Resultados preliminares da utilização do sistema robótico na cirurgia da coluna vertebral

Preliminary Results of Robotic System Use in Spine Surgery

Helton Luiz A. Defino[1] Vinicius Marques Carneiro[2] Matheus Pippa Defino[1] Rian Souza Vieira[1] Thiago Dorigão[1] Denylson Sanches Fernandes[2]

[1] Departamento de Ortopedia e Anestesiologia, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP, Brasil
[2] Divisão de Neurocirurgia, Departamento de Cirurgia e Anatomia, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP, Brasil

Endereço para correspondência Helton L. A. Defino, Departamento de Ortopedia e Anestesiologia, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Avenida Bandeirantes 3.900, Ribeirão Preto, SP, CEP: 14049-900, Brasil (e-mail: hladefin@fmrp.usp.br).

Rev Bras Ortop 2026;61(4):s00461825769.

Resumo

Objetivo Avaliar os resultados preliminares da utilização do sistema robótico na cirurgia da coluna vertebral.

Métodos Realizamos um estudo da série de pacientes operados prospectivamente desde a introdução do sistema robótico (Mazor X Stealth Edition, Medtronic plc) na cirurgia da coluna vertebral. Foram avaliados o tempo de registro da anatomia do paciente, o tempo de fluoroscopia, a quantidade de radiação, o tempo de inserção dos implantes, a acurácia dos implantes e as complicações.

Resultados Foram avaliados 67 pacientes, nos quais foram implantados 415 parafusos pediculares (98 torácicos, 284 lombares, 1 em vértebra de transição e 32 sacrais). O tempo de registro da anatomia do paciente variou de 4 a 71 (média: 16,93 ± 12,49) minutos. O tempo de fluoroscopia variou de 2,3 a 71,20 (média: 12,91 ± 11,52) segundos. A quantidade de radiação utilizada durante o procedimento cirúrgico variou de 0,38 a 12,89 (média: 3,78 ± 3,29) mGy. O tempo da inserção dos implantes no interior dos pedículos variou de 102 a 323 (média: 147,90 ± 45,09) segundos. No plano axial, 95,65% dos implantes eram dos tipos A ou B na escala de Gertzbein-Robbins, e no plano sagital, 96,38%. Não houve abandono do sistema robótico em nenhum paciente. Déficit neurológico foi observado em um paciente.

Conclusão A utilização do sistema robótico apresentou grande precisão na colocação dos implantes, tempo reduzido da utilização da fluoroscopia, quantidade reduzida da

Palavras-chave
- coluna vertebral
- parafusos pediculares
- procedimentos cirúrgicos robóticos
- robótica

Trabalho desenvolvido no Departamento de Ortopedia e Anestesiologia, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, SP, Brasil.

recebido
30 de novembro de 2025
aceito
30 de janeiro de 2026

DOI https://doi.org/10.1055/s-0046-1825769.
ISSN 0102-3616.

© 2026. The Author(s).
This is an open access article published by Thieme under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License, permitting copying and reproduction so long as the original work is given appropriate credit (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Thieme Revinter Publicações Ltda., Rua Rego Freitas, 175, loja 1, República, São Paulo, SP, CEP 01220-010, Brazil

radiação intraoperatória, e o tempo de registro da anatomia do paciente apresentou redução com a aquisição de experiência com a utilização do sistema robótico.

Abstract

Objective To evaluate the preliminary results of the use of the robotic system in spinal surgery.

Methods The current prospective study included patients undergoing spinal surgery since the introduction of the robotic system (Mazor X Stealth Edition, Medtronic plc). The study evaluated the time to record the patient's anatomy, the fluoroscopy time, radiation dose, implant insertion time, implant accuracy, and complications.

Results The study assessed 67 patients who received 415 pedicle screws (98 thoracic, 284 lumbar, 1 in a transitional vertebra, and 32 sacral). The time to record the patient's anatomy ranged from 4 to 71 (mean: 16.93 ± 12.49) minutes. The fluoroscopy time ranged from 2.3 to 71.20 (mean: 12.91 ± 11.52) seconds. The amount of radiation administered during the surgical procedure ranged from 0.38 to 12.89 (mean: 3.78 ± 3.29) mGy. The time for implant insertion into the pedicles ranged from 102 to 323 (mean: 147.90 ± 45.09) seconds. In the axial plane, 95.65% of the implants were types A or B on the Gertzbein-Robbins scale, and, in the sagittal plane, 96.38%. No cases required abandonment of the robotic system. As a complication, a single patient presented with a neurological deficit.

Conclusion The robotic system demonstrated high accuracy in implant placement and, with increasing experience in its use, was associated with reductions in fluoroscopy time, intraoperative radiation exposure, and the time to record the patient's anatomy.

Keywords

- pedicle screw
- robotics
- robotic surgical procedures
- spine

Introdução

Os sistemas robóticos foram originalmente desenvolvidos para aumentar a precisão da colocação dos parafusos pediculares na coluna vertebral.[1,2] O advento da cirurgia minimamente invasiva da coluna vertebral contribuiu significativamente para o desenvolvimento dos sistemas robóticos, e diferentes sistemas foram desenvolvidos.[2–4] Os sistemas robóticos mais frequentemente utilizados para a colocação de parafusos pediculares são: Excelsius GPS (Globus Medical, Inc.), Mazor X Robot (Medtronic plc) e ROSA One (Zimmer Biomet)[5–7] (►**Fig. 1**)

Os sistemas robóticos têm permitido a colocação de implantes no interior do pedículo vertebral com maior precisão e redução significativa da exposição à radiação pelo uso reduzido da fluoroscopia intraoperatória.[8–11] Além disso, esses sistemas apresentam vantagens adicionais, como o menor tempo de recuperação e a menor taxa de complicações em comparação com a cirurgia aberta tradicional, menor permanência hospitalar e menor taxa de infecção.[4,5,12,13]

A utilização da robótica na cirurgia da coluna vertebral requer aprendizado para a sua implementação devido à sua novidade tecnológica, e tem sido recomendado período de aclimatação com os equipamentos e a nova tecnologia.[12,14,15]

Iniciamos a utilização do sistema robótico na cirurgia da coluna vertebral em junho de 2024, e o objetivo deste estudo foi avaliar os resultados preliminares da sua utilização consecutiva em diferentes procedimentos e doenças da coluna vertebral.

Métodos

Foi realizado um estudo transversal que foi aprovado pelo Comitê Local de Ética em Pesquisa (CAAE: 88934425.9.0000.5440). Foram incluídos 67 pacientes nos quais o sistema robótico (Mazor x Stealth Edition, Medtronic plc) foi consecutivamente utilizado nas cirurgias da coluna vertebral de junho de 2024 a julho de 2025.

O sistema robótico utilizado no estudo (►**Fig. 1**) é a versão aprimorada do sistema originalmente desenvolvido em Israel em 2018.[7] Esse sistema integra as ações do sistema robótico com o sistema de navegação intraoperatório. O sistema é composto por um braço com liberdade de movimento nos seis eixos, que é utilizado para a orientação dos instrumentos cirúrgicos (preparo do orifício-piloto, macheamento e colocação dos implantes). O planejamento pré-operatório permite a escolha das dimensões e do local da colocação dos implantes (►**Fig. 2**). Na cirurgia, o dispositivo de referência (garras ou pinos de Schanz) é conectado ao paciente nos processos espinhosos ou na espinha ilíaca posterossuperior. Após a configuração do sistema, registro e fusão das imagens, o plano cirúrgico realizado é transferido



Fig. 1 Sistema robótico Mazor x Stealth Edition (Medtronic plc).

para o sistema robótico, a vértebra-alvo é selecionada, e o preparo do orifício-piloto e a colocação dos implantes são realizados com o posicionamento do braço robótico, que também é acoplado a um sistema de navegação para o acompanhamento dos passos cirúrgicos relacionados ao preparo do orifício-piloto e à colocação dos implantes (►**Fig. 3**).

O planejamento pré-operatório da utilização dos implantes (comprimento, diâmetro e posicionamento no interior do pedículo vertebral) e da montagem final dos sistemas de fixação foi realizado por meio da tomografia computadorizada (TC) pré-operatória de cortes finos (de 1 mm). No momento da cirurgia, foi realizada a aquisição das imagens por meio da fluoroscopia (nas incidências anteroposterior

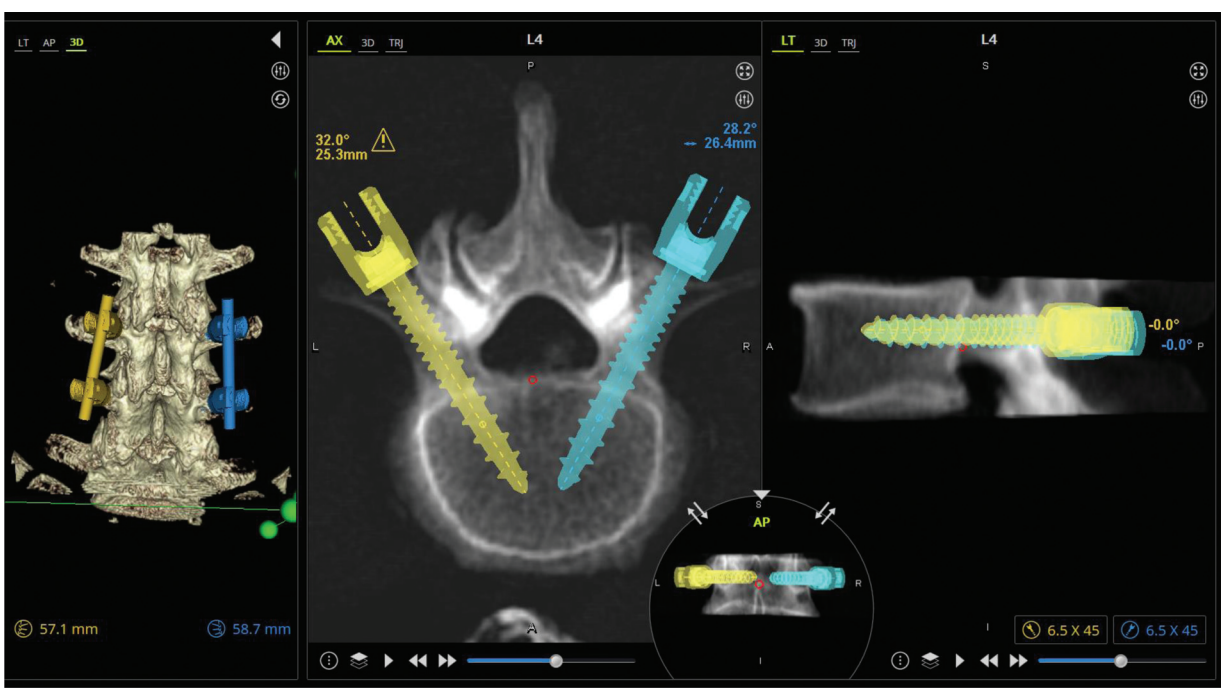

Fig. 2 Planejamento pré-operatório ilustrando o posicionamento dos implantes e a montagem do sistema de fixação

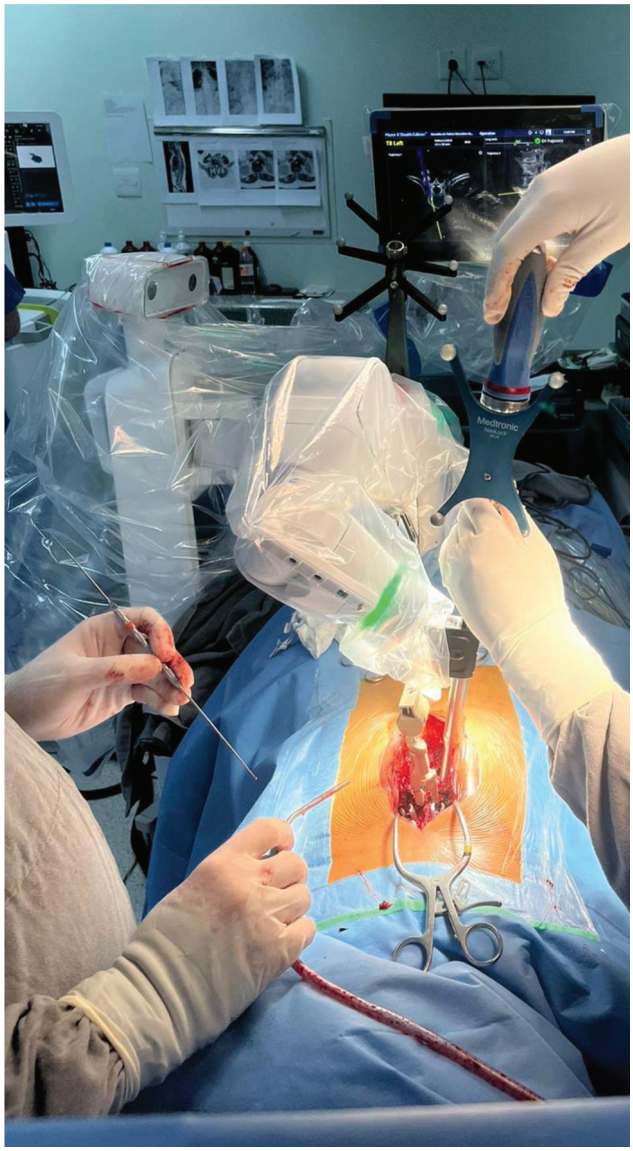

Fig. 3 Fotografia intraoperatória ilustrando a colocação do implante com o auxílio do braço robótico e visualização pela navegação.

[AP] e oblíqua) após o posicionamento do paciente e o acoplamento e ajuste do sistema robótico. As imagens da fluoroscopia intraoperatória são fundidas com as imagens da tomografia pré-operatória, e essa integração das imagens permite que o sistema robótico execute as ações (preparo do orifício-piloto, macheamento e colocação dos parafusos pediculares) sem a necessidade da fluoroscopia intraoperatória. Todas as cirurgias foram realizadas pela via posterior, por meio de incisão mediana.

Os parâmetros selecionados para a avaliação foram: o tempo de registro da anatomia do paciente, o tempo da utilização da fluoroscopia intraoperatória, a quantidade da radiação (mGy) intraoperatória, o tempo da inserção dos implantes, a precisão dos parafusos pediculares e as complicações (abandono da técnica, déficit neurológico e efeitos adversos).

A precisão dos parafusos pediculares foi avaliada nos planos sagital e axial de acordo com a escala de Gertzbein-Robbins:[16] A –parafuso no interior do pedículo sem rotura da parede do pedículo; B – rotura da parede do pedículo < 2 mm; C – rotura de 2 a 4 mm; D – rotura de 4 a 6 mm; e E – rotura > 6 mm. De acordo com a localização, a rotura foi classificada como: 1–medial; 2–lateral; 3–superior; e 4–inferior (►**Fig. 4**).

O estudo estatístico foi realizado por meio da estatística descritiva, o teste de normalidade da amostra, por meio do teste Kolmogorov-Smirnov, e a comparação entre os parâmetros, por meio do teste de Kruskal-Wallis, tendo sido estabelecido o nível de significância de 5% ($p < 0{,}05$).

Resultados

Foram avaliados 67 pacientes (28 do sexo masculino e 39 do sexo feminino) , com idades que variavam de 12 a 88 (média: 59,81 ± 16,29) anos. Foram inseridos parafusos pediculares em 415 pedículos (98 torácicos, 284 lombares, 1 em vértebra de transição e 32 sacrais). A distribuição dos parafusos pediculares nos diferentes níveis está representada na ►**Fig. 5**.

O processo e a duração do registro da anatomia do paciente pelo sistema robótico e a sua interação com o planejamento pré-operatório são denominados *tempos de registro*, e é influenciado pela modalidade de sistema utilizado, pela experiência da equipe cirúrgica e pela complexidade da cirurgia. O tempo de registro variou de 4 a 71 (média: 16,93 ± 12,49) minutos, e os maiores tempo de registro foram observados nos pacientes que apresentaram dificuldade para a aquisição da imagem devido a obesidade, má qualidade do tecido ósseo ou deformidade. O tempo de registro ao longo da utilização do sistema robótico está ilustrado na ►**Fig. 6**, e foi observada a sua redução com o maior tempo de utilização do sistema

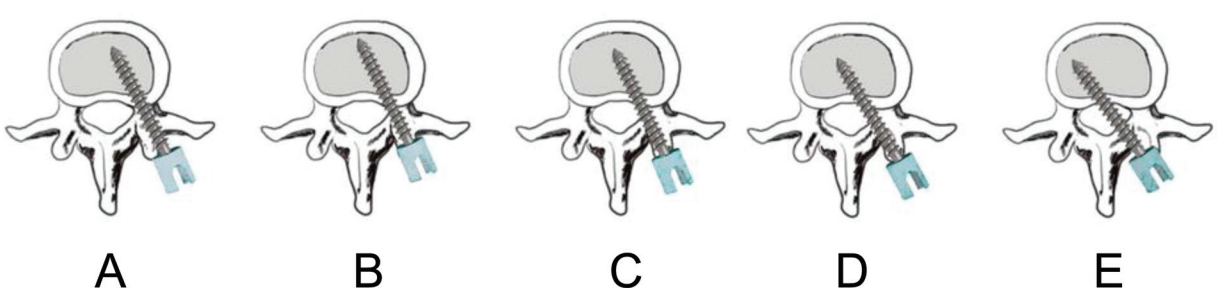

Fig. 4 Escala de Gertzbein-Robins.

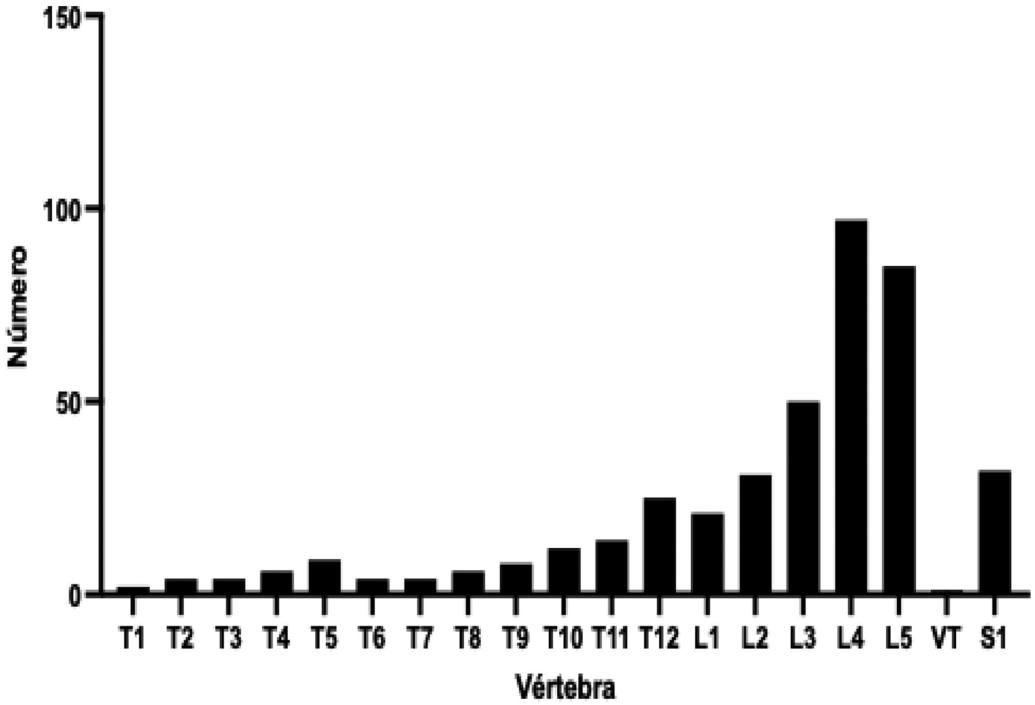

Fig. 5 Distribuição do número de pedículos avaliados na coluna vertebral.

robótico. O tempo de registro dos 20 procedimentos iniciais apresentou diferença estatística (teste de Kruskal-Wallis: $p < 0,05$) em comparação com os procedimentos subsequentes (►**Fig. 6**).

O tempo de fluoroscopia variou de 2,3 a 71,20 (média: $12,91 \pm 11,52$) segundos. A quantidade de radiação utilizada durante o procedimento cirúrgico variou de 0,38 a 12,89 (média: $3,78 \pm 3,29$) mGy. Esses parâmetros evidenciam a baixa quantidade de radiação com a utilização do sistema robótico (►**Fig. 7**).

O tempo da inserção dos implantes no interior dos pedículos variou de 102 a 323 (média: $147,90 \pm 45,09$) segundos (►**Fig. 8**). Esse tempo está ilustrado na figura, e não foi observada diferença estatística no tempo de inserção dos implantes nas vértebras torácicas e lombares, nem entre os 20 procedimentos inicialmente realizados e os subsequentes. (teste de Kruskal-Wallis: $p > 0,05$)

A precisão dos parafusos pediculares no plano axial, de acordo com a escala de Gertzbein-Robins,[16] foi: A em 85,54%; B em 10,11%; C em 2,4% ; D em 0,72%; e E em 1,2%. Os tipos A e B da escala de Gertzbein-Robins[16] têm sido considerados bom padrão de precisão, o que foi observado em 95,65% dos implantes no plano axial e em 96,38% no plano sagital (►**Fig. 9** e ►**Tabela 1**).

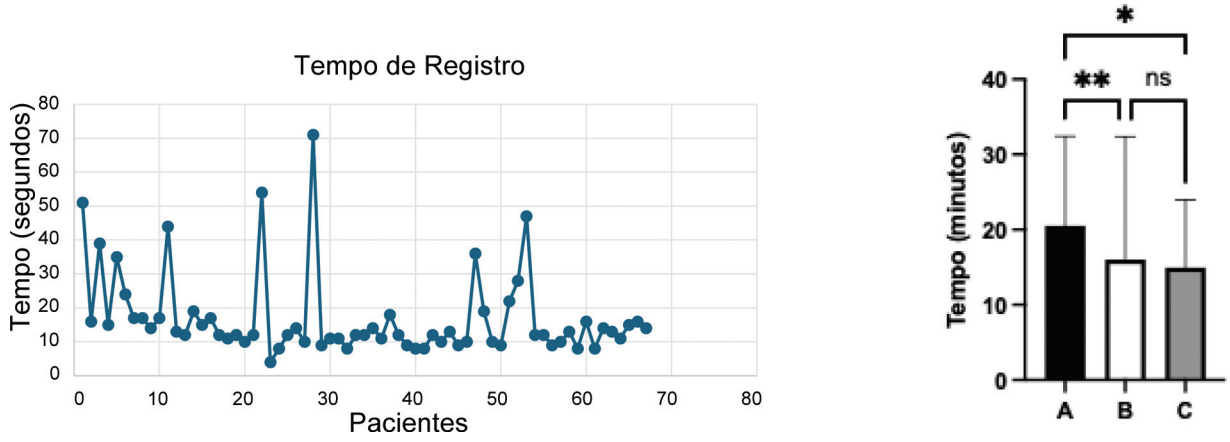

Fig. 6 Gráficos do tempo de registro ao longo da utilização do sistema robótico e comparação do tempo de registro nos subgrupos de 20 pacientes operados. Deve-se observar a diferença estatística no tempo de registro entre os 20 primeiros pacientes operados e os demais (teste de Kruskal-Wallis: $p < 0,05$; o asterisco indica diferença estatística).

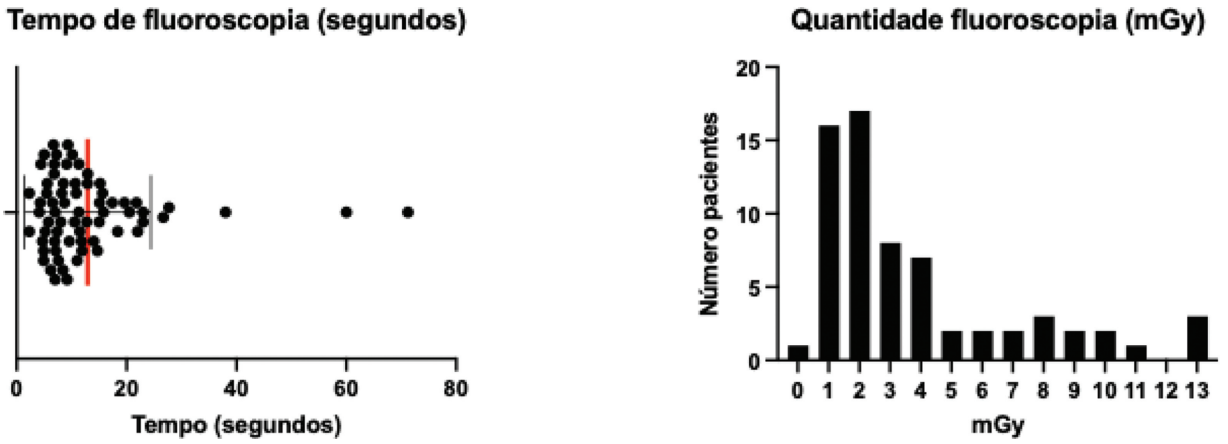

Fig. 7 Tempo de fluoroscopia intraoperatória (segundos) e dose de radiação (mGy).

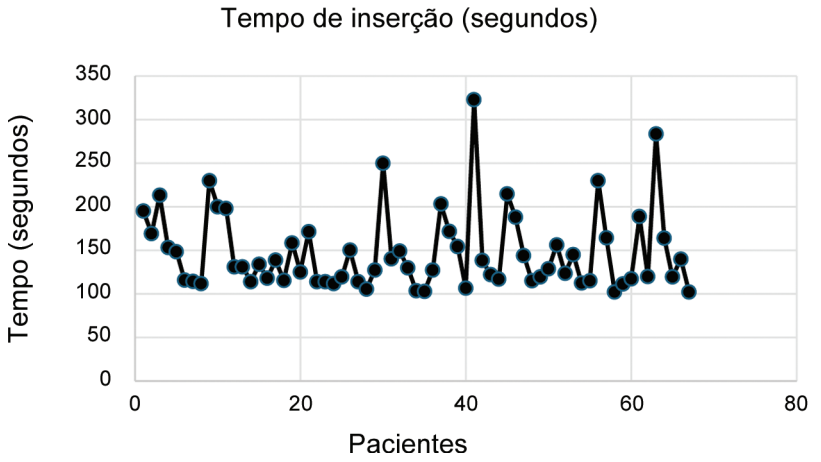

Fig. 8 Gráfico do tempo de inserção dos implantes.

Todos os procedimentos programados para a utilização do sistema robótico foram realizados, e não ocorreu o abandono do sistema robótico na série de pacientes avaliados. Foi observada lesão da raiz nervosa com déficit sensitivo e motor unilateral devido à perfuração do canal vertebral e lesão radicular em um paciente. A lesão neurológica ocorreu devido ao deslocamento unilateral de parte da vértebra osteoporótica fraturada (submetida a

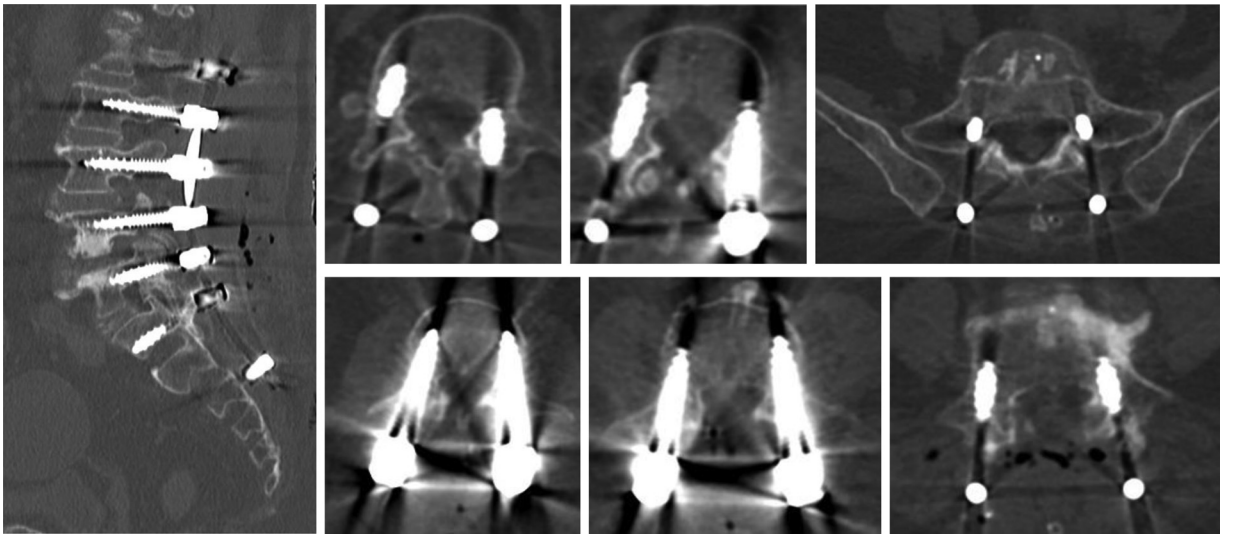

Fig. 9 Tomografia computadorizada pós-operatória ilustrando a posicionamento do posicionamento dos implantes.

Tabela 1 Precisão dos implantes no plano axial e sagital

Plano axial			Plano sagital		
Tipo	Número	%	Tipo	Número	%
A	355	85,54	A	400	96,38
B1	36	8,67	B3	1	0,24
B2	6	1,44	B4	12	2,89
C1	7	1,68	C3	2	0,48
C2	3	0,72	C4	0	0
D1	1	0,24	D3	0	0
D2	2	0,48	D4	0	0
E1	1	0,24	E3	0	0
E2	4	0,96	E4	0	0

cifoplastia), que interferiu no processo do registro das imagens.

Discussão

A utilização dos sistemas robóticos requer aprendizado e experiência, semelhante à utilização de outras novas tecnologias.[17,18] A curva de aprendizado para a utilização dos sistemas robóticos no âmbito da cirurgia da coluna vertebral tem sido principalmente relacionada com o tempo do registro e a precisão dos implantes. A precisão do registro é fundamental para que o sistema robótico posicione os instrumentos e coloque precisamente os implantes no interior das vértebras.[15,18]

A diferença do tempo de registro entre os 20 procedimentos inicialmente realizados na série de pacientes que avaliamos e os procedimentos subsequentes corrobora a importância da curva de aprendizagem, e confirma os relatos de que o tempo de registro diminui com o aumento da realização de procedimentos.[15,18,19]

O tempo da curva de aprendizagem dos sistemas robóticos utilizados na cirurgia da coluna vertebral tem apresentado grande variação e considerado como parâmetros o tempo do procedimento, o tempo de registro, o tempo de inserção dos implantes e a precisão dos implantes.[7,12,18,19] Até o momento, o número de procedimentos necessários para que a curva de aprendizado seja ultrapassada não está definido. Embora a melhora da precisão tenha sido relatada após 17, 18, 20, 25 ou 30 procedimentos, a falta da necessidade da curva de aprendizagem tem sido relatada.[8,12,18–20] Nossos resultados confirmam a necessidade da curva de aprendizagem para a utilização dos sistemas robóticos na cirurgia da coluna vertebral, e observamos diferença significativa no tempo de registro após 20 procedimentos. A precisão, o tempo de registro e o tempo de cirurgia melhoram com a utilização e familiarização com o sistema, o que também está relacionado às características do paciente (obesidade, osteoporose, presença de implantes), ao tipo de procedimento (deformidade, múltiplos níveis) e à sua localização (coluna torácica, lombar, sacral ou ilíaco).[15]

Hyun et al.[8] mencionaram o tempo de inserção dos implantes como parâmetro da curva de aprendizado, e sua redução foi observada durante a utilização do sistema robótico. No entanto, esse parâmetro não apresentou diferença estatística durante a evolução temporal dos procedimentos no grupo de pacientes estudados, nem entre o segmento torácico e lombar.

A utilização dos sistemas robóticos tem proporcionado grande precisão dos parafusos pediculares, sua superioridade em relação à colocação com as mãos livres, navegação com TC ou O-arm, e caracteriza uma das vantagens da sua utilização.[3,5,12,21] Os tipos A e B da escala de Gertzbein-Robbins[16] tem sido considerados o bom padrão para a avaliação da precisão dos implantes, e a porcentagem obtida neste estudo (95,65% dos implantes no plano axial e 96,38% no plano sagital) está de acordo com a literatura pertinente.[5–7,9,22]

Embora alta porcentagem de precisão tenha sido observada, no plano axial, 5,79% dos implantes não apresentaram precisão considerada aceitável (A ou B), e no plano sagital, 3,32%. O mal posicionamento dos implantes e eventos adversos têm sido relatados com a utilização dos sistemas robóticos.[23,24] O mal posicionamento dos implantes observado nessa fase inicial da utilização ocorreu devido a problemas com o registro e integração das imagens pré-operatórias, o afastamento das partes moles durante a utilização do sistema robótico e o deslocamento de fragmento de vértebra fraturada. No entanto, observamos situações em que os pedículos vertebrais eram de pequena dimensão e o sistema robótico permitiu a colocação precisa dos implantes, e de modo superior ao que poderia ser obtido somente com a utilização da fluoroscopia. Em nossa série de pacientes, não foi necessária reintervenção para o reposicionamento dos parafusos em nenhum paciente. O mal posicionamento dos implantes não ocasionou lesão neurológica. O único caso de lesão neurológica ocorreu no preparo do orifício-piloto, e não foi utilizado implante.

O mal posicionamento dos implantes com a utilização dos sistemas robóticos foi relatado em 0,8% dos procedimentos, e não foi observada alteração dessa taxa durante ou após a

curva de aprendizagem. No entanto, a TC não foi utilizada nesse estudo.[14] Porcentagem maior (15,7%) foi observada em estudo que utilizou a TC.[25] A avaliação dos resultados da utilização dos sistemas robóticos deve considerar a geração e a evolução dos sistemas, bem como a curva de aprendizagem. Resultados negativos foram relatados, que contrastam com resultados muito positivos em outros estudos.[23,24,26,27] A utilização dos sistemas robóticos nas cirurgias da coluna vertebral reduz a carga de trabalho físico e mental do cirurgião.[28] Embora não tenhamos analisado esse parâmetro por meio de avaliação objetiva, foi possível sentir a menor carga de trabalho físico e mental com a utilização do sistema robótico.

O tempo reduzido da utilização da fluoroscopia e a baixa quantidade de radiação emitida durante o procedimento cirúrgico têm sido relatados como vantagens da utilização do sistema robótico.[5,12] A dose de radiação nas cirurgias à mão livre pode ser quatro vezes maior comparada com a utilização do robô.[8] O tempo de utilização da fluoroscopia e a quantidade de radiação apresentaram baixos valores, e evidenciaram a baixa dose de radiação intraoperatória com a utilização do sistema robótico. A menor quantidade de radiação intraoperatória tem sido relatada como uma das vantagens da utilização dos sistemas robóticos na coluna vertebral.[19,24]

O desenvolvimento dos sistemas robóticos não foi isento de problemas e desafios técnicos relacionados com o programa do computador, o registro da imagem, o alcance do braço robótico, o desvio da trajetória por força excessiva, a ergonomia do aparelho e o desvio da trajetória do implante por escorregamento.[23,24,27] Observamos problemas relacionados com o registro das imagens intraoperatórias, a perfuração do orifício-piloto e o afastamento das partes moles, que interferem na precisão dos implantes, e que devem ser considerados na curva de aprendizado do sistema robótico.

Este estudo apresenta limitações relacionadas com a heterogeneidade dos pacientes e a curva de aprendizado. Desde a disponibilização do sistema robótico, os procedimentos foram realizados de modo sucessivo sem a seleção do tipo específico de doença ou segmento vertebral, e restritos às colunas torácica e lombar. Os desfechos clínicos não foram considerados nessa fase inicial, somente os parâmetros relacionados com o tempo de registro, a precisão e a radiação intraoperatória. A relação custo-benefício da utilização do sistema robótico, que tem sido muito considerada na utilização de novas tecnologias,[3,17] também não foi considerada nessa etapa do estudo.

A utilização do sistema robótico na cirurgia da coluna vertebral é um trabalho de equipe, cuja interação é fundamental para a obtenção dos resultados que a tecnologia pode oferecer. A interação da equipe desde o planejamento pré-operatório, com a discussão das etapas e objetivos da cirurgia e colocação dos implantes, tem influência no resultado final.[4,5] A importância do trabalho de equipe foi observada durante a introdução dessa nova tecnologia, e deve ser seriamente considerada na utilização dos sistemas robóticos.

Os resultados preliminares com a utilização do sistema robótico nas cirurgias da coluna vertebral evidenciaram a importância da curva de aprendizado com a nova tecnologia, a grande precisão na colocação dos implantes, a menor quantidade de radiação intraoperatória, a possibilidade da realização de cirurgias menos invasivas, a importância do planejamento pré-operatório e o trabalho em equipe e o conhecimento da tecnologia. Desfechos adicionais deverão ser analisados após a curva de aprendizagem para avaliarmos em nosso meio as vantagens descritas com relação aos métodos tradicionais.

Conclusão

A utilização do sistema robótico apresentou grande precisão na colocação dos implantes, redução do tempo da fluoroscopia e da quantidade da radiação intraoperatória, e o tempo de registro apresentou redução com a aquisição de experiência com a utilização do sistema robótico. A utilização do sistema robótico requer o aprendizado da utilização da nova tecnologia e o conhecimento das suas limitações para a obtenção de bons resultados.

Disponibilidade dos Dados

Os dados serão disponibilizados mediante solicitação ao autor correspondente.

Contribuições dos Autores

Cada autor contribuiu individual e significativamente para o desenvolvimento deste artigo: HLAD, VMC, RSV, MPD, TD e DSF: conceptualização, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, redação – rascunho original, e redação – revisão & edição.

Suporte Financeiro

Os autores declaram que não receberam suporte financeiro de agências dos setores público, privado ou sem fins lucrativos para a realização deste estudo.

Conflito de Interesses

Os autores não têm conflito de interesses a declarar.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a colaboração dos técnicos do Sistema Robótico Mazor Felipe Fernandes Samogy, Gisene Bolzan Martins e Helenês Marques de Morais na realização do estudo e durante a curva de aprendizagem.

Referências

1 Graetz G, Michaels G. Robots at work. Rev Econ Stat 2018;100(05): 753–768. Doi: 10.1162/rest_a_00754
2 Davies B. A review of robotics in surgery. Proc Inst Mech Eng H 2000;214(01):129–140. Doi: 10.1243/0954411001535309
3 Wang MY, Goto T, Tessitore E, Veeravagu A. Introduction. Robotics in neurosurgery. Neurosurg Focus 2017;42(05):E1. Doi: 10.3171/2017.2.FOCUS1783
4 Mensah-Brown KG, Yang AI, Yoon JW. Currently available robot-system in spinal surgery. In: Kim JS, Härtl R, Wang MY, Elmi-

Terander A, editors. Technical Advance in Minimally Invasive Spine Surgery: Navigation, Robotics, Endoscopy, Augmented and Virtual Reality. Singapore: Springer; 2022:277–284. Doi: 10.1007/978-981-19-0175-1_24

5 Sun WX, Huang WQ, Li HY, et al. Clinical efficacy of robotic spine surgery: an updated systematic review of 20 randomized controlled trials. EFORT Open Rev 2023;8(11):841–853. Doi: 10.1530/EOR-23-0125

6 Lee YS, Cho DC, Kim KT. Navigation-Guided/Robot-Assisted Spinal Surgery: A Review Article. Neurospine 2024;21(01):8–17. Doi: 10.14245/ns.2347184.592

7 Torii Y, Ueno J, Iinuma M, Yoshida A, Niki H, Akazawa T. Accuracy of robotic-assisted pedicle screw placement comparing junior surgeons with expert surgeons: Can junior surgeons place pedicle screws as accurately as expert surgeons? J Orthop Sci 2023;28 (05):961–965. Doi: 10.1016/j.jos.2022.06.012

8 Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, Kim HJ. Minimally Invasive Robotic Versus Open Fluoroscopic-guided Spinal Instrumented Fusions: A Randomized Controlled Trial. Spine 2017;42(06):353–358. Doi: 10.1097/BRS.0000000000001778

9 Kim HJ, Jung WI, Chang BS, Lee CK, Kang KT, Yeom JS. A prospective, randomized, controlled trial of robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery. Int J Med Robot 2017;13 (03):. Doi: 10.1002/rcs.1779

10 Kantelhardt SR, Martinez R, Baerwinkel S, Burger R, Giese A, Rohde V. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement. Eur Spine J 2011;20(06): 860–868. Doi: 10.1007/s00586-011-1729-2

11 Moses ZB, Mayer RR, Strickland BA, et al. Neuronavigation in minimally invasive spine surgery. Neurosurg Focus 2013;35(02): E12. Doi: 10.3171/2013.5.FOCUS13150

12 Sundaram PPM, Peh DYY, Poh JW, et al. Does Robotic Spine Surgery Add Value to Surgical Practice over Navigation-Based Systems? A Study on Operating Room Efficiency. Medicina (Kaunas) 2024;60(12):2112. Doi: 10.3390/medicina60122112

13 Menger RP, Savardekar AR, Farokhi F, Sin A. A Cost-Effectiveness Analysis of the Integration of Robotic Spine Technology in Spine Surgery. Neurospine 2018;15(03):216–224. Doi: 10.14245/ns.1836082.041

14 Hu X, Lieberman IH. What is the learning curve for robotic-assisted pedicle screw placement in spine surgery? Clin Orthop Relat Res 2014;472(06):1839–1844. Doi: 10.1007/s11999-013-3291-1

15 Devito DP, Kaplan L, Dietl R, et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study. Spine 2010;35(24):2109–2115. Doi: 10.1097/BRS.0b013e3181d323ab

16 Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. Spine 1990;15(01):11–14. Doi: 10.1097/00007632-199001000-00004

17 Zawar A, Chhabra HS, Mundra A, Sharma S, Kalidindi KKV. Robotics and navigation in spine surgery: A narrative review. J Orthop 2023;44:36–46. Doi: 10.1016/j.jor.2023.08.007

18 Yu J, Zhang Q, Fan MX, Han XG, Liu B, Tian W. Learning curves of robot-assisted pedicle screw fixations based on the cumulative sum test. World J Clin Cases 2021;9(33):10134–10142. Doi: 10.12998/wjcc.v9.i33.10134

19 Akazawa T, Torii Y, Ueno J, et al. Learning curves for robotic-assisted spine surgery: an analysis of the time taken for screw insertion, robot setting, registration, and fluoroscopy. Eur J Orthop Surg Traumatol 2024;34(01):127–134. Doi: 10.1007/s00590-023-03630-x

20 Schatlo B, Molliqaj G, Cuvinciuc V, Kotowski M, Schaller K, Tessitore E. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-guided pedicle screw insertion for degenerative diseases of the lumbar spine: a matched cohort comparison. J Neurosurg Spine 2014;20(06):636–643. Doi: 10.3171/2014.3.SPINE13714

21 Mao G, Gigliotti MJ, Myers D, Yu A, Whiting D. Single-Surgeon Direct Comparison of O-arm Neuronavigation versus Mazor X Robotic-Guided Posterior Spinal Instrumentation. World Neurosurg 2020;137:e278–e285. Doi: 10.1016/j.wneu.2020.01.175

22 Roser F, Tatagiba M, Maier G. Spinal robotics: current applications and future perspectives. Neurosurgery 2013;72(Suppl 1):12–18. Doi: 10.1227/NEU.0b013e318270d02c

23 Farivar D, Kim TT, Sy CA, et al. Complications Have Not Improved With Newer Generation Robots. Global Spine J 2025;15(02): 898–905. Doi: 10.1177/21925682231216081

24 Schneider D, Brown EDL, Elsamadicy AA, Sciubba DM, Lo SL. The hidden cost of robotic spine surgery: real-world adverse events cause 58-minute delays and undermine economic viability. Spine J 2026;26(01):189–198. Doi: 10.1016/j.spinee.2025. 07.014

25 Hicks JM, Singla A, Shen FH, Arlet V. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: a systematic review. Spine 2010;35(11):E465–E470. Doi: 10.1097/BRS.0b013e3181d 1021a

26 Ringel F, Stüer C, Reinke A, et al. Accuracy of robot-assisted placement of lumbar and sacral pedicle screws: a prospective randomized comparison to conventional freehand screw implantation. Spine 2012;37(08):E496–E501. Doi: 10.1097/BRS.0b013e31824b7767

27 Patel NA, Brown NJ, He C, et al. Characterizing the complication profile of spinal robotic systems: A MAUDE analysis of device failures and associated complications by device manufacturer and brand name. J Clin Neurosci 2025;135:111149. Doi: 10.1016/j.jocn.2025.111149

28 Morse KW, Subramanian T, Zhao E, et al. Robotic-Assisted Navigation in Single-Level Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Reduces Surgeons' Mental Workload Compared With Fluoroscopic and Computed Tomographic Techniques: A Nonrandomized Prospective Controlled Trial. HSS J 2025;21(01):27–34. Doi: 10.1177/15563316241281064