

# História da simulação cirúrgica e sua aplicação em Neurocirurgia

## *History of surgical simulation and its application in Neurosurgery*

Giselle Coelho<sup>1,2</sup> ✉, Thiago Vieira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Neurocirurgia do Hospital Santa Marcelina. São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Scientific Innovation and Education Development Institute (SIEDI). São Paulo, SP, Brasil

<sup>3</sup> Faculdade de Medicina Nova Esperança (FAMENE). João Pessoa, PB, Brasil.

### Como citar este artigo (How to cite this article):

Coelho G, Vieira T. História da simulação cirúrgica e sua aplicação em Neurocirurgia (*History of surgical simulation and its application in Neurosurgery*). Sci Med. 2018;28(1):ID29688. <http://doi.org/10.15448/1980-6108.2018.1.29688>

### RESUMO

**OBJETIVOS:** Neste artigo, os autores abordam a evolução histórica da simulação cirúrgica, tendo como foco a sua aplicação em Neurocirurgia. **MÉTODOS:** A revisão da literatura foi feita nas bases de dados PubMed/Medline e Scopus, utilizando os termos “*history AND simulation*”; e “*simulation AND neurosurgery*”. Não houve limite de data de publicação.

**RESULTADOS:** Foram selecionados 30 artigos cujo conteúdo inclui dados de interesse para o objetivo do estudo. A simulação tem sido usada durante séculos de várias formas, incluindo dissecação de cadáveres pelos primeiros médicos (como Galeno) e treinamento militar (como por exemplo nos jogos de guerra). Modelos anatômicos foram criados no século XVIII e seguiram se aperfeiçoando nos séculos seguintes. Já a simulação por realidade virtual foi primeiramente utilizada em 1987, popularizando-se no início da década de 1990. Posteriormente foram criados modelos anatômicos sintéticos que reproduzem cenários cirúrgicos próximos ao real, com grande aplicabilidade atualmente.

**CONCLUSÕES:** A revisão da literatura destacou aspectos evolutivos da simulação e sua aplicação atual em educação médica. As inovações nesse campo foram muito apreciadas por membros da comunidade neurocirúrgica, que reconheceram o vasto potencial da simulação para revolucionar esta especialidade, onde erros intraoperatórios podem ter consequências desastrosas. Esta revisão histórica poderá contribuir para melhor compreensão do relevante papel da simulação e também para sua implementação no currículo médico, especialmente em especialidades de alta complexidade, como a Neurocirurgia.

**DESCRITORES:** simulação; história da medicina; educação médica; cirurgia; neurocirurgia.

### ABSTRACT

**OBJECTIVES:** In this article, the authors address the historical evolution of surgical simulation, focusing on its application in Neurosurgery. **METHODS:** Literature search was done in the PubMed/Medline and Scopus databases, using the terms “*history AND simulation*”; and “*simulation AND neurosurgery*”. There was no limit for the publication date.

**RESULTS:** We selected 30 articles whose contents included data of interest for the objective of the study. Simulation has been used for centuries in a variety of ways, including the dissection of corpses by the early physicians (such as Galeno) and military training (for example in war games). Anatomical models were created in the eighteenth century and continued to improve in the following centuries. Virtual reality simulation was first used in 1987 and became popular in the early 1990s. Subsequently, synthetic anatomical models were created that reproduce surgical scenarios close to the real one, with great applicability today.

**CONCLUSIONS:** This literature review highlighted evolutionary aspects of simulation and its current application in medical education. Innovations in this field were highly appreciated by members of the neurosurgical community who recognized the vast potential of simulation to revolutionize this specialty, where intraoperative errors can have disastrous consequences. This historical review may contribute to a better understanding of the relevant role of simulation and for its implementation in the medical curriculum, especially in high complexity specialties such as Neurosurgery.

**KEYWORDS:** simulation; history of medicine; medical education; surgery; neurosurgery.

**Recebido:** 14/01/2018

**Aceito:** 30/03/2018

**Publicado:** 11/04/2018

✉ **Correspondência:** [gigicoelho7@hotmail.com](mailto:gigicoelho7@hotmail.com)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9288-0356>

Hospital Santa Marcelina

Rua Santa Marcelina, 177 – Itaquera – CEP 08270- 070, São Paulo, SP, Brasil



Este artigo está licenciado sob forma de uma licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a publicação original seja corretamente citada. [http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pt\\_BR](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pt_BR)

## HISTÓRIA DA SIMULAÇÃO CIRÚRGICA

O conceito de simulação envolve o uso de recursos (virtuais ou realísticos) para reproduzir a experiência da vida real. Simuladores cirúrgicos tiveram origem há mais de 2500 anos, quando foram primeiramente utilizados para planejar procedimentos inovadores enquanto mantinham a segurança do paciente. Um dos primeiros exemplos registrados de simulação cirúrgica foi o uso de modelos de folhas e barro, na Índia, por volta de 600 aC para conceituar a reconstrução nasal. Outros exemplos de simuladores para treinamento cirúrgico envolveram o uso de modelos de madeira, animais vivos e cadáveres humanos [1-4].

Os trabalhos de Galeno (129-216), Leonardo da Vinci (1452-1519), Andreas Vesalius (1514-1564) – este último considerado o pai da anatomia moderna – e outros, forneceram importantes informações sobre o corpo humano [5,6]. Ludovico Cardi (1559-1613), um pintor italiano conhecido como Cigoli, desenvolveu em 1598 o primeiro modelo anatômico de cera, o “Lo Scorticato”, exibido até hoje em uma cópia de bronze no Museu Nacional de Bargello, em Florença (**Figura 1**) [7]. Ambroise Paré (1510-1590) considerado um dos pais da cirurgia, era conhecido por levar para casa cadáveres embalsamados para praticar novas técnicas cirúrgicas [8].



**Figura 1.** Cópia de bronze “Lo Scorticato” exibido a no Museu Nacional de Bargello em Florença/Itália.

Na história da simulação é importante reconhecer a grande influência da especialidade de Ginecologia e Obstetrícia no desenvolvimento de modelos anatômicos. Em meados do século XVIII, modelos obstétricos foram criados para treinar cirurgiões e parteiras, diminuindo as complicações nos partos. Em Bolonha, Itália, Giovanni Galli projetou um parto simulado a partir de um útero de vidro com uma pelve e um feto flexível [7].

Na Grã-Bretanha, um modelo ginecológico foi desenvolvido por Richard Manningham em 1739. Na França, a repercussão dos simuladores obstétricos foi bastante significativa, pelos diversos cursos sobre gerenciamento do parto criados com base nos modelos. Entre 1770 e 1771, Marie Catherine Bihéron, anatomista francesa conhecida por fazer modelos de cera dissecáveis, desenvolveu um simulador que reproduzia exatamente todas as etapas e mecanismos do parto, inclusive com um cóccix móvel, um colo de útero que se movimentava “sob demanda” e fetos removíveis. Na evolução desses modelos, Angelique Marguerite Le Boursier du Coudray (1712-1790), uma parteira, modernizou a pedagogia obstétrica com um manequim que incluía esponjas para liberar líquidos claros e vermelhos, simulando líquido amniótico e sangue, nos momentos apropriados. Entre os modelos históricos de maior repercussão incluem-se os fetos construídos por William Smellie (1697-1763), que tinham grande semelhança com a realidade. Considerando esses fatos na história da simulação na educação médica, percebe-se que os modelos obstétricos foram a base para a simulação cirúrgica [7].

O próximo grande avanço em simulação foi desenvolvido para os procedimentos cirúrgicos em meados do século XIX. Foram criados modelos para cirurgia de hérnia (Howard, 1868), para cirurgias no globo ocular realizadas em modelos animais (porcos e ovelhas) e também modelos sintéticos para ensino da técnica de intubação orotraqueal, relatados por Sholossarek em 1894, Viena [7].

No século XX os simuladores ficaram cada vez mais completos devido à inovação tecnológica. Naquele momento foi desenvolvido o primeiro manequim que permite a simulação de um ato médico completo: o Manequim Ressusci Anne, que ensina os princípios de ressuscitação cardiopulmonar, desenvolvidos por Peter Safar (1924-2003) [8]. Entretanto, a inovação com maior potencial para ampliar o campo de simulação cirúrgica só veio com a introdução da realidade virtual nos anos 1990. De acordo com as novas tecnologias, foram criados simuladores virtuais e modelos anatômicos sintéticos que puderam reproduzir cenários

mais próximos da realidade [9-11]. A colecistectomia laparoscópica tornou-se o primeiro procedimento construído como simulador virtual [8].

## MÉTODOS DE TREINAMENTO

Durante os últimos 20 anos, a simulação foi difundida como uma importante ferramenta para educação cirúrgica. O número de publicações relativas ao tema cresceu exponencialmente. A indústria aérea, com o desenvolvimento de simuladores de voo e métodos de treinamento de pilotos, provou ser um precedente excelente para inovação em educação médica. Muitos educadores acreditam que tais métodos são a chave para apressar a aquisição de habilidades fundamentais e, assim, obter a melhoria de desempenho entre os residentes em medicina clínica e cirúrgica. Um estudo da Universidade de Yale demonstrou que o treinamento com simulador diminuiu em 30% o tempo cirúrgico e reduziu os erros intraoperatórios em 85% [13, 14].

Desde as primeiras escolas médicas, exigiu-se dos estudantes e residentes que pratiquem a dissecação em cadáveres, não apenas para aprenderem anatomia, mas também para estarem familiarizados com os instrumentos básicos e seus usos apropriados [9, 15, 16]. Posteriormente, o treinamento com animais anestesiados possibilitou outros procedimentos, tais como grandes intervenções cirúrgicas (esplenectomia, nefrectomia e ressecções de intestino) e treinamento de situações de emergência, como hemorragias [9, 16].

O uso de simuladores no treinamento médico intensificou-se na última década. Os métodos de treinamento em cirurgia podem ser agrupados em quatro amplas categorias: 1) treinamento com espécimes cadavéricos; 2) modelos animais; 3) simuladores de realidade virtual; 4) treinamento com modelos físicos (sintéticos). Os simuladores podem também ser classificados como baixa e alta fidelidade. São considerados de baixa fidelidade modelos que permitem apenas a prática de habilidades individuais ou algumas técnicas. Eles são melhor utilizados por jovens cirurgiões durante a prática de habilidades cirúrgicas básicas, tais como as que requerem apenas a coordenação de olhos e mãos. Já os simuladores de alta fidelidade podem reproduzir uma cirurgia completa, com alto grau de realismo, possibilitando o treinamento de grande variedade de habilidades, sendo melhor explorados por cirurgiões experientes. A prática com cada um destes métodos apresenta vantagens e desvantagens que estão sendo elucidadas em processos de validação. A escolha do modelo de

treinamento mais apropriado deve levar em conta, entre outras qualidades, a eficácia, validade, custo-efetividade e versatilidade [17-21].

A dissecação de espécimes cadavéricos proporciona fidelidade anatômica e requer habilidades psicomotoras semelhantes às utilizadas na sala cirúrgica. Em geral, eles mostram uma representação tecidual precisa. Entretanto, como desvantagens conhecidas desse método citam-se: alto custo; implicações éticas (sendo proibidos em vários países); necessidade de uma equipe especializada e de um laboratório equipado; não apresentarem alterações patológicas; e não serem reutilizáveis. Já a realidade virtual é reutilizável sem custo adicional, e a simulação patológica é possível. As desvantagens principais dos métodos de realidade virtual são: alto custo; manutenção técnica; subscrições de software e resposta tátil pouco realística (por não permitir o uso de instrumentais reais) [5, 7].

Já os modelos anatômicos sintéticos são portáteis, reutilizáveis e permitem a simulação de patologias. Algumas desvantagens podem ser citadas como: pobre representação tecidual (em alguns casos) e, geralmente, não são reutilizáveis [9, 12].

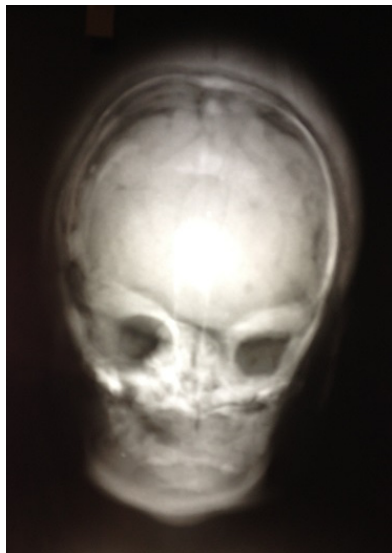
Em uma especialidade de alta complexidade, como a Neurocirurgia, é ainda mais evidente que a sala de cirurgia não é o lugar ideal para a aprendizagem inicial. Há necessidade de utilização de métodos que possibilitem o aperfeiçoamento das habilidades técnicas, dada a mínima possibilidade de falha. Desse modo, os simuladores em Neurocirurgia estão em contínuo desenvolvimento, desde o simulador de cuidados intensivos neurocirúrgicos (com Musacchio) até procedimentos cirúrgicos (eletivos ou de emergência), como os modelos de craniotomia para trauma produzidos pela Uniformed Services University, Bethesda, Maryland [12].

Na Neurocirurgia Vasculare houve um grande avanço graças ao advento de exames de imagem cerebrovasculares, que permitem a criação de modelos 3D sintéticos que melhoram a compreensão das características dos vasos cerebrais e suas alterações. No campo da neurocirurgia minimamente invasiva, os simuladores são quase que imprescindíveis, tanto para execução do ato operatório como em sua aprendizagem. Diferentes modelos de endoscopia virtual foram desenvolvidos para familiarização dos cirurgiões e estudantes com os instrumentos e técnicas minimamente invasivas, como Neurobot (Fokker Control Systems, Schiphol, Holanda) e Vivendi (Universidade de Tubingen, Alemanha). Nas cirurgias de ressecção de tumor cerebral, tem-se o Dextroscópio (Bracco AMT, Princeton, Nova Jersey), descrito

também para outras intervenções neurocirúrgicas, descompressões, patologias vasculares, bem como procedimentos de tratamento da epilepsia [12].

Já em Neurocirurgia Pediátrica foram desenvolvidos simuladores para treinamento de neuroendoscopia e abordagem em cranioestenose, que apresentam interface radiológica (**Figura 2**), ou seja, podem ser submetidos ao raio-X e à tomografia computadorizada [22-23]; e um simulador que permite a men-

suração do *feedback* tátil em cirurgias de coluna [9]. O simulador para treinamento neuroendoscópico permite a visualização e identificação das estruturas internas do ventrículo cerebral, bem como a realização de procedimentos como terceiroventriculostomia e ressecção de lesões intraventriculares (**Figura 3**). Já o simulador de cranioestenose permite a realização de osteotomias e reconstrução craniana, apresentando efeito de sangramento (**Figuras 4 e 5**).



**Figura 2.** Interface radiológica dos simuladores pediátricos. Raio-x de crânio com grande semelhança ao raio-x de uma criança real.



**Figura 4.** Simulador pediátrico para treinamento de cranioestenose. Nota-se a presença de um crânio "escafocefálico", em formato de quilha de navio (diâmetro ântero-posterior é maior que o látero-lateral).



**Figura 3.** Simulador pediátrico para treinamento de neuroendoscopia. Os dois catéteres laterais têm a função de preencher os ventrículos simulando a sua dilatação (hidrocefalia).



**Figura 5.** Simulador pediátrico para treinamento de cranioestenose durante o procedimento simulado. Pode-se perceber o efeito sangrante ao realizar a dissecação por planos.

## ESTADO DA ARTE EM SIMULAÇÃO CIRÚRGICA

Todas as formas de simulação (espécimes cada-  
véricos, simuladores físicos e virtuais) desempenham  
um papel em fases diferentes do aprendizado e devem  
ser considerados no desenvolvimento de um programa  
educacional baseado em simulação [24].

O treinamento em um modelo antes da cirurgia  
real traz maior segurança ao ato operatório, podendo  
diminuir o tempo cirúrgico, prever possíveis com-  
plicações e auxiliar na definição da melhor técnica.  
Desse modo, de uma forma geral, pode melhorar o  
prognóstico do paciente, permitindo menor tempo  
de internação, diminuindo assim o risco de infecção  
e outras intercorrências, além de reduzir os custos  
hospitalares, visto que há otimização do material  
cirúrgico e menor tempo de ocupação de sala. Este  
somatório de vantagens é ainda mais relevante quando  
se fala em Neurocirurgia e nas suas diferentes subáreas.  
A influência da simulação nessa especialidade tão  
complexa foi extremamente significativa nos últimos  
anos. Quatro condições devem ser priorizadas em um  
currículo com simuladores cirúrgicos para maximizar  
sua utilidade: participação obrigatória, treinamento  
baseado em proficiência, agenda para simulação e  
treinamento intenso [1, 6, 9, 20-23].

A comunidade neurocirúrgica reconheceu os  
benefícios potenciais da simulação e tornou-se líder  
em pesquisa dessa ferramenta de aprendizagem.  
Numerosos estudos relatam métodos modernos  
de simulação e recentes revisões resumem essas  
informações [25-27]. Indubitavelmente, no futuro,  
os simuladores se tornarão uma parte integrante do  
currículo da maioria dos programas cirúrgicos. Dessa  
forma, as seguintes considerações podem ser inferidas  
da literatura: 1) a simulação integrada na educação  
neurocirúrgica deve ser feita principalmente tendo em  
mente o ensino dos residentes [28]; 2) no treinamento  
do residente, é essencial a integração da simulação com  
um currículo formalizado [26]; 3) a combinação de  
diferentes modalidades de simulação parece ser efetiva,  
assim, residentes em níveis diferentes de treinamento  
devem diversificar os tipos de simulação, com  
evidentes benefícios educacionais; 4) a distribuição  
de tempo de prática permite a aquisição mais eficiente

da habilidade quando se utiliza a simulação para  
propósitos educacionais [29]; 5) realizar avaliação  
periódica do cirurgião relativa à performance após  
a simulação é importante para se obter o máximo  
benefício [30].

## CONCLUSÕES

O currículo com conceito de simulação foi pro-  
jetado para melhorar a competência de estudantes  
e residentes, identificando armadilhas e corrigindo  
erros conceituais ou técnicos para cada procedimento.  
Embora implementar a simulação no processo edu-  
cacional possa requerer tempo e, inicialmente, possa  
apresentar alto custo, o seguinte pensamento deve ser  
ênfático: se um único paciente puder ser beneficiado  
com esta forma adjuvante de treinamento, isto por si  
só já apresenta inegável valor.

Esta revisão histórica poderá contribuir para  
melhor compreensão do relevante papel da simulação  
e sua futura implementação no currículo das escolas de  
Medicina, considerando principalmente especialidades  
de alta complexidade, como a Neurocirurgia. Treinar  
e aperfeiçoar habilidades cirúrgicas em simuladores  
pode tornar a prática médica notavelmente mais segura,  
sem riscos para o paciente.

Entretanto, no treinamento neurocirúrgico, a simu-  
lação ainda é um campo de estudo relativamente novo,  
que requer investigação adicional e validação. Ainda  
são necessários estudos que tragam mais informações  
sobre os benefícios dos vários tipos de simuladores,  
estabeleçam e usem medidas objetivas e reprodutíveis  
de avaliação e aperfeiçoem as estratégias de im-  
plementação da simulação nos currículos médicos.

## NOTAS

### Apoio financeiro

Este estudo não recebeu apoio financeiro de fontes externas.

### Declaração de conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesses  
relevantes ao conteúdo desta revisão.

### Contribuições dos autores

Ambos os autores fizeram contribuições substanciais para  
concepção do estudo e aquisição dos dados, redação do trabalho e  
aprovação final da versão para publicação.

## REFERÊNCIAS

1. Cobb MI1, Taekman JM, Zomorodi AR, Gonzalez LF3, Turner DA3. Simulation in Neurosurgery-A brief review and commentary. *World Neurosurg.* 2016;89:583-6. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.11.068>
2. Arora S, Aggarwal R, Sevdalis N, Moran A, Sirimanna P, Kneebone R, Darzi A. Development and validation of mental practice as a training strategy for laparoscopic surgery. *Surg Endosc.* 2010;24:179-87. <https://doi.org/10.1007/s00464-009-0624-y>
3. Arora S, Aggarwal R, Sirimanna P, Moran A, Grantcharov T, Kneebone R, Darzi A. Mental practice enhances surgical technical skills: a randomized controlled study. *Ann Surg.* 2011;253:265-70. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e318207a789>
4. McGaghie WC, Issenberg SB, Barsuk JH, Wayne DB. A critical review of simulation-based mastery learning with translational outcomes. *Med Educ.* 2014;48:375-85. <https://doi.org/10.1111/medu.12391>
5. Kunkler K. The role of medical simulation: an overview. *Int J Med Rob Comput Assisted Surg.* 2006;2:203-10. <https://doi.org/10.1002/rcs.101>
6. Limbrick DD Jr, Dacey RG Jr. Simulation in neurosurgery: possibilities and practicalities: foreword. *Neurosurgery.* 2013;73(Suppl 1):1-3. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000094>
7. Owen H. Early use of simulation in medical education. *Simul Healthc.* 2012;7(2):102-16. <https://doi.org/10.1097/SLH.0b013e3182415a91>
8. Kazan R, Cyr S, Hemmerling TM, Lin SJ, Gilardino MS. The Evolution of Surgical Simulation: The Current State and Future Avenues for Plastic Surgery Education. *American Society of Plastic Surgeons.* 2017;139(2):533e-43e. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000002956>
9. Mattei TA, Frank C, Bailey J, Lesle E, Macuk A, Lesniak M, Patel A, Morris MJ, Nair K, Lin JJ. Design of a synthetic simulator for pediatric lumbar spine pathologies. *J Neurosurg Pediatr.* 2013;12(2):192-201. <https://doi.org/10.3171/2013.4.PEDS12540>
10. Lee RA, van Zundert TC, van Koesveld JJ, van Zundert AA, Stolker RJ, Wieringa PA, Gatt SP. Evaluation of the Mediseus epidural simulator. *Anaesth Intensive Care.* 2012;40(2):311-8.
11. Price J, Naik V, Boodhwani M, Brandys T, Hendry P, Lam BK: A randomized evaluation of simulation training on performance of vascular anastomosis on a high-fidelity in vivo model: the role of deliberate practice. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2011;142:496-503. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2011.05.015>
12. Satava RM. The future of surgical simulation and surgical robotics. *Bull Am Coll Surg.* 2007;92(3):13-9.
13. Coelho G, Zanon N, Warf Benjamin. The role of simulation in neurosurgery. *Childs Nerv Syst.* 2014;30(12):1997-2000. <https://doi.org/10.1007/s00381-014-2548-7>
14. Nauck ET: On the anatomical, surgical and obstetrical schools excluding universities from the 16th to the 19th century. 2nd part of review study. *Anat Anz.* 1965;116:202-16.
15. Palter VN, Grantcharov T, Harvey A, Macrae HM. Ex vivo technical skills training transfers to the operating room and enhances cognitive learning: a randomized controlled trial. *Ann Surg* 2011;253:886-9. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e31821263ec>
16. Bova FJ, Rajon DA, Friedman WA, Murad GJ, Hoh DJ, Jacob RP, Lamptang S, Lizdas DE, Lombard G, Lister JR. Procedures Mixed-reality simulation for neurosurgical procedures. *Neurosurgery.* 2013;73 Suppl 1:138-45. <https://doi.org/10.1227/NEU.00000000000000113>
17. Ziv A, Wolpe PR, Small SD, Glick S. Simulation-based medical education: an ethical imperative. *Acad Med.* 2003;78(8):783-8. <https://doi.org/10.1097/00001888-200308000-00006>
18. Issenberg SB, McGaghie WC, Petrusa ER, Lee Gordon D, Scalese RJ. Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: a BEME systematic review. *Med Teach.* 2005;27(1):10-28. <https://doi.org/10.1080/01421590500046924>
19. Ryan JR, Chen T, Nakaji P, Frakes DH, Gonzalez LF. Ventriculostomy simulation using patient-specific ventricular anatomy, 3D printing, and hydrogel casting. *World Neurosurg.* 2015;84:1333-9. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.06.016>
20. Parker E. Bohm and Paul M. Arnold. Simulation and resident education in spinal neurosurgery. *Surg Neurol Int.* 2015 Feb 26;6:33. <https://doi.org/10.4103/2152-7806.152146>
21. Rehder R, Abd-El-Barr M, Hooten K, Weinstock P, Madsen JR, Cohen AR. The role of simulation in neurosurgery. *Childs Nerv Syst.* 2016;32(1):43-54. <https://doi.org/10.1007/s00381-015-2923-z>
22. Coelho G, Warf B, Lyra M, Zanon N. Anatomical pediatric model for craniosynostosis surgical training. *Childs Nerv Syst.* 2014;30(12):2009-14. <https://doi.org/10.1007/s00381-014-2537-x>
23. Coelho G, Zymberg S, Lyra M, Zanon N, Warf B. New anatomical simulator for pediatric neuroendoscopic practice. *Childs Nerv Syst.* 2015;31(2):213-9. <https://doi.org/10.1007/s00381-014-2538-9>
24. Green ML, Aagaard EM, Caverzagie KJ, Chick DA, Holmboe E, Kane G, Smith CD, Lobst W. Charting the road to competence: developmental milestones for internal medicine residency training. *J Grad Med Educ.* 2009;1:5-20. <https://doi.org/10.4300/01.01.0003>
25. Chan S, Conti F, Salisbury K, Blevins NH. Virtual reality simulation in neurosurgery: Technologies and evolution. *Neurosurgery.* 2013;72(Suppl 1):154-64. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3182750d26>

26. Kirkman MA, Ahmed M, Albert AF, Wilson MH, Nandi D, Sevdalis N. The use of simulation in neurosurgical education and training. *J Neurosurg.* 2014;121:228-46. <https://doi.org/10.3171/2014.5.JNS131766>
27. El Ahmadieh TY, El Tecele NE, Aoun SG, Yip BK, Ganju A, Bendok BR. How can simulation thrive as an educational tool? Just ask the residents. *Neurosurgery.* 2012;71(6):N18-9. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000423044.97311.be>
28. Gelinias-Phaneuf N, Del Maestro RF. Surgical expertise in neurosurgery: Integrating theory into practice. *Neurosurgery.* 2013;73(Suppl 1):30-8. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000115>
29. Stefanidis D, Heniford BT. The formula for a successful laparoscopic skills curriculum. *Arch Surg.* 2009;144(1):77-82. <https://doi.org/10.1001/archsurg.2008.528>
30. Glavin RJ. Simulation: An Agenda for the 21st Century. *Simul Healthc.* 2007;2(2):83-5. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3180592e7a> 