

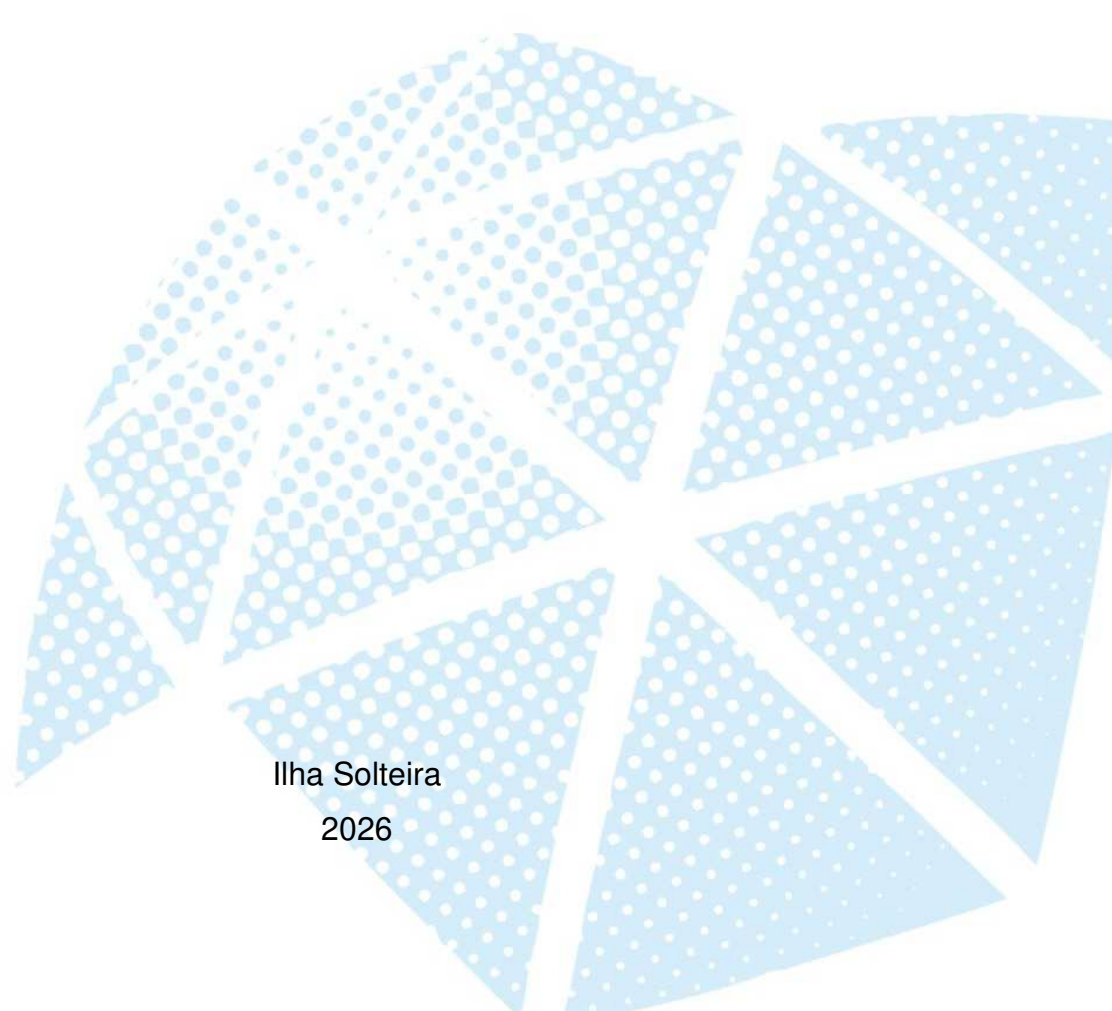
RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de
11/06/2028

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

CAIQUE PERES DA SILVA

**SISTEMA DE ALINHAMENTO DE PRÓTESE DE MEMBRO INFERIOR
UTILIZANDO PLATAFORMA DE FORÇA E VISÃO COMPUTACIONAL**



Ilha Solteira
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAIQUE PERES DA SILVA

SISTEMA DE ALINHAMENTO DE PRÓTESE DE MEMBRO INFERIOR UTILIZANDO PLATAFORMA DE FORÇA E VISÃO COMPUTACIONAL

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de Conhecimento: Automação.

Marcelo Augusto Assunção Sanches
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

S586s Silva, Caique Peres da.
Sistema de alinhamento de prótese de membro inferior utilizando
plataforma de força e visão computacional / Caique Peres da Silva. -- Ilha
Solteira: [s.n.], 2026
94 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2026

Orientador: Marcelo Augusto Assunção Sanches
Inclui bibliografia

1. Prótese. 2. Membros inferiores. 3. Alinhamento de prótese. 4. Visão
computacional. 5. Plataforma de forças.

Impacto potencial desta pesquisa

O desenvolvimento deste sistema contribui para a ampliação do conhecimento científico relacionado ao alinhamento de próteses de membros inferiores, tema ainda pouco explorado na literatura. A ferramenta disponibiliza uma plataforma nacional para aquisição e análise de dados biomecânicos, podendo ser empregada em estudos envolvendo diferentes níveis de amputação, avaliação de protocolos de alinhamento, acompanhamento da reabilitação e desenvolvimento de novas metodologias de ajuste protético.

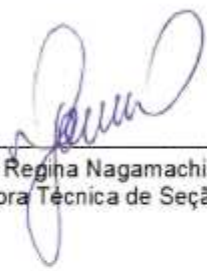
Potential impact of this research

The development of this system contributes to advancing scientific knowledge related to lower-limb prosthesis alignment, a topic that remains relatively underexplored in the literature. The proposed tool provides a platform developed in Brazil for the acquisition and analysis of biomechanical data and may support future studies involving different levels of amputation, evaluation of alignment protocols, rehabilitation monitoring, and the development of new prosthetic fitting methodologies.

ATESTADO DE APROVAÇÃO - DEFESA

Atestamos que CAIQUE PERES DA SILVA, RA nº: ELE210145, RG nº 40.576.057-7, expedido pela SSP/SP, defendeu, no dia 10/06/2026, a tese intitulada "Sistema de alinhamento de prótese de membro inferior, utilizando plataforma de força e visão computacional", junto ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Curso de Doutorado Acadêmico, tendo sido APROVADO. Atestamos ainda que a obtenção do título dependerá de homologação pelo Órgão Colegiado competente.

Ilha Solteira, 10 de junho de 2026

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Marcia Regina Nagamachi Chaves", is written over a horizontal line.

Márcia Regina Nagamachi Chaves
Supervisora Técnica de Seção – STPG

DEDICATÓRIA

À minha família, em especial a minha Mãe Izabel (*in memoriam*), pela motivação para iniciar a carreira acadêmica lá no curso de mestrado, a minha tia Odete e minha prima Aline, pelo apoio para conseguir chegar nessa etapa estando sempre presentes nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Dedico também ao meu orientador o Prof. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches por todo apoio ao longo de minha jornada acadêmica, aos Mestres e doutorandos Arthur Faustinelli e Ricardo Bussons por não medirem esforços para nos ajudar na etapa final desse trabalho, ao Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho por nos instruir em diversas etapas do trabalho contribuindo com sua ampla experiência, a todo grupo de pesquisadores do LIEB que não hesitam em ajudar uns aos outros e aos Professores Doutores bancas responsáveis por avaliar e por sugerir as correções necessárias para que este trabalho seja encerrado com o êxito.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Treine enquanto eles dormem, estude
enquanto eles se divertem, persista enquanto eles
descansam, e então, viva o que eles sonham.”
(Provérbio Japonês)

RESUMO

Indivíduos que utilizam próteses de membros inferiores necessitam de um alinhamento protético feito adequadamente. Poucos trabalhos científicos ou equipamentos comerciais abordam o alinhamento de próteses de membros inferiores. A maioria dos métodos comerciais apresentam custo elevado e complexidade de método. O objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento de um dispositivo que auxilia no alinhamento de próteses de membros inferiores, utilizando uma combinação de câmeras, plataforma de forças e linguagem Python para a captura de imagens do paciente e linha de carga. Realizando etapas de entrada e processamento dos dados, exibindo uma imagem final informando as distâncias entre os pontos anatômicos e a linha de carga para o respectivo alinhamento. Para validar a acurácia das informações obtidas através do sistema, foram realizados testes em imagens capturadas pelas câmeras, que retornaram resultados satisfatórios. O sistema de captura das imagens apresentou erro médio final de 1,47% e na verificação da linha de carga, o sistema de aquisição do centro de pressão apresentou um erro médio final de -1,17% demonstrando confiabilidade, podendo considerá-lo como ferramenta de grande utilidade no processo do alinhamento de próteses.

Palavras-chave:prótese; membros inferiores; alinhamento de prótese; visão computacional; plataforma de forças.

ABSTRACT

This study focuses on individuals using lower-limb prostheses that require specific alignment. Few scientific studies or commercial devices address lower-limb prosthesis alignment, and most commercial methods are costly and complex. The objective of this work was to develop a device to assist in lower-limb prosthesis alignment using a combination of cameras, a force platform, and Python programming to capture images of the patient and the load line. The system performs data input and processing, displaying a final image that indicates the distances between anatomical landmarks and the load line to guide alignment. To validate the accuracy of the data obtained, tests were conducted on images captured by the cameras. The image capture system showed a final mean error of 1.47%, while the center-of-pressure acquisition system showed a final mean error of -1.17% regarding the load line; these results demonstrate the system's reliability, making it a highly useful tool for the prosthesis alignment process.

Keywords: prosthesis; lowerlimbs; prosthesis alignment; computer vision; force platform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de alinhamento: (a)Sistema ABA estático, (b)Sistema ABA supinado e (c)Sistema VAA.....	21
Figura 2 - Método de alinhamento de radiografia de membro inferior.....	22
Figura 3 - Dispositivo auxiliar de alinhamento, balanças e câmera.....	23
Figura 4 - Recomendações de alinhamento estático para próteses transtibiais.....	24
Figura 5 - Dispositivo LASAR Posture.....	26
Figura 6 - Dispositivo LASAR Posture em funcionamento	26
Figura 7 - Composição do equipamento 3D LASAR (A:Plataforma de forças dupla, B e C:Duas hastes com duas câmeras cada, C:Computador central, D:Tablet).....	28
Figura 8 - Visões no plano frontal com o método Posture, da força vertical de reação do solo (esquerda) e método 3D, da linha do vetor força (direita).	29
Figura 9 - Página do aplicativo 3D LASAR.....	30
Figura 10 - Câmera e suporte de fixação	33
Figura 11 - Posicionamento da câmera em relação ao plano de captura. a) Vista lateral e b) Vista frontal.....	34
Figura 12 - Definição da distância Câmera-Plano	34
Figura 13 - Vista superior do sistema de captura com 2 câmeras.....	35
Figura 14 - Tela primeira versão do código	36
Figura 15 - Tela inicial de captura versão final código	37
Figura 16 - Escolha dos pontos da linha de prumo	38
Figura 17 - Ângulo para correção da imagem	39
Figura 18 - Imagem corrigida para coleta de objetos de interesse.....	40
Figura 19 - Imagem final com as distâncias calculadas	41
Figura 20 – Distribuição das células na plataforma de forças	42
Figura 21 – Plataforma de forças	42
Figura 22 - Quadro em papel milimetrado	44
Figura 23 - Janela do Software	45
Figura 24 - Régua com marcações de distância conhecida.....	48
Figura 25 - Simulação de posicionamento de prótese em plano sagital para captura de imagem.....	49
Figura 26 - Imagem final exibida pelo programa	50
Figura 27 – Conferência das medidas.....	51
Figura 28 – Testes com papel milimetrado sob a plataforma	52
Figura 29 – Valores de referência	53
Figura 30 – Papel milimetrado sob a plataforma	53
Figura 31 – Anilhas posicionadas sobre a plataforma.....	56
Figura 32 – Verificação da geração da linha de carga	57
Figura 33 – Marcação dos pontos na plataforma	58
Figura 34 – Prótese simulada sob o centro de pressão	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABA	Anatomically Based Alignment (Alinhamento anatomicamente baseado)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (Semicondutor de óxido metálico complementar)
CoP	Center of Pressure (Centro de Pressão)
LASAR	Laser-Assisted Static Alignment Reference (Referencial de alinhamento estático assistido por laser)
PASyLL	Prosthetic Alignmet System for Lower Limb (Sistema de Alinhamento de Prótese de Membro Inferior)
VAA	Vertical Alignment Axle (Eixo de alinhamento vertical)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	INTRODUÇÃO GERAL	15
1.2	JUSTIFICATIVAS	17
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo Geral.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
2.1	ALINHAMENTO DE PRÓTESES	20
2.1.1	Alinhamento de prótese: Métodos e aplicações	20
2.2	DISPOSITIVOS DE ANÁLISE POSTURAL E ALINHAMENTO DE PRÓTESE	24
2.2.1	LASAR Posture	24
2.2.2	LASAR 3D	27
2.3	VISÃO COMPUTACIONAL	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1	VISÃO COMPUTACIONAL	32
3.2	PLATAFORMA DE FORÇAS	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	TESTES EM IMAGENS REAIS.....	44
4.2	TESTES EM PRÓTESE SIMULADA.....	47
4.2.1	Testes com papel milimetrado sob a plataforma	51
4.2.2	Testes com carga na plataforma de forças.....	55
4.2.3	Simulação do alinhamento real	60
5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A - Código Python desenvolvido no trabalho	68
	APÊNDICE B – Primeira versão do código utilizado	85
	APÊNDICE C – Marcador Aruco utilizado (50 mm x 50 mm)	91

APÊNDICE D – Passo a passo da instalação das bibliotecas e uso do sistema para profissionais que utilizarão o equipamento	92
---	----

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma introdução geral, uma revisão de literatura sobre trabalhos onde se emprega alinhamento de prótese utilizando visão computacional, e os objetivos, com o intuito de apresentar ao leitor as informações necessárias para um melhor entendimento sobre o trabalho desenvolvido.

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

O alinhamento protético refere-se à relação física entre o corpo do paciente amputado e sua prótese, sendo crucial que seja feito corretamente para assegurar que fatores importantes para o bem-estar do paciente sejam atendidos. Isso inclui a simetria de força entre o membro saudável e a prótese, a melhora na distribuição de carga no membro residual e a redução do gasto energético. (Taftiet *al.*, 2020).

Para aproximar ao máximo as funções protéticas das funções biológicas originais, é essencial levar em conta as características individuais dos pacientes protetizados, pois essas influenciam diretamente sua recuperação e adaptação. (Slaviero, 2009).

Blumentritt *et al.* (1997) propuseram uma metodologia de alinhamento que se baseia na medição das distâncias entre pontos anatômicos utilizando o dispositivo de alinhamento LASAR Posture, da fabricante alemã Ottobock. Este dispositivo inclui uma plataforma de análise de distribuição de cargas e um laser para a projeção de linhas sobre o paciente. Embora o dispositivo ofereça uma análise confiável da distribuição de massa e dos pontos anatômicos, ele tem um custo elevado.

Hansen *et al.* (2003) compararam a marcha de indivíduos saudáveis com indivíduos protetizados através de imagens, e sugeriram alinhar a prótese de pessoas amputadas transtibiais observando a relação angular entre o encaixe do pé protético e a própria prótese.

Reisinger *et al.* (2007) empregaram uma abordagem básica de percepção visual dos pontos anatômicos do paciente, examinando a simetria da linha vertical dos membros para determinar o alinhamento estático. Este método exigia que os técnicos passassem por treinamento e não demonstrava alta precisão.

O método proposto por Mooney *et al.* (2013) utilizava radiografias para medir o desvio angular vertical do eixo do membro protetizado, o que exigia um tempo

significativo para verificar as respostas às alterações feitas durante o processo de alinhamento.

Frossard *et al.* (2003) descreveram de forma abrangente a medição direta das forças e momentos aplicados no encaixe da prótese de amputados transfemorais durante atividades da vida diária. O aparelho apresentado pode ser amplamente utilizado por equipes multidisciplinares, incluindo engenheiros, protesistas e fisioterapeutas, que enfrentam o desafio de restaurar com segurança a locomoção de amputados transfemorais.

A metodologia de alinhamento estático de próteses transtibiais descrita por Bellmann *et al.* (2017) complementa o trabalho de Blumentritt *et al.* (1997). Eles recomendaram a medição das distâncias entre pontos anatômicos e da linha de carga do paciente para alcançar um alinhamento satisfatório. Assim como a metodologia anterior, essa abordagem demonstra confiabilidade, mas é baseada em uma ferramenta comercial com custo elevado.

Taftiet *al.* (2020) empregavam balanças colocadas sobre os membros do paciente para assegurar a distribuição adequada da carga, além de linhas de laser para marcar os pontos anatômicos. As distâncias pré-definidas pelo protocolo eram verificadas visualmente pelo técnico.

Em diversas propostas existentes para o alinhamento de próteses de membros inferiores, são identificados fatores que podem facilitar esse processo de várias maneiras. Isso inclui o uso de medidas de pontos anatômicos como pontos de referência, o emprego de imagens que possibilitam uma relação direta com a percepção e a experiência dos profissionais que realizam o alinhamento, e a geração de dados que são mais simples de interpretar. Esses fatores apontam para características desejáveis de praticidade e confiabilidade, que podem ser alcançadas utilizando tecnologias disponíveis.

Com base na visão computacional, que automatiza e integra uma variedade de processos e representações para a percepção visual (Ballard, Brown, 1982), tem-se observado um aumento significativo de sua aplicação na área médica devido à sua simplicidade e confiabilidade (Araujo *et al.*, 2012; Brosnan, Sun, 2004). Isso sugere uma possível relação entre o uso da visão computacional e o alinhamento de próteses de membros inferiores, aproveitando suas características de confiabilidade e facilidade de uso.

REFERÊNCIAS

- ALBERS, M. T.; GUEDES, J. P.; DE LUCCIA, N.; PINTO, M. A. Rehabilitation after amputation for vascular disease: a follow up study. **Prosthetics and Orthotics International**, London, v. 16, n. 2, p. 124-128, 1992.
- ARAUJO, A. F.; TAVARES, J. M. R. S.; OLIVEIRA, R. B.; ROSSETTI, R. B.; MARRANGHELLO, N.; PEREIRA, A. S. Análise e Caracterização de Lesões de Pele para Auxílio ao Diagnóstico Médico. **Avanços em Visão Computacional**, Omnipax, p. 1-19. 2012.
- BALLARD D.H.; BROWN, C.M. **Computer Vision**. New Jersey: Ed. Prentice Hall, 1982.
- BELLMANN, M.; BLUMENTRITT, S.; PUSCH, M.; SCHMALZ, T.; SCHÖNEMEIER, M. The 3D L.A.S.A.R.: a new generation of static analysis for optimising prosthetic and orthotic alignment. **Revista Orthopadie Technik**, [s. l.], v. 12, n. 17, p. 18-24. 2017.
- BLUMENTRITT S. **A new biomechanical method for determination of static prosthetic alignment**. Duderstadt: [s. n.], 1997.
- BROSNAN, T.; SUN, D.W. Improving quality inspection of food products by computer vision: a review. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 61, p. 3-16, 2004.
- CHAMLIAN, T. R. Perfil epidemiológico dos pacientes amputados de membros inferiores no Lar Escola São Francisco entre 2006 e 2012. **Acta Fisiátrica**, São Paulo, v. 20, n. 4, 2013. Disponível em: http://www.actafisiatrica.org.br/detalhe_artigo.asp?id=526.
- CHAMLIAN, T. R. Uso de próteses em amputados de membros inferiores por doença arterial periférica. **Einstein**, São Paulo, v. 12, n. 4, 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1679-45082014000400440&script=sci_arttext&tlng=pt
- DE ANDRADE, R.; GOTTSCHALK, F.; OSTERMAN, H.; PINZUR, M. S.; SHANFIELD, S.; SMITH, D. Functional outcome of below-knee amputation in peripheral vascular insufficiency. A multicenter review. **Clinical Orthopaedics and Related Research**, New York, v. 286, p. 247-249, 1993.
- DEVLIN, M.; MEIKLE, B.; GARFINKEL, S. Interruptions to amputee rehabilitation. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, Maryland Heights, v. 83, n. 9, p. 1222-1228, 2002.
- DILLINGHAM, T. R.; PEZZIN, L. E.; SHORE, A. D. Reamputation, mortality and health care costs among persons with dysvascular lower-limb amputations. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, Maryland Heights, v. 86, n. 3, p. 480-486, 2005.

DORNELAS, L. F. Uso da prótese e retorno ao trabalho em amputados por acidentes de transporte. **Acta Ortopédica Brasileira**, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 204-206, 2010.

FAUSTINELLI, A. B. **Sistema de alinhamento de prótese de membro inferior utilizando visão computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2021.

FILIPPIS, P.L. **Orthotic success using the L.A.S.A.R.:** Posture. [S. l.: s. n.], 2001.

FROSSARD, J.; BECK, J.; DILLON, S.; EVANS, M. Development and preliminary testing of a device for the direct measurement of forces in prosthetic limbs. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, Piscataway, v. 11, no. 3, p. 289–293, 2003.

GARCIA, M. M. N.; LIMA, J. R. P.; COSTA JUNIOR, J. D.; FREIRE, H. A. O. L.; MAZILÃO, J. P.; VICENTE, E. J. D. Energy expenditure and cardiovascular response to traumatic lower limb amputees' gait. **Fisioterapia em Movimento**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 259-268, 2015.

HAFNER J. L.; SANDERS, L. S.; CZERNIECKI, B. AND FERGASON, J. Energy storage and return prostheses: does patient perception correlate with biomechanical analysis?: a systematic review. **PM&R**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 317–329, 2017.

HANSEN, A. H.; MEIER, M. R.; SAM, M.; CHILDRESS, D. S.; EDWARDS, M. L. Alignment of trans-tibial prostheses based on roll-over shape principles. **Prosthetics and orthotics international**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 89–99., 2003. 57

KOBAYASHI, T.; ORENDURFF, M.; BOONE, D. Effect of alignment changes on socket reaction moments during gait in transfemoral and transtibial prosthesis users: A systematic review. **Journal of Rehabilitation Research and Development**, [s. l.], v. 51, n. 6, p. 1–12, 2014.

MANUAL DO USUÁRIO. **L.A.S.A.R. Posture 743L100**, Ottobock.

MANUAL DO USUÁRIO. **3D L.A.S.A.R. Posture 743L500**, Ottobock.

MOONEY, R.; CARRY, P.; WYLIE, E.; SCHULTZ, A.; MCNAIR, B.; PAGE, C.; BIFFL, S.; HEARE, T. Radiographic parameters improve lower extremity prosthetic alignment. **Journal of children's orthopaedics**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 543–550, 2013.

NEGRINI, G. C. **Desenvolvimento de plataforma de forças para ser utilizada em um sistema de alinhamento de prótese de membro inferior**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2024.

NORIEGA, C. L. **Desenvolvimento de um programa computacional para avaliação postural de código aberto e gratuito**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado) São Paulo, 2012.

REISINGER, K. D.; CASANOVA, H.; WU, Y.; MOORER, C. Comparison of á priori alignment techniques for transtibial prostheses in the developing world: pilot study. **DisabilRehabil**, [s. l.], v. 29, n. 11-12, p. 863-872, 2007.

SILVA FILHO, J. O.; MANSO, G. J. M. C.; MARQUES, V. T.; RODRIGUES, D. F. Barreiras e facilitadores na dispensação de próteses de membros inferiores: uma análise das políticas públicas. **Revista Aracê**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 21721-21740, 2025.

SLAVIERO, A. Prevalência de abandono de próteses em indivíduos com amputação de membros inferiores. *In*: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA CESUMAR. VI. 2009, Maringá. **Anais** [...] Maringá. CESUMAR, 2009.

TABORRI, J.; PALERMO, E.; ROSSI, S.; CAPPA, P. Gait partitioning methods: a systematic review. **Sensors**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 1–25, 2020.

TAFTI, N.; KARIMLOU, M.; MARDANI, M. A.; JAFARPISHEH, A. S.; AMINIAN, G. R.; SAFARI, R. Development and preliminary evaluation of a new anatomically based prosthetic alignment method for below-knee prosthesis. **Assistive technology: the official journal of RESNA**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 38–46, 2020.

TAVARES, J. M. R. S. **Análise de movimento de corpos deformáveis usando visão computacional**. Porto: Universidade do Porto, 2000.

ZAHEDI, M. S.; SPENCE, S. E.; SOLOMONIDIS, J. P. Alignment of lower-limb prostheses. **Journal of Bone and Joint Surgery**, v. 68-B, n. 4, p. 545–548, 1986.