre da Silva Quinto<sup>2</sup>

e757995

<https://doi.org/10.47820/recima21.v7i5.7995>

PUBLICADO: 05/2026

**RESUMO**

O aprendizado cirúrgico enfrenta altos custos e riscos, tornando a simulação indispensável. Contudo, plataformas virtuais tradicionais carecem de percepção tátil, o que dificulta o controle de força do aprendiz e eleva o risco de lesões iatrogênicas. Objetivo: Avaliar criticamente as evidências científicas de alto rigor metodológico sobre a eficácia e as limitações dos simuladores de Realidade Virtual (RV) com *feedback* háptico no treinamento operatório. Metodologia: Realizou-se uma revisão integrativa estruturada com buscas nas bases de dados PubMed, Scopus e Cochrane. A amostra final consolidou-se em sete estudos (dois ensaios clínicos randomizados e cinco revisões sistemáticas) publicados entre 2022 e 2026, voltados estritamente para a educação cirúrgica médica. Resultados: A integração de *feedback* háptico demonstrou benefícios consistentes na precisão micromotora e perfuração óssea, reduzindo falhas técnicas como a folga de mergulho. Em contrapartida, em cirurgias abertas de grande tração, braços robóticos fixos impõem restrições ergonômicas. Adicionalmente, a heterogeneidade e o excesso de estímulos virtuais elevam a carga cognitiva, o que pode impactar o desempenho do residente. Apesar dos altos custos, há custo-efetividade favorável em longo prazo pela mitigação de erros operatórios. Conclusão: A simulação háptica atua como um recurso promissor e transicional. Contudo, não substitui métodos tradicionais baseados em cadáveres em procedimentos abertos de grande porte. O currículo cirúrgico híbrido desponta como o modelo adequado para o desenvolvimento de proficiência técnica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Realidade virtual. *Feedback* háptico. Treinamento por simulação. Educação médica. Competência clínica.

**ABSTRACT**

*Surgical learning faces high costs and risks, making simulation indispensable. However, traditional virtual platforms lack tactile perception, hindering the trainee's force control and increasing the risk of iatrogenic injuries. Objective: To critically evaluate scientific evidence of high methodological rigor regarding the use of virtual reality and haptic feedback in operative training. Methodology: A structured integrative review was conducted using PubMed, Scopus, and Cochrane databases. The final sample comprised seven studies published between 2022 and 2026. Results: Haptic feedback demonstrated consistent benefits in micromotor precision and bone drilling, reducing technical errors such as drill plunge distance. Conversely, in open surgeries requiring high traction, fixed robotic arms impose ergonomic restrictions. Additionally, the heterogeneity and excess of virtual stimuli elevate*

<sup>1</sup> Mestrando no Programa de Cirurgia e Pesquisa Experimental- UEPA.

<sup>2</sup> Doutor em Psicologia- UEPA.



*cognitive load, which may impact resident performance. Despite high costs, there is favorable long-term cost-effectiveness due to the mitigation of operative errors. Conclusion: Haptic simulation acts as a promising transitional resource. However, it does not replace traditional cadaver-based methods in large-scale open procedures. The hybrid surgical curriculum emerges as an adequate model for developing technical proficiency.*

**KEYWORDS:** *Virtual reality. Haptic feedback. Simulation training. Medical education. Clinical competence.*

### **RESUMEN**

*El aprendizaje quirúrgico enfrenta altos costos y riesgos, haciendo indispensable la simulación. Sin embargo, las plataformas virtuales tradicionales carecen de percepción táctil, lo que dificulta el control de la fuerza por parte del aprendiz y eleva el riesgo de lesiones iatrogénicas. Objetivo: Evaluar críticamente la evidencia científica de alto rigor metodológico sobre la eficacia y las limitaciones de los simuladores de Realidad Virtual (RV) con retroalimentación háptica en el entrenamiento operatorio. Metodología: Se realizó una revisión integrativa estructurada en las bases de datos PubMed, Scopus y Cochrane. La muestra final comprendió siete estudios publicados entre 2022 y 2026. Resultados: La retroalimentación háptica demostró beneficios consistentes en la precisión micromotora y perforación ósea, reduciendo fallas técnicas como la distancia de penetración de la broca. En contraste, en cirugías abiertas de gran tracción, los brazos robóticos fijos imponen restricciones ergonómicas. Además, la heterogeneidad y el exceso de estímulos virtuales elevan la carga cognitiva, lo que puede afectar el desempeño del residente. A pesar de los altos costos, existe un costo-efectividad favorable a largo plazo por la mitigación de errores operatorios. Conclusión: La simulación háptica actúa como un recurso prometedor y transicional. Sin embargo, no sustituye los métodos tradicionales basados en cadáveres en procedimientos abiertos de gran envergadura. El currículo quirúrgico híbrido surge como el modelo adecuado para el desarrollo de la competencia técnica.*

**PALABRAS CLAVE:** *Realidad virtual. Retroalimentación háptica. Entrenamiento por simulación. Educación médica. Competencia clínica.*

### **INTRODUÇÃO**

O aprendizado cirúrgico contemporâneo, embora ancorado no histórico modelo de tutoria com pacientes reais, esbarra atualmente em altos custos e riscos inaceitáveis à segurança do paciente. Para mitigar essas desvantagens, a simulação cirúrgica tornou-se uma ferramenta indispensável, pois possibilita o ensaio repetitivo de tarefas padronizadas em um ambiente totalmente seguro e controlado<sup>1</sup>.

Neste cenário a Realidade Virtual (RV) consolida-se como uma avançada interface homem-máquina capaz de simular ambientes reais por meio de imagens gráficas tridimensionais, estendendo as percepções dos nossos cinco sentidos<sup>2</sup>.

Na última década, a RV tem sido progressivamente integrada à educação médica, transformando as metodologias de aprendizado ao permitir que estudantes e cirurgiões



praticuem habilidades técnicas e tomem decisões críticas em cenários simulados altamente controlados<sup>3</sup>.

Contudo, a literatura contemporânea alerta que grande parte das plataformas virtuais tradicionais são restritas a estímulos visuais e auditivos, carecendo fundamentalmente de percepção tátil e de *feedback* háptico<sup>4,5</sup>.

A ausência de *feedback* tátil configura-se como um desafio técnico no treinamento operatório, visto que a percepção de força auxilia o cirurgião a avaliar a resistência mecânica das diferentes estruturas anatômicas. Sem essa calibração mecânica, o cirurgião novato apresenta dificuldade em adequar a força exercida, o que predispõe à aplicação de tensões excessivas e aumenta o risco de trauma tecidual<sup>6</sup>.

Embora a efetividade do *feedback* háptico na cirurgia robótica ainda seja amplamente debatida na literatura devido ao fato de plataformas comerciais consagradas como o sistema Da Vinci não possuírem essa funcionalidade de forma nativa, a sua incorporação aos simuladores virtuais apresenta-se como um recurso promissor para a fase inicial de aprendizagem de jovens cirurgiões<sup>7</sup>.

Diante disso, este estudo visa mapear e avaliar criticamente as evidências científicas contemporâneas referentes não apenas à eficácia, mas também às limitações inerentes à integração de simuladores de RV com *feedback* háptico no treinamento operatório.

Especificamente, busca-se sintetizar o impacto dessas plataformas imersivas na eficácia formadora, avaliando a aceleração na aquisição de habilidades psicomotoras, a prevenção de lesões iatrogênicas e a validade de construto dos sistemas em discriminar, de forma objetiva, o desempenho de cirurgiões novatos e especialistas.

## 1. REFERENCIAL TEÓRICO

No contexto da saúde, a simulação compreende a recriação fidedigna de situações, processos ou estruturas da vida real, com o objetivo estratégico de otimizar a segurança, a eficácia e a eficiência dos serviços prestados<sup>8</sup>.

A simulação cirúrgica evoluiu historicamente do uso de modelos orgânicos e simuladores de caixa (box trainers) para as plataformas digitais. Essa progressão foi motivada pela necessidade de contornar barreiras éticas, altos custos operacionais e a ausência de avaliação objetiva de desempenho inerentes aos métodos tradicionais<sup>4,9</sup>.

Os *box trainers* (BTs) para treinamento físico constituem um método eficaz para a aquisição de habilidades operatórias fora do centro cirúrgico. Por serem portáteis e geralmente



de baixo custo, tornam o treinamento mais acessível aos residentes, que podem utilizá-los em seus próprios espaços. No entanto, a principal desvantagem desses modelos analógicos, em comparação com os sistemas de RV existentes, é a falta de um método objetivo e viável para a avaliação de desempenho, o que exige a supervisão presencial e dispendiosa de um cirurgião tutor experiente<sup>10, 11</sup>.

A cirurgia em cadáveres tem sido usada como modelo cirúrgico educacional por séculos para facilitar o aprendizado de anatomia cirúrgica, técnicas operatórias e manuseio de instrumentos enquanto modelos animais têm servido historicamente como ferramentas indispensáveis na pesquisa biomédica. Contudo há considerações éticas e regulatórias, além de altos custos de manutenção e aquisição, fatores que dificultam a sua viabilidade em larga escala<sup>9</sup>.

Na literatura científica contemporânea, a RV é conceituada como um ambiente tridimensional totalmente gerado por computador, no qual o usuário experimenta um estado de imersão completa e isolamento do mundo físico. No contexto da educação cirúrgica, essa tecnologia consolida-se como uma avançada interface homem-máquina, permitindo que o operador interaja de forma dinâmica com o cenário, manipulando e modificando estruturas anatômicas virtuais em tempo real<sup>12, 13</sup>.

Enquanto a RV isola o usuário em um ambiente sintético, a Realidade Mista (RM) mescla o conteúdo digital ao mundo físico de forma interativa por meio da computação espacial. O ensino cirúrgico, essa tecnologia mitiga a dificuldade dos residentes em reconstruir mentalmente a anatomia tridimensional a partir de exames bidimensionais, sendo a sua aplicabilidade ilustrada em relatos de caso que documentam intervenções de emergência, como o reparo de fístulas aortoesofágicas<sup>14</sup>.

Para além dessa sobreposição visual, a literatura destaca que a RM viabiliza uma interação dinâmica em tempo real entre os objetos virtuais e o espaço físico. Nesse ambiente integrado, o conteúdo digital 3D não é apenas visível, mas permanece ancorado espacialmente e torna-se diretamente responsivo aos movimentos, gestos e mudanças ambientais do usuário<sup>12</sup>.

Nesse cenário, a literatura descreve a incorporação do *feedback* háptico como um aprimoramento estrutural relevante nessas plataformas, o qual consiste na resposta tátil ou de força (resistência mecânica) fornecida pelos instrumentos simulados<sup>4</sup>. Fisiologicamente, essa percepção abrange tanto a via somatossensorial tátil, mediada pela pele, quanto o *feedback* proprioceptivo cinestésico oriundo dos tendões, músculos e ligamentos<sup>15</sup>.

Em cirurgias minimamente invasivas, como a laparoscopia e a robótica, os cirurgiões enfrentam a perda substancial da percepção tátil direta e da avaliação de profundidade, o que



frequentemente induz novatos a aplicarem forças excessivas e lesivas, tornando a integração com o *feedback* háptico em simuladores um recurso importante para o desenvolvimento da memória muscular, precisão de movimentos e controle de força<sup>4, 6</sup>.

Apesar dos benefícios, a implementação da RV integrada a *feedback* háptico na educação cirúrgica enfrenta significativos entraves financeiros, decorrentes dos elevados custos de aquisição e de manutenção tecnológica contínua<sup>16</sup>.

Na psicologia da aprendizagem, a percepção de realismo do simulador é determinante para o engajamento do residente. Pesquisas qualitativas demonstram que respostas hápticas imaturas na Realidade Virtual atuam como fator de desmotivação, onde a sensação de resistência tátil e os gráficos de baixa resolução são percebidas pelos aprendizes como perda de fidelidade cirúrgica, aproximando-se mais de um jogo de entretenimento. Conseqüentemente, a plataforma falha em induzir o estresse cognitivo exigido no preparo operatório<sup>17</sup>. Portanto, a aceitação tecnológica demanda aprimoramento contínuo do realismo biomecânico<sup>7, 15</sup>.

Essa deficiência mecânica é corroborada por revisões sistemáticas recentes, que atestam a atual carência de percepção tátil e de resposta de força realista nas plataformas de RV, fatores que ainda comprometem a imersão e a fidelidade global da simulação cirúrgica<sup>5</sup>.

Para a consolidação de um simulador cirúrgico como ferramenta educacional legítima, a literatura exige a comprovação de três propriedades métricas e conceituais interdependentes: a fidelidade funcional, a validade de construto e a validade translacional<sup>1</sup>.

A fidelidade funcional refere-se ao grau de realismo com que o sistema mimetiza as propriedades físicas do ambiente operatório, sendo a integração do *feedback* háptico crucial para replicar a resistência mecânica e a percepção tátil dos tecidos humanos<sup>15</sup>.

Assegurada a imitação do comportamento mecânico da anatomia, o equipamento deve demonstrar a sua validade de construto, a qual consiste na capacidade da plataforma em simular efetivamente a habilidade cirúrgica e diferenciar, de forma estatística, os níveis de proficiência entre os operadores<sup>1, 11</sup>.

Por fim, a culminação desse rigor tecnológico e avaliativo repousa na validade translacional, frequentemente atrelada ao conceito de validade preditiva, que mensura a efetiva transferibilidade das habilidades psicomotoras adquiridas no ambiente digital *ex vivo* para o cenário da sala de cirurgia<sup>1, 15</sup>.

Apesar dos avanços tecnológicos na democratização do treinamento cirúrgico seguro, as evidências científicas apontam resultados divergentes quanto à eficácia irrestrita da integração háptica<sup>16</sup>. Embora essas plataformas acelerem a curva de aquisição de habilidades, os simuladores imersivos ainda esbarram em deficiências biomecânicas na mimetização da



resistência tátil fidedigna dos tecidos orgânicos<sup>5, 16</sup>. Essa barreira de *hardware* compromete diretamente a profundidade da imersão, a validade da fidelidade operatória e a simulação do estresse cognitivo intraoperatório, fatores que são essenciais para o preparo operatório adequado do cirurgião em formação<sup>15, 17</sup>.

Além dessa barreira estrutural, a consolidação dessas tecnologias é limitada por desafios metodológicos recorrentes na literatura. Pesquisas demonstram que os estudos na área caracterizam-se pelo uso de coortes frequentemente pequenas e compostas por grupos de novatos ou voluntários. Somado a isso, observa-se uma ampla heterogeneidade de plataformas virtuais e uma escassez de padronização nos métodos de treinamento e nas métricas de avaliação de desempenho<sup>15</sup>. Essa disparidade na classificação e na descrição dos simuladores dificulta a consolidação de uma taxonomia uniforme, o que compromete a avaliação crítica das evidências e a comparação direta entre os diferentes sistemas<sup>13</sup>.

Diante dessas lacunas, a presente revisão integrativa justifica-se pela necessidade de analisar criticamente a literatura médica de alto rigor metodológico. O estudo visa elucidar as reais perspectivas e as limitações inerentes a essa tecnologia, com o intuito de embasar a consolidação de currículos cirúrgicos estritamente voltados para a proficiência técnica e a segurança primária do paciente.

## 2. METODOLOGIA

Esta revisão integrativa teve como objetivo identificar e analisar as evidências disponíveis sobre a eficácia e as limitações dos simuladores de RV com integração de *feedback* háptico na educação cirúrgica médica: 1) identificação do tema ou questão de pesquisa; 2) estabelecimento de critérios para inclusão e exclusão de estudos; 3) definição das informações a ser extraídas dos estudos selecionados; 4) avaliação dos estudos incluídos; 5) interpretação dos resultados; e 6) apresentação da revisão/síntese do conhecimento<sup>18</sup>.

A pesquisa fundamentou-se na formulação da seguinte questão norteadora: Qual a eficácia e as limitações dos simuladores de Realidade Virtual com *feedback* háptico no treinamento cirúrgico?

As buscas foram realizadas em 20 de abril de 2026 nas seguintes bases de dados: PubMed, Scopus e Cochrane. Utilizaram-se os seguintes descritores controlados e não controlados combinados com operadores booleanos (*AND*, *OR*): ("*Surgical Procedures*" *OR* "*Surgical Training*") *AND* ("*Virtual Reality*" *OR* "*VR*") *AND* (*Feedback OR haptic OR "force*

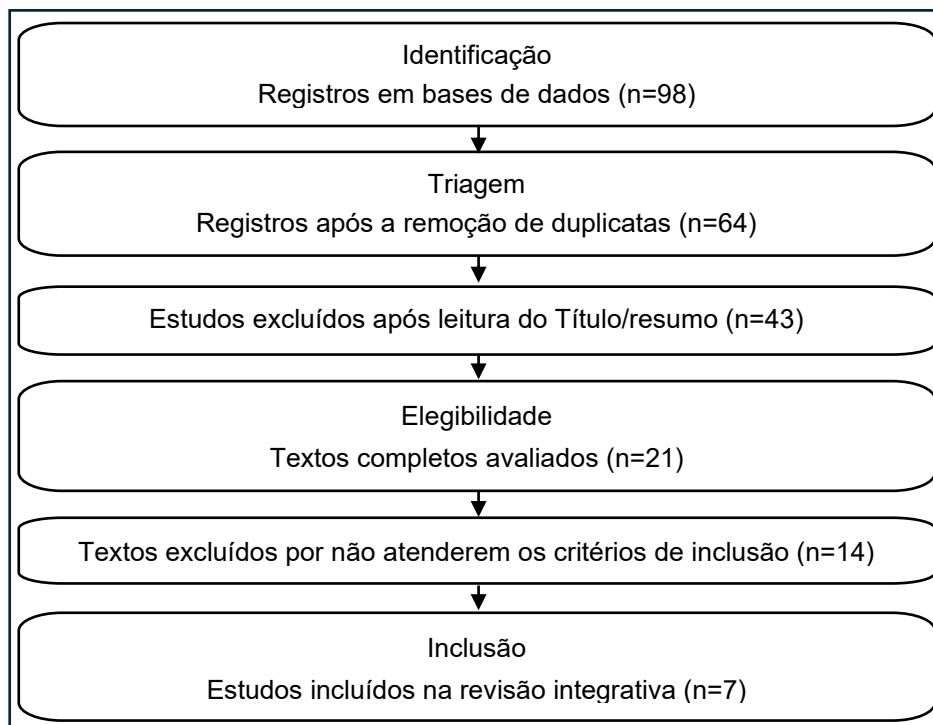
*feedback" OR "tactile feedback") AND (simulation OR simulator\*) AND ("Randomized Controlled Trial" OR "Systematic Review" OR "Meta-Analysis").*

Foram incluídos estudos publicados nos últimos 5 anos (entre 2022 e 2026) que atenderam aos seguintes critérios: avaliar simuladores de RV e/ou RM estritamente associados a dispositivos de *feedback* háptico/tátil; aplicados ao treinamento, planejamento ou avaliação de procedimentos cirúrgicos médicos; artigos com mais altos níveis de evidência (Revisões sistemáticas, Meta-análise e Ensaios clínicos randomizados).

Foram excluídos artigos duplicados, não focados em cirurgia médica, estudos teóricos sem aplicação prática, simulações em visores sem interação de força, ou métodos baseados exclusivamente em BTs analógicos ou cadáveres.

A seleção foi conduzida em três etapas: leitura dos títulos e resumos; leitura dos textos completos; e aplicação dos critérios de elegibilidade. O gerenciamento das referências bibliográficas foi realizado no *software* Zotero (versão 9.0.3), enquanto a tabulação dos dados de triagem foi executada no programa Microsoft Excel®. O processo de seleção encontra-se representado no fluxograma adaptado das diretrizes PRISMA 2020 (Figura 1).

**Figura 1.** Fluxograma do processo de seleção dos estudos



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)



De cada estudo incluído foram extraídos os dados a seguir: Estudo, País, Tipo de estudo, População, Sistema utilizado, Funcionalidades e Resultados principais e organizados em uma tabela resumo.

A qualidade metodológica da amostra foi avaliada por uma abordagem dupla, adequada aos diferentes delineamentos. Para a análise crítica do risco de viés das revisões sistemáticas, utilizou-se a ferramenta AMSTAR 2<sup>19</sup> (*A Measurement Tool to Assess systematic Reviews*). Concomitantemente, para a apreciação metodológica dos ensaios clínicos randomizados (ECRs), empregaram-se os *checklists* específicos do Instituto Joanna Briggs<sup>20</sup> (JBI). Essa estratégia garante uma avaliação rigorosa das limitações estruturais e dos desvios de condução inerentes a cada tipo de pesquisa incluída.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente revisão integrativa incluiu 7 estudos de alto rigor metodológico publicados entre 2022 e 2026, voltados estritamente para a educação cirúrgica médica. A amostra final consolidou-se em 2 ensaios clínicos randomizados e 5 revisões sistemáticas.

O quadro 1 sintetiza as principais características metodológicas e resultados dos estudos incluídos nesta revisão.

**Quadro 1.** Síntese dos estudos sobre o uso de RV e *Feedback* Háptico em Cirurgia

Estudo Autor / Ano)	País	Tipo de estudo	População	Sistema utilizado	Funcionalidades	Resultados principais
MACKENZIE et al., 2022 <sup>21</sup>	EUA	Revisão Sistemática (14 estudos)	282 sujeitos (20% cirurgiões, além de paramédicos e alunos)	Interfaces de RV, RA, RM e háptica	Orientação, avaliação automatizada e treinamento em cirurgia aberta	Evidência insuficiente para substituir cadáveres ou provar benefícios no trauma aberto, derivado de amostras pequenas e baixo rigor metodológico



GANI <i>et al.</i> , 2022 <sup>22</sup>	Reino Unido	Ensaio Clínico Randomizado	31 médicos residentes (R1-R3) de ortopedia	<i>Oculus Rift</i> pareado com controladores hápticos <i>GeoMagic</i>	<i>Feedback</i> tátil na manipulação da broca e mimetização da perda de resistência óssea (córtex)	O grupo háptico teve menor folga de mergulho (7,6 vs 13,6 mm) e escores OSATS maiores; atestou-se maior segurança cirúrgica
HUDISE <i>et al.</i> , 2024 <sup>23</sup>	Arábia Saudita	Revisão Sistemática (6 ECRs)	Estudantes de medicina	<i>Visible Ear Simulator</i> , <i>MediseusVR Drilling</i> e dispositivo háptico <i>Geomagic</i>	Ambientes interativos e imersivos para simulação de perfuração de osso temporal	Potencial para melhorar o desempenho espacial e motor, mas com superioridade mista ou equivalente quando comparada a métodos tradicionais
LANDAU <i>et al.</i> , 2024 <sup>24</sup>	EUA	Revisão Sistemática (31 estudos)	Cirurgiões novatos em cirurgia plástica e reconstrutiva	Simuladores RV variados	Visualização da anatomia, planejamento cirúrgico, <i>feedback</i> háptico e avaliação de competências	Uso melhorou a confiança e a precisão de novatos em tarefas complexas, mas carece de foco na comunicação e colaboração

AZHER <i>et al.</i> , 2024 <sup>25</sup>	Canadá	Revisão Sistemática e Scoping (51 estudos)	Residentes, estudantes de medicina e médicos assistentes	Ambientes de simulação virtual (VSs) cirúrgica	Integração de resposta de força ( <i>force feedback</i> ) vs. condição não-háptica	A ampla maioria dos resultados (34 de 51) favoreceu o <i>feedback</i> háptico, acelerando o ganho de proficiência, embora sem protocolos padronizados
DUNCOMBE <i>et al.</i> , 2025 <sup>26</sup>	Reino Unido	Ensaio Clínico Randomizado	20 estudantes de medicina de graduação	Simulação em RV habilitada para háptica vs. Modelos físicos ( <i>SawBone</i> )	Sessão imersiva com <i>feedback</i> de força de baixa fidelidade para artroplastia de quadril	Nenhuma diferença estatística de precisão, tempo ou habilidade em relação à tutoria clássica, evidenciando as limitações mecânicas no fêmur
ROY <i>et al.</i> , 2025 <sup>27</sup>	Reino Unido e Índia	Revisão Sistemática	Residentes em treinamento ortopédico	RV, Realidade Aumentada (RA) e <i>task-based trainers</i>	Prática segura repetível com <i>feedback</i> háptico e integração de IA	Redução de erros cirúrgicos e curvas de aprendizado mais rápidas. Custos e dificuldade de integração permanecem como desafios

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A avaliação da qualidade metodológica dos ensaios clínicos randomizados, conduzida por meio do instrumento de apreciação crítica do JBI, atestou a robustez da amostra primária desta revisão. O estudo de Gani *et al.* (2022)<sup>22</sup> alcançou excelência metodológica e baixo risco de viés, destacando-se pelo rigoroso desenho duplo-cego e pela alocação de intervenções



idênticas. Em contrapartida, o ensaio de Duncombe *et al.* (2025)<sup>26</sup> evidenciou rigor metodológico de moderado a alto. Embora a pesquisa apresente robusta validade estrutural conferida pelo cegamento dos avaliadores externos, o estudo apresentou limitações metodológicas devido à impossibilidade de cegamento dos participantes, uma barreira inerente à disparidade física entre as plataformas testadas.

Complementarmente à avaliação dos ensaios clínicos, a aplicação da ferramenta AMSTAR 2 atestou a elevada confiabilidade da amostra secundária desta revisão. As cinco revisões sistemáticas incluídas alcançaram um padrão metodológico que varia de moderada a alta qualidade<sup>21,23,24,25,27</sup>. Os estudos cumpriram a condução de buscas estruturadas de acordo com as diretrizes PRISMA em múltiplas bases de dados<sup>21, 23, 24, 25</sup>, e a realização da triagem e extração de dados em duplicidade por revisores independentes<sup>23,24,25</sup>. Adicionalmente, atesta-se a robustez das revisões pela exaustiva avaliação de risco de viés empregada em suas metodologias originais, que utilizaram instrumentos de alto rigor científico, como as ferramentas MERSQI, QUADAS-2 e a escala modificada de *Downs and Black*<sup>21,23,25</sup>.

A distribuição das instituições de origem dos pesquisadores evidencia um esforço científico global para a validação dessas tecnologias, com as investigações sendo conduzidas de forma independente ou multicêntrica no Reino Unido, nos Estados Unidos, no Canadá, na Arábia Saudita e na Índia.

O quadro 2 apresenta as Especialidades cirúrgicas abordadas nos estudos incluídos.

#### Quadro 2. Especialidades cirúrgicas

Especialidade Cirúrgica	Condição Clínica / Foco do Treinamento
Ortopedia e Traumatologia Óssea	Perfuração óssea, artroplastia de quadril (preparo do fêmur), fixação de fraturas e cirurgias da coluna
Otorrinolaringologia e Cirurgia de Cabeça/Pescoço	Mastoidectomia, dissecação do osso temporal e implante coclear
Cirurgia Plástica e Reconstructiva	Microcirurgia, reconstrução craniofacial, confecção de retalhos e cirurgia ortognática
Cirurgia de Trauma e Emergência	Fasciotomia de extremidades, cricotireoidostomia, toracostomia e controle de hemorragia em cirurgia aberta



Múltiplas Especialidades / Habilidades Gerais	Manuseio básico de instrumentos, sutura, e avaliação global de <i>feedback</i> háptico em ambientes laparoscópicos e abertos
---	--

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Observa-se que a predominância da Ortopedia e Traumatologia na literatura reflete uma facilidade de bioengenharia inerente aos simuladores atuais: é matematicamente menos complexo para os *softwares* simularem a resistência rígida do osso (como durante o uso de furadeiras ou serras) do que replicar o comportamento dinâmico, úmido e elástico dos tecidos moles<sup>25, 27</sup>.

Nas especialidades de Otorrinolaringologia e Cirurgia Plástica, a RV háptica tem sido direcionada especificamente para micro procedimentos e cavidades restritas, áreas em que a coordenação olho-mão e a destreza bimanual micromotora são exigências críticas<sup>23, 24</sup>.

Em contrapartida, a cirurgia de trauma e emergência ainda é sub-representada no treinamento virtual de alta fidelidade, revelando um hiato crítico na literatura sobre a eficácia da aplicação dessas tecnologias em cenários operatórios abertos de grande tração e alta imprevisibilidade<sup>21</sup>.

O quadro 3 apresenta a distribuição da população-alvo dos 7 estudos incluídos na revisão, com detalhamento do nível de experiência e tamanho da amostra ou escopo.

**Quadro 3.** População-alvo

Estudo (Autor, Ano)	População-Alvo Principal e Nível de Experiência	Tamanho da Amostra (n) ou Escopo
Mackenzie <i>et al.</i> (2022) <sup>21</sup>	A maioria absoluta consistiu em estudantes de medicina, médicos socorristas militares e médicos de emergência. Apenas 20% da amostra era composta por cirurgiões	Revisão de 14 estudos (n=282 sujeitos agregados)
Gani <i>et al.</i> (2022) <sup>22</sup>	Médicos em treinamento cirúrgico básico (anos 1 a 3 de pós-graduação) com experiência ortopédica prévia limitada ou nula no uso de furadeiras	Ensaio Clínico (n=31)
Hudise <i>et al.</i> (2024) <sup>23</sup>	População variada composta por estudantes de medicina sem experiência prévia em osso temporal, além de residentes de otorrinolaringologia	Revisão de 6 Ensaios Clínicos
Landau <i>et al.</i> (2024) <sup>24</sup>	Residentes, estudantes de medicina e cirurgiões	Revisão de 31 estudos



Azher <i>et al.</i> (2024) <sup>25</sup>	A amostra mais frequente foi de residentes médicos, seguidos por novatos não especificados, médicos assistentes ou especialistas e estudantes de graduação em medicina	Revisão de 51 estudos
Duncombe <i>et al.</i> (2025) <sup>26</sup>	Estudantes de medicina de graduação (1º e 2º ano) sem nenhuma experiência prévia em observação ou assistência em cirurgias de quadril	Ensaio Clínico (n=20)
Roy <i>et al.</i> (2025) <sup>27</sup>	Residentes inseridos em programas de ortopedia e cirurgiões em treinamento, focando na transição segura do conhecimento acadêmico para a execução prática	Revisão Sistemática Qualitativa

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O mapeamento populacional revela que a pesquisa contemporânea em simulação cirúrgica direciona seu foco metodológico para as fases iniciais da curva de aprendizado, priorizando o recrutamento de estudantes de graduação e residentes de primeiro ano<sup>22, 25</sup>.

Essa seleção intencional reflete o objetivo primário da simulação médica moderna: proteger os pacientes de riscos iatrogênicos, utilizando a RV como uma ponte segura de treinamento antes do contato *in vivo*<sup>27</sup>.

Nessas populações inexperientes e sem vícios técnicos, o *feedback* háptico demonstra altíssima eficácia para acelerar a precisão motora bimanual e o tempo de tomada de decisão<sup>24</sup>.

A seguir, apresenta-se o Quadro 4, Tipos de *hardware* utilizados nos estudos.

#### Quadro 4. Tipos de *hardware*

Tipos de <i>Hardware</i>
Simuladores de RV Imersiva com <i>Feedback</i> Háptico
Plataformas de RV Convencional
Modelos Físicos Analógicos e Sintéticos (Manequins, <i>Sawbones</i> , modelos ósseos impressos em 3D)
Uso de Cadáveres ou Tecidos Vivos (Padrão-ouro para validação translacional ou treinamento híbrido)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A totalidade da amostra avaliou *hardwares* com resposta de força (háptica), utilizando majoritariamente dispositivos periféricos fixos ancorados nas mãos do usuário (como o



*Geomagic Touch* e o *Phantom Omni*), mas a presença quase simultânea da RV Convencional reflete a excelência comparativa da literatura <sup>21, 22, 23, 24, 25, 26, 27</sup>.

Metodologicamente, a RV não-háptica atua como padrão basal e grupo-controle exigido para isolar a variável mecânica, atestando objetivamente se a adição do tato justifica sua complexidade e traz benefícios clínicos reais para o treinando<sup>21, 22, 23, 24, 25, 26</sup>.

Além dessa rigorosa comparação digital interna, a tecnologia imersiva não opera isoladamente para comprovar sua validade translacional. A maioria dos ensaios dependeu de modelos físicos analógicos e de cadáveres como o cenário de teste definitivo, atestando se a habilidade adquirida virtualmente é transferível para o mundo físico<sup>21, 22, 23, 26</sup>.

As principais funcionalidades são apresentadas no Quadro 5.

#### Quadro 5. Funcionalidades

Funcionalidade de Simulação e Feedback	Características e Hardware Associado
Resposta de Força (Háptica Focada)	Restrição mecânica que simula colisão, resistência de tecidos moles e perfuração óssea. Emprega braços robóticos (ex: <i>Geomagic Touch</i> , <i>Phantom Omni</i> ) como dispositivos de entrada
Reforço Visual e Auditivo Automatizado	Sistemas que fornecem rastreamento de instrumentos, sombras teciduais dinâmicas e alterações sonoras (ex: som da broca rompendo o córtex) para indicar o sucesso ou o erro da ação
Teletração em RA/RM	Sobreposição de anotações tridimensionais, orientação remota por especialistas e projeção de hologramas anatômicos diretamente sobre o campo operatório do usuário

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

O mapeamento das funcionalidades demonstra que a RV transcende a imersão visual, adotando o *feedback* háptico como pilar central para mimetizar a firmeza óssea e a tensão tecidual<sup>22,27</sup>.

Adicionalmente, a RA desponta como inovação, com a teletração: habilidade de desenhar ou fazer anotações diretamente no ambiente 3D<sup>21</sup>.

As métricas de avaliação de desempenho são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6. Principais métricas de avaliação de desempenho e aprendizagem

<b>Categoria da Métrica</b>	<b>Exemplos de Métricas Avaliadas</b>
Métricas de Eficiência e Tempo	Tempo operatório, tempo total para conclusão da tarefa cirúrgica e economia/fluidez de movimentos
Métricas de Precisão e Segurança (Erros)	Distância de penetração excessiva ("folga de mergulho"), erro de profundidade do implante e taxas de falhas técnicas
Escalas Globais de Avaliação Cirúrgica	Escores validados por especialistas, como OSATS, GRS e IPS
Métricas Cognitivas e Subjetivas	Carga cognitiva, autoeficácia, confiança na tomada de decisão do usuário e percepção de fidelidade do <i>hardware</i>

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A estruturação dessas métricas evidencia um amadurecimento metodológico crucial na educação cirúrgica, substituindo a mera satisfação do residente por parâmetros quantificáveis de segurança. A aferição rigorosa de erros milimétricos, como a "folga de mergulho" da broca e o desvio de profundidade de implantes, traduz a prevenção de iatrogenias para dados matemáticos exatos<sup>22, 26</sup>.

A consolidação de simuladores imersivos como ferramentas essenciais na educação cirúrgica exige a compreensão de três pilares metodológicos interdependentes, cujos impactos têm sido amplamente investigados e validados por ensaios clínicos randomizados e revisões sistemáticas recentes. O primeiro pilar, a fidelidade funcional, não se restringe à mera semelhança visual com a anatomia humana, mas refere-se à precisão com que o sistema replica o comportamento biomecânico dos tecidos orgânicos durante a manipulação operatória.

Evidências demonstram que a integração do *feedback* háptico é um determinante central dessa fidelidade, sendo eficaz para mimetizar a resistência em procedimentos de perfuração óssea<sup>22, 25</sup>.

Em contrapartida, estudos alertam que, quando a fidelidade funcional háptica é baixa, imprecisa ou utiliza braços robóticos periféricos fixos em cirurgias abertas, o aprendiz pode perder o referencial tátil adequado e sofrer restrições ergonômicas, o que eleva a carga cognitiva e pode reforçar padrões motores incorretos<sup>26</sup>.



Uma vez que a fidelidade funcional seja assegurada, no segundo pilar, o simulador deve demonstrar a sua validade de construto, que consiste na capacidade da plataforma em discriminar objetivamente o nível de proficiência técnica dos operadores.

Ensaio clínico controlado têm utilizado ferramentas padronizadas de avaliação em cirurgia, como a escala OSATS (*Objective Structured Assessment of Technical Skill*), para analisar esse construto. Nessas análises, grupos treinados em simuladores de RV com resposta de força apresentaram escores globais superiores na execução de tarefas, indicando que as métricas da máquina refletem a competência clínica do cirurgião em domínios como o fluxo do procedimento e o tempo operatório<sup>22</sup>.

Quando validada de forma adequada, a plataforma contribui para que o residente desenvolva habilidades práticas, mitigando a alocação de recursos cognitivos adicionais para superar falhas e limitações do *software*<sup>22, 24</sup>.

O terceiro pilar, a validade translacional, frequentemente descrita como a transferibilidade de habilidades, a qual avalia a extensão em que as competências psicomotoras adquiridas no ambiente virtual são efetivamente transferidas para a sala de operações.

Ensaio clínico randomizado fornece dados significativos dessa translação ao demonstrarem que o treinamento háptico pode reduzir falhas de segurança, como a distância de penetração excessiva da broca (folga de mergulho) após o rompimento da camada óssea cortical, protegendo estruturas adjacentes contra lesões iatrogênicas<sup>22</sup>.

Corroborando esses achados experimentais, metanálises atestam que a simulação imersiva promove a transferência positiva de destreza bimanual e a redução de erros cirúrgicos em cenários ortopédicos e microvasculares. Fica evidente que a adoção tecnológica demanda que a máquina apresente um comportamento mecânico realista para mensurar a proficiência do aluno, buscando assegurar que a destreza virtual se reverta em maior segurança primária ao paciente<sup>24, 27</sup>.

Por outro lado, quando extrapolada para cirurgias abertas de grande tração, a tecnologia imersiva atual ainda apresenta deficiências estruturais e mecânicas.

Ensaio clínico recente demonstraram que a RV háptica falhou em apresentar superioridade técnica ou redução de erros no preparo do fêmur em artroplastias quando comparada ao treinamento físico em modelos analógicos<sup>26</sup>.

Essa ineficácia decorre, majoritariamente, do uso de dispositivos de entrada fixos, como braços robóticos periféricos rígidos, que impõem restrições ergonômicas limitantes à amplitude de movimento e impedem a fluidez natural exigida no espaço cirúrgico<sup>26</sup>.



Nesse mesmo escopo da cirurgia aberta, a literatura corrobora essas barreiras estruturais, evidenciando que a adoção de *hardwares* volumosos e pesados, a ocorrência de enjoo de movimento (*motion-sickness*) e a perda de rastreamento visual e espacial atuam como obstáculos técnicos significativos<sup>21</sup>.

Diante dessas limitações, as evidências atuais indicam que as tecnologias imersivas e hápticas ainda são insuficientes para substituir o uso de cadáveres, que permanecem como o método padrão-ouro no ensino de procedimentos abertos de trauma<sup>21</sup>.

Além das barreiras físicas de amplitude de movimento, a Teoria da Carga Cognitiva desponta como um limitador central na adoção de simuladores de fidelidade ultra-alta. Como a capacidade de processamento simultâneo do cérebro humano é finita, evidencia-se que o excesso de estímulos da interface virtual acoplados à complexidade da resistência tátil sobrecarrega os recursos mentais do aprendiz.

No escopo dessa sobrecarga, uma revisão<sup>23</sup> demonstrou empiricamente o impacto desse fenômeno ao atestar o aumento expressivo da carga cognitiva. Os achados indicam que esse esgotamento mental desvia o foco da técnica cirúrgica, resultando em uma redução nos escores de desempenho operatório quando comparados aos obtidos em plataformas de RV convencionais.

Para além das barreiras biomecânicas e ergonômicas, a sustentabilidade financeira e a gestão de recursos despontam como obstáculos logísticos primários para a implementação de simuladores hápticos. A análise das evidências demonstra que a viabilidade econômica dessa tecnologia não deve ser mensurada exclusivamente pelo seu alto valor de mercado inicial, mas sim interpretada como um investimento institucional estratégico na gestão de risco hospitalar e na excelência formativa.

A análise de Roy *et al.*<sup>27</sup> aponta que os altos custos de aquisição, a complexidade técnica para manutenção dos sistemas de RV e a ausência de padronização entre as diferentes instituições dificultam a adoção da simulação em larga escala. Esses achados corroboram a literatura, a exemplo de Sanfilippo *et al.*<sup>16</sup>, confirmando que a sustentabilidade financeira desponta como um obstáculo logístico transversal e histórico na educação cirúrgica.

Apesar do investimento financeiro inicial substancial, a literatura aponta que as plataformas imersivas são escaláveis e custo-efetivas em longo prazo por reduzirem a dependência e os elevados encargos logísticos do ensino tradicional<sup>12</sup>. Essa premissa é diretamente corroborada pelos achados primários de Roy *et al.*<sup>27</sup>, que evidenciam uma redução significativa de sinistros por imperícia e negligência em centros integrados à simulação virtual. Frente a esses benefícios clínicos, o retorno sobre o investimento consolida-se pela mitigação



dos custos associados a complicações e lesões iatrogênicas, tornando a tecnologia economicamente sustentável e alinhada à segurança do paciente.

Adicionalmente, revisões apontam que a exploração de simuladores de RV de baixo custo tem se mostrado uma oportunidade viável para democratizar o ensino cirúrgico, mitigando os desafios financeiros das instituições<sup>24</sup>. O fato de múltiplos residentes poderem treinar repetidamente nessas plataformas sem a constante reposição de insumos otimiza a eficiência do currículo<sup>27</sup>.

Contudo, é imperativo ressaltar que a vantagem econômica não é universal para todas as especialidades. Em cenários de cirurgia aberta e de trauma de grande porte, estudos de alto rigor metodológico atestam que ainda não há evidências suficientes de benefícios econômicos ou logísticos que justifiquem a substituição do treinamento cadavérico pelos sistemas de RV atuais<sup>21</sup>.

Por fim, as evidências desta revisão indicam que simuladores de RV háptica apresentam robusta eficácia na curva de aprendizado inicial e no refinamento da destreza micromotora, contudo ainda não devem ser encarados como substitutos absolutos da tutoria tradicional, mas sim como ferramentas complementares valiosas.

A tecnologia atinge sua excelência ao democratizar a repetição sistemática e garantir a segurança do paciente nas etapas iniciais de formação do residente, contudo, requer um vasto amadurecimento biomecânico e ergonômico antes de assumir o protagonismo no ensino de procedimentos cirúrgicos complexos de grande porte.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resposta direta à questão norteadora desta pesquisa, conclui-se que a tecnologia demonstra alta eficácia clínica e educacional na simulação de microprocedimentos e intervenções sobre tecidos rígidos. Nesses cenários controlados, a integração do *feedback* háptico atua como um recurso complementar de grande relevância, pois acelera a aquisição de destreza bimanual em cirurgias novatas e previne quantitativamente o risco de iatrogenias anatômicas.

Em contrapartida, as evidências atestam que as plataformas imersivas contemporâneas não substituem treinamento com cadáveres em cirurgias abertas, complexas e de trauma. A utilização de atuadores robóticos fixos impõe restrições ergonômicas em procedimentos que exigem grande amplitude de movimento. Adicionalmente, a imaturidade de algumas interfaces



pode gerar um excesso de estímulos irrealistas que eleva a carga cognitiva, deteriorando paradoxalmente o desempenho prático do residente.

Para além dessas barreiras biomecânicas, a adoção tecnológica em larga escala esbarra no elevado investimento financeiro inicial e na escassez de protocolos de validação padronizados internacionalmente. No entanto, a análise da literatura revela um balanço de custo-efetividade favorável em longo prazo: a mitigação de erros operatórios e a consequente redução de custos com suporte à saúde e litígios transformam os simuladores em investimentos estratégicos de gestão de risco, cenário que tende a ser impulsionado pelo desenvolvimento de sistemas hápticos mais acessíveis.

Perspectivas futuras apontam que o aprimoramento ergonômico das interfaces e a sua integração com a Inteligência Artificial permitirão a avaliação automatizada e preditiva do desempenho técnico. Dessa forma, o treinamento virtual firma-se não apenas como um avanço metodológico, mas como um imperativo ético, garantindo a proteção do paciente durante a fase mais crítica da curva de aprendizado operatório.

Portanto, a simulação imersiva com percepção de força deve ser incorporada estrategicamente como uma ponte transicional promissora, e não como substituta do ensino *in vivo*. O currículo híbrido consolida-se, assim, como o modelo mais consistente para a formação cirúrgica.

## REFERÊNCIAS

1. Palet MJ, Antúnez-Riveros M, Barahona M. Construct validity of a virtual reality simulator for surgical training in knee arthroscopy. *Cureus*. 2021;13(5):e15237. doi:10.7759/cureus.15237.
2. Montero EFS, Zanchet DJ. Realidade virtual e a medicina. *Acta Cir Bras*. 2003;18(5):489-490. doi:10.1590/S0102-86502003000500017.
3. Vallim LHS, Filho JL. Avanços da realidade aumentada e realidade virtual na educação médica: desafios e perspectivas futuras. *Rev Interface Tecnol*. 2024;21(2):269-282. doi:10.31510/infa.v21i2.2108.
4. Tan J, Karim MR, Tamanna R, Kim S, Patel B. Comparing learning outcomes of virtual reality (VR) simulators using haptic feedback versus box trainer (BT) in laparoscopic training: a systematic review and meta-analysis. *Cureus*. 2025;17(2):e78910. doi:10.7759/cureus.78910.
5. Joseph FJ, Vanluchene HER, Bervini D. Simulation training approaches in intracranial aneurysm surgery-a systematic review. *Neurosurg Rev*. 2023;46(1):101. doi:10.1007/s10143-023-01997-7.



6. Jourdes F, Valentin B, Allard J, Duriez C, Seeliger B. Visual haptic feedback for training of robotic suturing. *Front Robot AI*. 2022;9:800232. doi:10.3389/frobt.2022.800232.
7. Neri A, Coduri M, Penza V, Santangelo A, Oliveri A, Turco E, et al. A novel affordable user interface for robotic surgery training: design, development and usability study. *Front Digit Health*. 2024;6:1428534. doi:10.3389/fdgth.2024.1428534.
8. Busaidy KF. Advances in surgical training using simulation. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*. 2019;31(4):621-626. doi:10.1016/j.coms.2019.07.006.
9. Davidson EL, Penniston KL, Farhat WA. Advancements in surgical education: exploring animal and simulation models in fetal and neonatal surgery training. *Front Pediatr*. 2024;12:1402596. doi:10.3389/fped.2024.1402596.
10. Papanikolaou IG, Haidopoulos D, Paschopoulos M, Chatzipapas I, Loutradis D, Vlahos NF. Changing the way we train surgeons in the 21st century: a narrative comparative review focused on box trainers and virtual reality simulators. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*. 2019;235:13-18. doi:10.1016/j.ejogrb.2019.01.016.
11. Lahanas V, Georgiou E, Loukas C. Surgical simulation training systems: box trainers, virtual reality and augmented reality simulators. *Int J Adv Robot Autom*. 2016;1(2):1-9. doi:10.15226/2473-3032/1/2/00109.
12. Halman J, Tencer S, Siemiński M. Artificial intelligence and extended reality in the training of vascular surgeons: a narrative review. *Med Sci*. 2025;13(3):126. doi:10.3390/medsci13030126.
13. Serrano CM, Atenas MJ, Rodriguez PJ, Vervoorn JM. From virtual reality to reality: fine-tuning the taxonomy for extended reality simulation in dental education. *Eur J Dent Educ*. 2025;29(3):486-496. doi:10.1111/eje.13064.
14. Dandu C, Creisher B, Davis M, Lin M, Schenke S, Aboian E. Integration of high-resolution mixed reality models into resident training. *J Vasc Surg Cases Innov Tech*. 2026;12(2):102133. doi:10.1016/j.jvscit.2026.102133.
15. Rangarajan K, Davis H, Pucher PH. Systematic review of virtual haptics in surgical simulation: a valid educational tool? *J Surg Educ*. 2020;77(2):337-347. doi:10.1016/j.jsurg.2019.09.006.
16. Sanfilippo F, Salvietti G, Blažauskas T, Gabriele G, Zafar M, Hua MT, et al. Integrating VR, AR, and haptics in basic surgical skills training: a review and perspective. *IEEE Access*. 2025;13:99203-99220. doi:10.1109/ACCESS.2025.3574265.
17. Tjønnås MS, Das A, Våpenstad C, Ose SO. Simulation-based skills training: a qualitative interview study exploring surgical trainees' experience of stress. *Adv Simul (Lond)*. 2022;7(1):33. doi:10.1186/s41077-022-00231-2.



18. Mendes KDS, Silveira RCCP, Galvão CM. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto Contexto Enferm*. 2008;17(4):758-764. doi:10.1590/S0104-07072008000400018.
19. Shea BJ, Reeves BC, Wells G, Thuku M, Hamel C, Moran J, et al. AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. *BMJ*. 2017 Sep 21;358:j4008. doi:10.1136/bmj.j4008.
20. Hilton M. JBI critical appraisal checklist for systematic reviews and research syntheses (product review). *J Can Health Libr Assoc [Internet]*. 2024 Dec. 1 [cited 2026 May 13];45(3). Available from: <https://journals.library.ualberta.ca/jchla/index.php/jchla/article/view/29801>
21. Mackenzie CF, Harris TE, Shipper AG, Elster E, Bowyer MW. Virtual reality and haptic interfaces for civilian and military open trauma surgery training: a systematic review. *Injury*. 2022;53(11):3575-3585. doi:10.1016/j.injury.2022.08.003.
22. Gani A, Pickering O, Ellis C, Sabri O, Pucher P. Impact of haptic feedback on surgical training outcomes: a randomised controlled trial of haptic versus non-haptic immersive virtual reality training. *Ann Med Surg (Lond)*. 2022;83:104734. doi:10.1016/j.amsu.2022.104734.
23. Hudise JY, Mojiri ME, Shawish AM, Majrashi KA, Ayoub AY, Alshammakhi AM, et al. The role of virtual reality in advancing surgical training in otolaryngology: a systematic review. *Cureus*. 2024;16(10):e71222. doi:10.7759/cureus.71222.
24. Landau M, Comeaux M, Mortell T, Boyle R, Imbrescia K, Chaffin AE. Characterizing the untapped potential of virtual reality in plastic and reconstructive surgical training: a systematic review on skill transferability. *JPRAS Open*. 2024;41:295-310. doi:10.1016/j.jpra.2024.06.015.
25. Azher S, Mills A, He J, Hyjazie T, Tokuno J, Quaiattini A, et al. Findings favor haptics feedback in virtual simulation surgical education: an updated systematic and scoping review. *Surg Innov*. 2024;31(3):331-341. doi:10.1177/15533506241238263.
26. Duncombe J, Kassam AA, de Brosses PC, Harris D, Buckingham G. Investigating hip arthroplasty femur preparation training using a haptic-enabled virtual reality simulation. *Surg Innov*. 2025;33(2):169-180. doi:10.1177/15533506251383830.
27. Roy M, Priyadarshini T, Ashika MS, Das G, Patro BP, Bharadwaj S. Simulation-based learning in orthopaedics: a qualitative systematic review. *J Clin Orthop Trauma*. 2025;65:102986. doi:10.1016/j.jcot.2025.102986.