Inovação tecnológica em artroplastia total do joelho: Navegação, robótica e customização

Technological Innovation in Total Knee Arthroplasty: Navigation, Robotics, and Customization

Marcus Vinicius Malheiros Luzo[1] Marcio de Castro Ferreira[1] Alexandre Barbieri Mestriner[1] Idemar Monteiro de Palma[2] Carlos Eduardo da Silveira Franciozi[1] Marcelo Seiji Kubota[1]

[1] Grupo de Cirurgia do Joelho, Departamento de Ortopedia e Traumatologia, Escola Paulista de Medicina, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
[2] Grupo de Cirurgia do Joelho, Hospital Maradei, Belém, PA, Brasil

Endereço para correspondência Marcus Vinicius Malheiros Luzo, Rua Botucatu, 740, 1o andar, Vila Clementino, 04023-062, São Paulo – SP, Brasil (e-mail: smluzo@uol.com.br).

Rev Bras Ortop 2025;60(4):s00451810045.

Resumo

A artroplastia total de joelho (ATJ) é o procedimento padrão-ouro para o tratamento das patologias degenerativas articulares do joelho sem melhora com o tratamento conservador, e resulta em desfechos clínicos e funcionais excelentes. No entanto, uma parcela pequena dos pacientes relata alguma insatisfação com seus joelhos após as cirurgias. Neste contexto, nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico associado a este tratamento tem passado por relevante introdução de novos conceitos biomecânicos e incorporações de tecnologias que buscam o aprimoramento das técnicas cirúrgicas associado à evolução de desenhos de implantes que otimizem as características individuais dos pacientes para permitir melhor customização cirúrgica. O objetivo deste artigo é apresentar conceitos, vantagens e limitações associadas ao desenvolvimento dos implantes customizados, além das técnicas cirúrgicas de ATJ associada à automação (robótica) e à navegação assistida por computação. Ainda que exista ampla literatura médica que demonstra resultados promissores com as novas tecnologias nas cirurgias de ATJ, são necessários estudos com maior seguimento e metodologias adequadas a fim de contribuir com a demonstração de vantagens nos desfechos cirúrgicos nas artroplastias de joelho.

Palavras-chave
- artroplastia do joelho
- cirurgia robótica
- osteoartrite do joelho
- próteses e implantes

Abstract

Total knee arthroplasty (TKA) is the gold standard to treat degenerative knee joint conditions that do not improve with conservative treatment, and it yields excellent clinical and functional outcomes. However, a small proportion of patients report some dissatisfaction with their knees after surgery. Recently, TKA underwent significant

Trabalho desenvolvido no Grupo de Cirurgia do Joelho, Departamento de Ortopedia e Traumatologia, Escola Paulista de Medicina, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

recebido
05 de fevereiro de 2025
aceito
27 de março de 2025

DOI https://doi.org/10.1055/s-0045-1810045.
ISSN 0102-3616.

© 2025. 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

Keywords
- arthroplasty, replacement, knee
- osteoarthritis, knee
- prostheses and implants
- robot surgery

technological development with the introduction of new biomechanical concepts and the incorporation of techniques to improve surgical procedures. Moreover, the evolution in implant designs optimized for the individual characteristics of the patients enables better surgical customization. The current article presents the concepts, advantages, and limitations to the development of customized implants, as well as TKA surgical techniques involving automation (robotics) and computer-assisted navigation. Although the medical literature showing promising outcomes with new TKA technologies is extensive, studies with longer follow-up and appropriate methodologies are required to contribute to the demonstration of advantages in knee arthroplasty outcomes.

Introdução

A artroplastia total de joelho (ATJ) é a cirurgia considerada padrão-ouro para o estágio final da gonartrose, e, embora os desfechos clínicos deste procedimento sejam amplamente favoráveis, estima-se que aproximadamente 10% dos pacientes se mantêm insatisfeitos com a cirurgia.[1,2]

Diante da crescente demanda dessa cirurgia e, levando-se em consideração o fato de que elas são realizadas cada vez mais em pacientes adultos jovens,[3] é notória a necessidade e a busca de resultados cirúrgicos de maior qualidade visando a longevidade dos implantes, a percepção mais fisiológica da articulação, a melhor funcionalidade do membro inferior, e menores traumas cirúrgicos.[4]

Nesse contexto, novos avanços tecnológicos, tais como instrumentação e guias específicos, e a cirurgia assistida por computador (navegada) e/ou automação (robótica) buscam melhor customização e levar em conta a fisiologia e o equilíbrio dos ligamentos de cada paciente a fim de melhorar o planejamento cirúrgico tridimensionalmente, para aumentar a precisão do alinhamento e do posicionamento do implante.[4]

Esses conceitos estão sendo apresentados e introduzidos no mercado assistencial das artroplastias com o propósito de melhorar a compreensão mecânica do membro inferior, o mapeamento articular e funcional do joelho, assim como a precisão e a confiabilidade cirúrgicas para aumentar a satisfação dos pacientes. No entanto, como a incorporação de tecnologias novas geralmente está associada a custos maiores, é fundamental que os cirurgiões compreendam as inovações para as ATJs para que desenvolvam senso crítico em relação às suas práticas e visualizem como usar adequadamente essas novas ferramentas para melhorar os resultados cirúrgicos.[5,6]

O objetivo deste artigo é descrever as novas tecnologias em ATJ associadas ao uso da navegação, da robótica e dos implantes customizados, e discutir seus conceitos atuais, vantagens e limitações, para auxiliar o leitor a identificar como elas podem contribuir para o desenvolvimento técnico e melhorar os desfechos das artroplastias do joelho.

Implantes Customizados

Os primeiros dispositivos para artroplastia do joelho foram introduzidos na década de 1970; desde então, foram submetidos a diversas alterações, que incluem técnica cirúrgica e desenho dos implantes.[7] Um implante é produzido com base nos parâmetros dimensionais anatômicos de um grupo populacional definido, o que pode levar a inadequações de ajuste entre os componentes protéticos e a anatomia articular em outras populações. Estudos realizados em populações não caucasianas, como indianos, chineses, malaios e coreanos, por exemplo,[8–12] demonstraram relações antropométricas diversas e diferentes das apresentadas por caucasianos. Na comparação destas populações, foram identificadas discrepâncias significativas com os modelos de próteses comerciais, o que pode ter efeito direto sobre os resultados da artroplastia.[8–12] A anatomia pode variar com o gênero, a etnia, o biotipo e as alterações fenotípicas adquiridas.

O desenvolvimento tecnológico promove terapias ortopédicas mais "personalizadas" e centradas nas condições próprias de cada indivíduo. Embora atualmente se trate de uma tendência, a individualização terapêutica remonta a Hipócrates, em seus dizeres: "é mais importante saber que tipo de pessoa tem uma doença do que saber que tipo de doença uma pessoa tem".[13]

A medicina individualizada está cada vez mais presente no campo das artroplastias, na busca por melhores desfechos. A ATJ personalizada é estimulada por quatro grandes pilares: 1) eixo mecânico mais adaptado à biomecânica individual;[14,15] 2) variações anatômicas que não se enquadram em formatos de implantes predefinidos devido à variabilidade fenotípica articular; 3) evolução tecnológica que permite maior e melhor conhecimento e avaliação biomecânica intraoperatória; e 4) a pressão comercial dos fabricantes para massificar a utilização de seus produtos novos.[16]

Nesse contexto, os componentes customizados foram desenvolvidos para um revestimento fisiológico que respeite a geometria e os limites ósseos, para evitar hiper ou hipodimensionamento anatômico e reduzir as chances de impactos e atritos em partes moles ou falta de cobertura articular adequada, associado a uma cinemática mais fisiológica. No entanto, ainda que se defenda o restabelecimento anatomofisiológico articular individualizado, é preciso refletir que, por vezes, a biomecânica natural de determinado paciente pode ser fator causal, ou de risco, para a dor e a disfunção articular.

Os implantes customizados permitem definições próprias do sulco troclear de maneira personalizada, o que favorece a cinemática patelofemoral independentemente dos formatos condilares femorais, que também podem ser fabricados com raios de curvaturas individuais. Essa particularização que potencializa benefício cinemático ao implante pode ainda contribuir com menor necessidade de compensação para modificar a rotação femoral para o equilíbrio do espaço (*gap*) de flexão. Obviamente, esta condição seria dependente da ausência de assimetrias tensionais ligamentares, que exigiriam liberação de partes moles a fim de se restabelecer o equilíbrio do *gap*.[17–19] O restabelecimento fisiológico e anatômico da curvatura condilar posterior aumenta os espaços de flexão e extensão. É preciso destacar a influência do raio de curvatura condilar femoral, porque sua relação com a cápsula posterior também interfere no dimensionamento do *gap* de extensão, condição que o cirurgião deve ter em mente ao dimensionar a projeção posterior (*off set)* no planejamento de artroplastia em pacientes com joelhos em flexo ou hiperextensão.[20,21] Na busca por uma artroplastia fisiológica, em que o paciente não perceba seu joelho "artificial" nas rotinas diárias, desenvolveu-se um questionário para a mensuração do desfecho.[22]

A ATJ personalizada deve, conceitualmente, manter ou procurar restaurar: 1) a percepção de uma articulação normal; 2) a biomecânica "funcional" (quando a anatomia nativa não é considerada patológica), a saber: a) os eixos cinemáticos nativos; b) a orientação nativa da linha articular; c) a tensão nativa de partes moles; e d) a cinemática e cinética articulares nativas durante atividades diárias; 3) a transferência adequada de estresse mecânico entre as interfaces; 4) o arco de movimento articular nativo; 5) a macro e microestabilidades articulares; 6) a resistência do polietileno ao desgaste e à fixação sólida do implante, o que contribui para sua sobrevida sem restrição às atividades; e 7) proporcionar uma recuperação rápida e sem complicações.[2]

Diante dos novos desafios conceituais que os implantes customizados trazem com relação aos princípios técnicos clássicos da cirurgia de ATJ, binários entre a técnica da ressecção mensurada ou técnica do equilíbrio dos espaços (*gap balancing*),[23] Lee et al.[24] propuseram um conceito novo, dissociado dos princípios dos cortes perpendiculares aos eixos mecânicos femoral e tibial, o qual foi denominado de *alinhamento cinemático*, e visa obter perfil articular mais próximo da articulação nativa ao recriar os três eixos cinemáticos do joelho, que são paralelos e perpendiculares às linhas nativas da articulação. Posteriormente, outros conceitos foram introduzidos, como os alinhamentos cinemático invertido, cinemático irrestrito, funcional, e cinemático modificado.[24,25] O que une todas essas novas definições técnicas é a manipulação das tensões e linhas articulares mais "fisiológicas" e potenciais compensações, nos cortes ósseos, de pequenas assimetrias das tensões ligamentares, ou seja: os conceitos outrora estabelecidos por Insall et al.[26] hoje são questionados, se devemos restaurar toda a anatomia e frouxidão ligamentar nativas. As inovações tecnológicas, como a cirurgia assistida por computação (CAC), e as automações favorecerem novas percepções e entendimentos que conduziram a este momento de desenvolvimento conceitual para uma abordagem específica do paciente e são promissoras para que a evolução e desfechos das ATJ sejam otimizadas. É preciso ressaltar que o alinhamento anatômico foi um conceito concebido nos anos 1980 por Krackow, Krena e Hungerford para ser utilizado com a prótese preservando o ligamento cruzado posterior, que acabou no esquecimento, muito por conta de desgaste precoce do tipo de polietileno polido utilizado à época. Com o advento de materiais novos e melhores associado às incorporações de tecnológica assistida por navegação e robótica, a técnica de alinhamento anatômico vem sendo mais bem compreendida e utilizada.[25]

É preciso mencionar que o conceito de ATJ personalizada não é universalmente aplicável. A doença degenerativa artrítica pode, em muitos pacientes, levar a articulação e o membro a desenvolver deformidades e variações anatômicas e biomecânicas, tais como encurtamento e alongamentos de partes moles e deformidades extra e intra-articulares que dificultam ou inviabilizam a identificação da cinemática fisiológica a ser restabelecida. Além disso, é preciso senso crítico para analisar se a condição anatomomecânica e fisiológica do paciente pode interferir negativamente na longevidade dos implantes.[27] Sendo assim, Vendittoli et al.[2] afirmaram que a ATJ personalizada não significa reproduzir a anatomia do paciente rotineiramente, mas oferecer uma solução cirúrgica de melhor qualidade para abordar a doença com uma tecnologia customizada de implante.

Diante de todas as considerações e conceitos teóricos vantajosos apresentados sobre os implantes customizados, ainda faltam maiores evidências clínicas para demonstrar superioridade dos desfechos com esses tipos de implantes. Müller et al.[28] e Saeed et al.[29] demostraram que as ATJs personalizadas não proporcionaram benefícios superiores aos dos implantes convencionais, e eles observaram maior taxa de revisão precoce entre as customizadas. Já Moret et al.[30] não encontraram diferenças significativas quanto ao desfecho clínico entre os implantes customizados e convencionais. Entretanto, os implantes personalizados se mostraram mais alinhados ao eixo neutro do membro e com melhores ajuste e posicionamento dos implantes.

É preciso ressaltar a necessidade de melhores metodologias de pesquisa e desenhos de estudo nas comparações prospectivas entre implantes customizados e convencionais, a fim de clarificar a compreensão dos desfechos da cirurgia personalizada e das técnicas clássicas.

Artroplastia Assistida por Computação (Navegada) e Automação (Robótica)

No final dos anos 1970 e início dos anos 1980, os conceitos cirúrgicos e biomecânicos sobre o alinhamento resultante do membro e o equilíbrio ligamentar pós-artroplastia do joelho foram apresentados com maior solidez científica, o que favoreceu o desenvolvimento de implantes melhores e otimizou o desempenho cirúrgico.[26] No começo dos anos 1990,

iniciou-se o desenvolvimento da técnica cirúrgica para a ATJ assistida por computação (AC). O princípio dessa tecnologia se baseava na identificação de referências anatômicas intraoperatórias, como os centros da cabeça femoral, do joelho e do tornozelo, para proporcionar visões frontal e lateral em tempo real do eixo mecânico do membro inferior para um melhor controle intraoperatório do eixo do membro do paciente, sendo a primeira ATJ navegada realizada em 21 de janeiro de 1997.[31] Essa tecnologia tem como premissa facilitar a interpretação anatomomecânica do membro do paciente de modo a favorecer as decisões técnicas a serem adotadas pelo cirurgião para definir a melhor estratégia para a cinemática articular e o posicionamento dos implantes.

As ATJs assistidas por navegação foram evoluindo tecnologicamente e permitiram ao cirurgião identificar, no intraoperatório, muito mais do que o eixo resultante final do membro, uma vez que passaram a permitir a realização com precisão das angulações dos cortes femoral e tibial, o posicionamento rotacional dos componentes femoral e tibial, as dimensões dos espaços de extensão e flexão, e os dimensionamentos dos implantes. A introdução da tecnologia AC associada à ATJ permitiu ao cirurgião ampla compreensão, domínio articular intraoperatório e maior precisão do procedimento em relação ao planejamento, e esse conhecimento contribuiu para o desenvolvimento de novos conceitos mecânicos do alinhamento resultante dos membros.[25] Tais alinhamentos foram flexibilizando os conceitos referentes aos cortes femoral e tibial outrora perpendiculares ao eixo mecânico no alinhamento mecânico convencional. Essa flexibilização permite a estabilidade articular ao diminuir ou evitar liberações de partes moles, ou seja, ao permitir um ajuste de corte ósseo "fino" que compensa pequenos desequilíbrios ligamentares mediante a inclinação da linha articular em relação ao eixo mecânico, se aproximando da anatomia do joelho nativo.[14]

Ao identificar a possibilidade de se aumentar a precisão cirúrgica da ATJ AC quanto aos cortes ósseos, a cirurgia ortopédica robótica, nos últimos anos, passou por relevante desenvolvimento, e conseguiu aumentar a qualidade e a praticidade do procedimento.[32]

A ATJ robótica (ATJr) usa um programa de computador para converter os registros anatômicos do paciente em uma reconstrução tridimensional da articulação do joelho, o que permite que o cirurgião planeje e execute a cirurgia com precisão quanto aos cortes definindos. Portanto, a ATJr é uma técnica cirúrgica que combina navegação AC e auxílio da automação robótica para o posicionamento e/ou realizações dos cortes.[14,32–34] A ATJr pode ser dividida em dois subgrupos: a ATJr ativa (autônoma), em que a automação é completa e independe da atuação do cirurgião para a realização dos cortes femorais e tibial planejados; e o sistema robótico semiativo (semiautônomo), mais difundido globalmente e presente no Brasil neste momento, no qual o cirurgião mantém o controle geral sobre a ressecção óssea assistido pela precisão da automação por meio do posicionamento dos guias de cortes ósseos ou de um braço robótico que auxilia a controlar a força, a amplitude de alcance e a direção da lâmina de serra dentro dos limites programados.[34]

Pode-se afirmar, de maneira resumida e sucinta, que a principal diferença conceitual entre uma ATJ AC e uma ATJr jaz no fato de a primeira ser um procedimento em que o cirurgião posiciona os guias e realiza os cortes assistido por monitoramento computacional. E a ATJr é uma ATJ AC com o auxílio da automação para o posicionamento dos guias de cortes e/ou a realização dos cortes ósseos. O principal benefício da ATJr é o corte ósseo preciso e reprodutível devido a uma interface robótica, independentemente do sistema usado. Além disso, ela permite a mensuração dos *gaps* de acordo com o planejamento dos cortes ósseos e o posicionamento do implante durante a cirurgia.[4] A precisão dos cortes ósseos conforme planejados é o principal benefício da ATJr, o que contribui para o posicionamento ideal dos implantes e o equilíbrio articular pela mensuração exata dos espaços de flexão e extensão.

Não existem indicações e contraindicações absolutas para a realização da ATJr ou da ATJ AC. No entanto, essas tecnologias se destacam e apresentam vantagens em relação a técnica convencional nos casos de pacientes que apresentam deformidades ósseas diafisárias e hastes intramedulares, condições que dificultam a realização da cirurgia pela técnica convencional.

Pacientes com deformidades articulares e falhas ósseas também podem ser favorecidos pelo uso da navegação, uma vez que essa tecnologia permite ao cirurgião visualizar as múltiplas possibilidades de de cortes e dimensionamentos dos implantes durante o planejamento e o intraoperatório.

Alguns sistemas de automação dependem de exame radiográfico pré-operatório para o programa de computador interpretar a reconstrução tridimensional articular que será conciliada com os pontos anatômicos identificados pelo cirurgião. No entanto, é possível, a depender do sistema AC robótico, que a cirurgia seja realizada sem a obrigatoriedade do mapeamento radiológico prévio, o que permite que todas as referências anatômicas e a identificação espacial do joelho e do membro inferior sejam capturadas integralmente durante o ato cirúrgico.

Destaca-se que a ATJ AC permite, com precisão, o controle crítico de muitos conceitos e elementos técnicos relevantes para o comportamento funcional do joelho, a fim de proporcionar previsibilidade mecânica e cinemática ao membro operado antes e após os cortes ósseos, a saber:

- a inclinação (*slope*) sagital posterior da tíbia na formação do espaço de flexão;
- o grau de rotação do componente femoral aplicável para a equalização do espaço de flexão entre os compartimentos femorotibiais medial e lateral, e potencial invasão da cortical femoral anterior (*notching*);
- o dimensionamento e a proporcionalidade entre os espaços de extensão e flexão de acordo com os dimensionamentos do componente femoral e do polietileno tibial;

- o tamanho do componente femoral e sua relação com o dimensionamento do espaço de flexão;
- o posicionamento do implante femoral no plano sagital;
- a capacidade de intercambiar os implantes femoral e tibial;
- a angulação resultante do membro inferior em relação ao eixo mecânico pelos ajustes planejados;
- a resultante sagital do membro inferior em neutro, recurvo ou flexo;
- o dimensionamento dos cortes femorais distal e posterior e tibial proximal;
- a altura da interlinha articular;
- a equalização entre os espaços de flexão e extensão; e
- o dimensionamento do polietileno.

A literatura[35–38] apresenta resultados favoráveis e promissores quanto à capacidade de essa tecnologia proporcionar maior precisão dos componentes, proteção dos tecidos moles, maior satisfação do paciente, uma curva de aprendizado curta, desenho ergonômico ideal e menos fadiga do cirurgião e da equipe cirúrgica. Outros estudos demonstram resultados clínicos semelhantes aos das técnicas convencionais. Onggo et al.,[32] em uma revisão sistemática que analisou mais de 6 mil pacientes, concluíram que tanto a ATJr quanto a cirurgia convencional são confiáveis, seguras, e resultam em bons desfechos, ainda que o alinhamento final do membro seja mais preciso nas robóticas. Em uma revisão, Mancino et al.[39] encontraram vantagem para o grupo de ATJr em termos de resultados funcionais iniciais e linhas de radiolucências em comparação ao grupo submetido ao procedimento convencional. Nenhuma diferença significativa entre os dois grupos foi relatada quanto à sobrevivência geral, à taxa de revisão e ao tempo cirúrgico. Em uma revisão sistemática com metanálise de 12 ensaios clínicos randomizados com mais de 2 mil pacientes analisados, Ruangsomboon et al.[40] concluíram que, apesar de a ATJr provavelmente resultar em maior precisão radiológica do que o procedimento convencional, este desfecho pode não ser clinicamente significativo.

Em uma revisão sistemática recente, Nogalo et al.[41] analisaram os relatos das complicações relacionadas às artroplastias robóticas. As principais complicações observadas foram fraturas metafisárias nos orifícios de fixação dos pinos dos refletores da navegação, com ~ 1,4% delas ocorrendo próximo da décima segunda semana de pós-operatório. A infecção no local dos pinos de reflexões e em incisões acessórias também é descrita, com incidência de 0,47%.[42] É preciso ressaltar que a cirurgia robótica é segura. No entanto, complicações podem acontecer, sendo mais relacionadas à técnica cirúrgica aplicada pelo cirurgião do que por consequência direta da tecnologia empregada.[43]

Considerações Finais

Diante das considerações abordadas neste estudo referente aos propósitos da incorporação de novas tecnologias, assim como novos conceitos técnicos referentes à ATJ, percebe-se, no momento, que os avanços são promissores, ainda que haja a necessidade de estudos com metodologias de maior qualidade e com seguimentos mais longos, a fim de compreendermos as vantagens técnicas de médio e longo prazos quanto aos desfechos clínicos e, por consequência, permitir o desenvolvimento de técnicas e práticas melhores associadas a artroplastias de joelho.

Contribuições dos Autores

Cada autor contribuiu individual e significativamente para o desenvolvimento deste artigo. MVML: conceitualização, validação, visualização w redação – revisão & edição; MCF: redação – preparação do original, redação – revisão & edição, conceitualização, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia e validação; ABM: redação – revisão & edição; conceitualização, análise formal e validação; IMP: validação, visualização, redação – rascunho original, redação – revisão & edição, conceitualização, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia e validação; CESF: redação – revisão & edição, conceitualização, análise formal, investigação e validação; e MSK: redação – revisão & edição, conceitualização, análise formal e validação.

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.

Referências

1 DeFrance MJ, Scuderi GR. Are 20% of Patients Actually Dissatisfied Following Total Knee Arthroplasty? A Systematic Review of the Literature. J Arthroplasty 2023;38(03):594–599. Doi: 10.1016/j.arth.2022.10.011
2 Venditoli PA, Riviere C, Hirschmann MT, Bini S. Why personalized surgery is the future of hip and knee arthroplasty: a statement from the Personalized Arthroplasty Society. EFORT Open Rev 2023;8(12):874–882. Doi: 10.1530/EOR-22-0096
3 Shichman I, Roof M, Askew N, Nherera L, Rozell JC, Seyler TM, Schwarzkopf R. Projections and Epidemiology of Primary Hip and Knee Arthroplasty in Medicare Patients to 2040–2060. JB JS Open Access 2023;8(01):e22.00112. Doi: 10.2106/JBJS.OA.22.00112
4 Batailler C, Swan J, Sappey Marinier E, Servien E, Lustig S. New Technologies in Knee Arthroplasty: Current Concepts. J Clin Med 2020;10(01):47. Doi: 10.3390/jcm10010047
5 Pagan CA, Karasavvidis T, Cohen-Rosenblum AR, Hannon CP, Lombardi AV Jr, Vigdorchik JM. Technology in Total Knee Arthroplasty in 2023. J Arthroplasty 2024;39(9S2):S54–S59. Doi: 10.1016/j.arth.2024.07.028
6 Walgrave S, Oussedik S. Comparative assessment of current robotic-assisted systems in primary total knee arthroplasty. Bone Jt Open 2023;4(01):13–18. Doi: 10.1302/2633-1462.41.BJO-2022-0070.R1
7 Liau JJ, Cheng CK, Huang CH, Lo WH. The effect of malalignment on stresses in polyethylene component of total knee prostheses–a

finite element analysis. Clin Biomech (Bristol, Avon) 2002;17(02): 140–146. Doi: 10.1016/s0268-0033(01)00109-7
8 Vaidya SV, Ranawat CS, Aroojis A, Laud NS. Anthropometric measurements to design total knee prostheses for the Indian population. J Arthroplasty 2000;15(01):79–85. Doi: 10.1016/s0883-5403(00)91285-3
9 Yue B, Varadarajan KM, Ai S, Tang T, Rubash HE, Li G. Differences of knee anthropometry between Chinese and white men and women. J Arthroplasty 2011;26(01):124–130. Doi: 10.1016/j.arth.2009.11.020
10 Hussain F, Kadir MRA, Zulkifly AH, et al. Anthropometric measurements of the human distal femur: a study of the adult Malay population. BioMed Res Int 2013;2013:175056. Doi: 10.1155/2013/175056
11 Ha CW, Na SE. The correctness of fit of current total knee prostheses compared with intra-operative anthropometric measurements in Korean knees. J Bone Joint Surg Br 2012;94(05): 638–641. Doi: 10.1302/0301-620X.94B5.28824
12 Cheng FB, Ji XF, Lai Y, et al. Three dimensional morphometry of the knee to design the total knee arthroplasty for Chinese population. Knee 2009;16(05):341–347. Doi: 10.1016/j.knee.2008.12.019
13 Valentino M, Pavlica P. Medical ethics. J Ultrasound 2016;19(01): 73–76. Doi: 10.1007/s40477-015-0189-7
14 MacDessi SJ, Oussedik S, Abdel MP, Victor J, Pagnano MW, Haddad FS. The language of knee alignment: updated definitions and considerations for reporting outcomes in total knee arthroplasty. Bone Joint J 2023;105-B(02):102–108. Doi: 10.1302/0301-620X.105B2.BJJ-2022-1345
15 Rivière C, Lazic S, Boughton O, Wiart Y, Vïllet L, Cobb J. Current concepts for aligning knee implants: patient-specific or systematic? EFORT Open Rev 2018;3(01):1–6. Doi: 10.1302/2058-5241.3.170021
16 Saffarini M, Hirschmann MT, Bonnin M. Personalisation and customisation in total knee arthroplasty: the paradox of custom knee implants. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2023;31 (04):1193–1195. Doi: 10.1007/s00167-023-07385-0
17 Müller JH, Li K, Reina N, Telmon N, Saffarini M, Cavaignac E. Sexual and ethnic polymorphism result in considerable mismatch between native trochlear geometry and off-the-shelf TKA prostheses. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2020;28(12): 3871–3878. Doi: 10.1007/s00167-020-05871-3
18 Rivière C, Lazic S, Villet L, Wiart Y, Allwood SM, Cobb J. Kinematic alignment technique for total hip and knee arthroplasty: The personalized implant positioning surgery. EFORT Open Rev 2018; 3(03):98–105. Doi: 10.1302/2058-5241.3.170022
19 Zhang Z, Liu M, Wen X, Liu S, Zhang G, Yang C. The relationship between the posterior tibial slope and the sagittal femoral condylar shape: Two circles and ellipses. Clin Anat 2020;33(07): 1075–1081. Doi: 10.1002/ca.23543
20 Sugama R, Kadoya Y, Kobayashi A, Takaoka K. Preparation of the flexion gap affects the extension gap in total knee arthroplasty. J Arthroplasty 2005;20(05):602–607. Doi: 10.1016/j.arth.2003.12.085
21 Sriphirom P, Raungthong N, Chutchawan P, Thiranon C, Sukandhavesa N. Influence of a secondary downsizing of the femoral component on the extension gap: a cadaveric study. Orthopedics 2012;35(10, Suppl)56–59. Doi: 10.3928/01477447-20120919-59
22 Ferreira MC, Silva G, Zidan FF, Franciozi CE, Luzo MVM, Abdalla RJ. Forgotten Joint Score - Portuguese translation and cultural adaptation of the instrument of evaluation for hip and knee arthroplasties. Rev Bras Ortop 2018;53(02):221–225. Doi: 10.1016/j.rboe.2018.02.006
23 Dennis DA, Komistek RD, Kim RH, Sharma A. Gap balancing versus measured resection technique for total knee arthroplasty. Clin Orthop Relat Res 2010;468(01):102–107. Doi: 10.1007/s11999-009-1112-3
24 Lee YS, Howell SM, Won YY, Lee O-S, et al. Kinematic alignment is a possible alternative to mechanical alignment in total knee arthroplasty. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2017;25 (11):3467–3479. Doi: 10.1007/s00167-017-4558-y
25 Minoda Y. Alignment techniques in total knee arthroplasty. J Joint Surg Res 2023;1(01):108–116. Doi: 10.1016/j.jjoisr.2023.02.003
26 Insall JN, Binazzi R, Soudry M, Mestriner LA. Total knee arthroplasty. Clin Orthop Relat Res 1985;(192):13–22
27 Rivière C, Jackson W, Villet L, Sivaloganathan S, Barziv Y, Vendittoli PA. Specific case consideration for implanting TKA with the Kinematic Alignment technique. EFORT Open Rev 2021;6(10): 881–891. Doi: 10.1302/2058-5241.6.210042
28 Müller JH, Liebensteiner M, Kort N, Stirling P, Pilot P, Demey G, European Knee Associates (EKA). No significant difference in early clinical outcomes of custom versus off-the-shelf total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2023;31(04):1230–1246. Doi: 10.1007/s00167-021-06678-6
29 Saeed AZ, Khaleeq T, Ahmed U, et al. Correction to: No clinical advantage with customized individually made implants over conventional off-the-shelf implants in total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. Arch Orthop Trauma Surg 2024;144(03):1331. Doi: 10.1007/s00402-023-05180-7
30 Moret CS, Schelker BL, Hirschmann MT. Clinical and Radiological Outcomes after Knee Arthroplasty with Patient-Specific versus Off-the-Shelf Knee Implants: A Systematic Review. J Pers Med 2021;11(07):590. Doi: 10.3390/jpm11070590
31 Saragaglia D, Rubens-Duval B, Gaillot J, Lateur G, Pailhé R. Total knee arthroplasties from the origin to navigation: history, rationale, indications. Int Orthop 2019;43(03):597–604. Doi: 10.1007/s00264-018-3913-z
32 Onggo JR, Onggo JD, De Steiger R, Hau R. Robotic-assisted total knee arthroplasty is comparable to conventional total knee arthroplasty: a meta-analysis and systematic review. Arch Orthop Trauma Surg 2020;140(10):1533–1549. Doi: 10.1007/s00402-020-03512-5
33 Liow MH, Xia Z, Wong MK, Tay KJ, Yeo SJ, Chin PL. Robot-assisted total knee arthroplasty accurately restores the joint line and mechanical axis. A prospective randomised study. J Arthroplasty 2014;29(12):2373–2377. Doi: 10.1016/j.arth.2013.12.010
34 Kayani B, Konan S, Ayuob A, Onochie E, Al-Jabri T, Haddad FS. Robotic technology in total knee arthroplasty: a systematic review. EFORT Open Rev 2019;4(10):611–617. Doi: 10.1302/2058-5241.4.190022
35 Khlopas A, Sodhi N, Sultan AA, Chughtai M, Molloy RM, Mont MA. Robotic Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty. J Arthroplasty 2018;33(07):2002–2006. Doi: 10.1016/j.arth.2018.01.060
36 Fang DM, Ritter MA, Davis KE. Coronal alignment in total knee arthroplasty: just how important is it? J Arthroplasty 2009;24(6, Suppl)39–43. Doi: 10.1016/j.arth.2009.04.034
37 Parratte S, Price AJ, Jeys LM, Jackson WF, Clarke HD. Accuracy of a New Robotically Assisted Technique for Total Knee Arthroplasty: A Cadaveric Study. J Arthroplasty 2019;34(11):2799–2803. Doi: 10.1016/j.arth.2019.06.040
38 Song EK, Seon JK, Yim JH, Netravali NA, Bargar WL. Robotic-assisted TKA reduces postoperative alignment outliers and improves gap balance compared to conventional TKA. [Erratum in Clin Orthop Relat Res 2012 Sep;470(9):2627] Clin Orthop Relat Res 2013;471(01):118–126. Doi: 10.1007/s11999-012-2407-3
39 Mancino F, Cacciola G, Malahias M-A, et al. What are the benefits of robotic-assisted total knee arthroplasty over conventional manual total knee arthroplasty? A systematic review of comparative studies. Orthop Rev (Pavia) 2020;12(Suppl 1):8657. Doi: 10.4081/or.2020.8657
40 Ruangsomboon P, Ruangsomboon O, Pornrattanamaneewong C, Narkbunnam R, Chareancholvanich K. Clinical and radiological outcomes of robotic-assisted versus conventional total knee

arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Acta Orthop 2023;94:60–79. Doi: 10.2340/17453674.2023.9411

41 Nogalo C, Meena A, Abermann E, Fink C. Complications and downsides of the robotic total knee arthroplasty: a systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2023;31(03):736–750. Doi: 10.1007/s00167-022-07031-1

42 Held MB, Gazgalis A, Neuwirth AL, Shah RP, Cooper HJ, Geller JA. Imageless robotic-assisted total knee arthroplasty leads to similar 24-month WOMAC scores as compared to conventional total knee arthroplasty: a retrospective cohort study. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2022;30(08):2631–2638. Doi: 10.1007/s00167-021-06599-4

43 Pagani NR, Menendez ME, Moverman MA, Puzzitiello RN, Gordon MR. Adverse Events Associated With Robotic-Assisted Joint Arthroplasty: An Analysis of the US Food and Drug Administration MAUDE Database. J Arthroplasty 2022;37(08):1526–1533. Doi: 10.1016/j.arth.2022.03.060