

**CLASSIFICAÇÃO
AUTOMATIZADA DE
PADRÕES DE RISCO PARA
RUPTURA DO LCA: SVM
LINEAR INTEGRADO A
SIMULAÇÕES
NEUROMUSCULOESQUELÉTICAS
IN SILICO**

**AUTOMATED CLASSIFICATION OF RISK PATTERNS FOR ACL RUPTURE:
LINEAR SVM INTEGRATED WITH IN SILICO NEUROMUSCULOSKELETAL
SIMULATIONS**

Engenharias, Ciências da Saúde • 28/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/785036886](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/785036886)

João Gabriel da Silva Figueiredo¹

Erivelton Nonato de Santana²

José Roberto Fontoura³

RESUMO

Este estudo piloto apresenta e valida um pipeline computacional automatizado de triagem preditiva focado na identificação de riscos de ruptura do ligamento cruzado anterior no futebol profissional. O método integra simulações neuromusculoesqueléticas in silico na plataforma OpenSim a um algoritmo de aprendizado de máquina Support Vector Machine operando com kernel linear no ambiente Python. A base de dados compreende vinte e sete ciclos de manobras de mudança de direção extraídos de repositórios públicos, mapeando variáveis cinéticas internas teciduais. O classificador alcança acurácia global e sensibilidade de cem por cento no conjunto de testes independentes, demonstrando capacidade de separar perfeitamente padrões motores seguros e lesivos sem gerar falsos negativos. A extração dos coeficientes do hiperplano revela que a força de cisalhamento antero-posterior da tíbia atua como o principal preditor mecânico na tomada de decisão algorítmica, apresentando peso de 2,39. O framework computacional comprova robustez científica e viabilidade prática para o diagnóstico preventivo não-invasivo de dose interna de carga. A substituição de dados cinemáticos tradicionais por sistemas de visão computacional markerless em tempo real constitui a perspectiva de continuidade desta linha de investigação.

Palavras-chave: Ligamento Cruzado Anterior; Modelagem Musculoesquelética; Aprendizado de Máquina; Biomecânica Computacional; Futebol Profissional.

ABSTRACT

This pilot study presents and validates an automated computational pipeline for predictive screening focused on identifying anterior cruciate ligament rupture risks in professional football. The method integrates in silico neuromusculoskeletal simulations on the

OpenSim platform with a Support Vector Machine machine learning algorithm operating with a linear kernel in the Python environment. The database comprises twenty-seven cutting maneuver cycles extracted from public repositories, mapping internal tissue kinetic variables. The classifier achieves one hundred percent global accuracy and sensitivity on the independent test set, demonstrating the ability to perfectly separate safe and injurious motor patterns without generating false negatives. The extraction of the hyperplane coefficients reveals that the antero-posterior tibial shear force acts as the main mechanical predictor in the algorithmic decision-making, presenting a weight of 2,39. The computational framework proves scientific robustness and practical feasibility for non-invasive preventive diagnosis of internal load dose. The replacement of traditional kinematic data with real-time markerless computer vision systems constitutes the perspective for the continuity of this line of research.

Keywords: Anterior Cruciate Ligament; Musculoskeletal Modeling; Machine Learning; Computational Biomechanics; Professional Football.

1. INTRODUÇÃO

A ruptura do Ligamento Cruzado Anterior, conhecido como LCA, permanece como uma das lesões mais severas e incidentes no futebol profissional, gerando impactos socioeconômicos substanciais para os clubes. Mecanicamente, a maioria desses episódios ocorre por mecanismos de não-contato, manifestando-se predominantemente durante manobras multidirecionais rápidas, como a desaceleração brusca associada a mudanças de direção. Durante esses movimentos, a complexa interação neuromuscular impõe ao joelho demandas que podem induzir à falha estrutural do

ligamento. A relevância de mapear esses fatores reside na possibilidade de estender a longevidade da carreira dos atletas e reduzir custos médicos.

A avaliação do risco dessas lesões tem sido baseada no monitoramento de variáveis externas por sistemas de posicionamento global (GPS). Contudo, essas abordagens macroscópicas falham em quantificar a dose interna, que representa o estresse mecânico real atuante nas estruturas teciduais profundas da articulação. Para estimar tais forças, a biomecânica convencional recorre a laboratórios baseados em câmeras ópticas com marcadores reflexivos. Embora metodologicamente precisos, esses arranjos experimentais apresentam alto custo operacional e demandam processamento lento, determinando uma lacuna metodológica clara: a inviabilidade de uma aplicação clínica contínua no cotidiano das comissões técnicas.

Como alternativa para solucionar esse problema, a computação científica emerge por meio das simulações *in silico*, que são análises realizadas exclusivamente em ambiente virtual por meio de computadores. O uso de modelos musculoesqueléticos baseados em restrições físicas, como os viabilizados pela plataforma de código aberto OpenSim, permite estimar forças de cisalhamento de forma não-invasiva. A integração de algoritmos de Aprendizado de Máquina, ou Machine Learning, a essas simulações apresenta-se como um caminho viável. Algoritmos baseados em Support Vector Machines, conhecidos como SVM, com a aplicação de um kernel linear (uma função matemática que busca uma linha reta de separação entre os dados), destacam-se pela robustez e pela facilidade de interpretar quais variáveis físicas foram mais importantes para a decisão da inteligência artificial.

A justificativa deste trabalho fundamenta-se na necessidade de criar ferramentas de triagem digital economicamente viáveis e rápidas para o esporte de alto rendimento. A hipótese levantada é que um classificador SVM linear, alimentado por dados de forças internas obtidos via simulação computacional, é capaz de identificar com precisão absoluta padrões cinéticos de risco, apontando o cisalhamento anterior da tíbia como o principal preditor mecânico.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo geral propor e validar um pipeline automatizado de triagem preditiva, integrando simulações neuromusculoesqueléticas a um classificador SVM com kernel linear. Para alcançar esse propósito, definem-se como objetivos específicos a extração das forças articulares internas de ciclos de movimento via dinâmica inversa no OpenSim, a estruturação de um banco de dados piloto contendo manobras seguras e lesivas, e a quantificação dos pesos matemáticos atribuídos a cada variável biomecânica durante o processo de classificação inteligente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento de plataformas tecnológicas voltadas à prevenção de lesões no esporte exige a convergência de saberes oriundos da medicina ortopédica, da engenharia mecânica e da ciência da computação. Compreender os fatores de risco que afetam o corpo do atleta durante o gesto esportivo demanda ir além da observação visual, exigindo a quantificação das forças internas que atuam nos tecidos profundos do sistema locomotor.

A base teórica que sustenta esta investigação estrutura-se a partir do mapeamento dos mecanismos causais da lesão tecidual,

passando pela viabilização matemática dessas cargas via simulação virtual, até atingir a camada de inteligência computacional responsável pela triagem dos dados. A integração dessas três dimensões científicas é detalhada nas subseções a seguir, estabelecendo o referencial conceitual necessário para a resolução da lacuna metodológica identificada neste trabalho.

2.1. Mecanismos Biomecânicos da Lesão do LCA no Futebol

A integridade estrutural do joelho durante a prática do futebol depende da capacidade dos ligamentos e dos músculos em suportar as demandas dinâmicas das manobras de mudança de direção. A falha mecânica do ligamento cruzado anterior ocorre quando as forças aplicadas superam a capacidade de resistência elástica do tecido colágeno, disparando um processo de ruptura macroscópica em uma fração de milissegundos. Esse fenômeno biomecânico manifesta-se tipicamente no momento do amortecimento de transição, onde o corpo precisa desacelerar e mudar de trajetória simultaneamente.

A literatura científica demonstra que este processo de falha está intimamente ligado a vetores de força específicos que atuam na articulação. De acordo com Nigg e Herzog (2007), a aplicação de forças que promovem a translação anterior da tíbia em relação ao fêmur gera um estresse de cisalhamento direto nas fibras do ligamento, comprometendo sua estabilidade. O aumento desse vetor de cisalhamento antero-posterior, combinado a momentos de valgo e rotação, potencializa a deformação estrutural, caracterizando o principal gatilho mecânico para a ocorrência da lesão sem contato direto.

Consequentemente, mapear a magnitude exata dessas forças de cisalhamento surge como um requisito essencial para prever o risco de lesões em atletas de alto rendimento. Contudo, devido à impossibilidade técnica e ética de medir tais cargas diretamente em seres humanos vivos durante a prática esportiva, torna-se obrigatório o uso de abordagens computacionais não-invasivas. Essa necessidade de quantificação virtual direciona o desenho metodológico para a modelagem musculoesquelética baseada em restrições físicas, permitindo estimar os parâmetros cinéticos internos por meio de softwares especializados descritos a seguir.

2.2. Modelagem Musculoesquelética In Silico e Plataforma OpenSim

A modelagem musculoesquelética executa a transição entre o movimento macroscópico observado externamente e as forças internas que agem sobre os tecidos biológicos. Ao transformar dados cinemáticos de trajetórias tridimensionais em representações de vetores musculares e articulares, a engenharia biomédica consegue acessar a chamada dose interna de carga sofrida pelo atleta. Esse ecossistema virtual utiliza algoritmos matemáticos baseados nas leis de Newton para solucionar sistemas mecânicos altamente complexos.

O uso de ferramentas abertas para essa finalidade consolidou-se como o padrão ouro na computação biomecânica aplicada. Conforme destacado por Delp et al. (2007), a plataforma OpenSim viabiliza a construção, troca e análise de modelos do sistema neuromusculoesquelético de forma reprodutível, permitindo que algoritmos de dinâmica inversa e otimização estática estimem com precisão a ativação de músculos individuais e as forças de contato

articular resultantes. A ferramenta atua resolvendo a redundância do sistema musculoesquelético humano através de funções de custo matemáticas que mimetizam o controle do sistema nervoso central.

A aplicação desse arcabouço computacional gera matrizes numéricas densas contendo o histórico temporal de forças de todas as estruturas articulares avaliadas nas simulações. Embora essas informações representem fielmente a física do movimento humano, o volume e a sobreposição dessas variáveis numéricas exigem uma metodologia analítica avançada para separar o comportamento seguro do comportamento patológico. Desse modo, os dados cinéticos gerados pelo motor físico do OpenSim precisam ser submetidos a algoritmos inteligência artificial aptos a extrair assinaturas preditivas e classificar os padrões de forma automatizada.

2.3. Classificação Padrão Via Support Vector Machines com Kernel Linear

O processamento inteligente de séries temporais biomecânicas requer ferramentas estatísticas computacionais capazes de identificar fronteiras de decisão em ambientes com múltiplas variáveis. O aprendizado de máquina atende a essa demanda ao construir estruturas matemáticas que aprendem a separar classes distintas a partir de exemplos prévios. No cenário de estudos biomecânicos pilotos, onde o número de amostras é controlado, a seleção do algoritmo deve priorizar a estabilidade matemática e a generalização do modelo.

O método das Máquinas de Vetores de Suporte preenche esses requisitos de estabilidade ao focar na maximização da margem de

separação entre os grupos. Conforme estabelecido por Vapnik (1995), o algoritmo SVM opera buscando um hiperplano ótimo que separa os dados pertencentes a classes diferentes, minimizando o erro de classificação estrutural mesmo em espaços de alta dimensionalidade. Quando configurado com um kernel linear, o algoritmo realiza essa separação por meio de um produto escalar direto, mantendo a geometria retilínea da fronteira e assegurando que os pesos atribuídos às características correspondam diretamente à importância de cada variável física.

Essa característica matemática confere ao modelo uma alta confiabilidade biomédica, pois garante que a decisão tomada pela inteligência artificial possa ser perfeitamente auditada e interpretada à luz da fisiologia humana. A convergência entre o hiperplano gerado pelo SVM linear e as forças teciduais calculadas pelo OpenSim encerra o ciclo de fundamentação necessário para este trabalho. Com o suporte conceitual estabelecido, torna-se possível detalhar a execução prática desses métodos, avançando diretamente para a descrição dos materiais utilizados e do encadeamento algorítmico adotado no pipeline da pesquisa.

3. METODOLOGIA

O desenho metodológico deste trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental computacional fundamentada no conceito de ciência aberta e reprodutibilidade técnica. O percurso metodológico foi estruturado para rastrear a transformação de coordenadas cinemáticas brutas em estimativas de carga biológica tecidual, finalizando com o processamento estatístico supervisionado. A integração entre o motor de física musculoesquelética e o ambiente de programação estatística

constitui o núcleo operacional para a execução da triagem automatizada.

Os procedimentos descritos a seguir especificam os instrumentos e os caminhos lógicos adotados para a consecução dos objetivos da pesquisa, garantindo o suporte necessário para a replicação integral do estudo por outros investigadores. O fluxo de trabalho divide-se em seções sequenciais que detalham desde a população de dados selecionada até o tratamento algorítmico final.

3.1. Amostragem e Modelagem Musculoesquelética In Silico

O universo amostral desta investigação piloto compreende dados dinâmicos secundários coletados durante a execução de gestos esportivos de alta intensidade. A triagem populacional focou em ciclos de manobras de mudança de direção, selecionando movimentos executados sob condições cinemáticas controladas e padronizadas. A amostragem totalizou vinte e sete ciclos completos de movimento, divididos previamente em duas categorias analíticas: vinte registros representando padrões cinéticos normativos e sete contendo assinaturas de sobrecarga ligamentar.

A extração das forças internas foi viabilizada pelo uso de modelos baseados em restrições mecânicas rígidas de segmentos corporais. Conforme demonstrado no protocolo metodológico de Anderson e Pandy (2001), a resolução da redundância muscular por meio de técnicas de otimização estática é um método matematicamente válido e computacionalmente eficiente para estimar as forças de contato articular em concordância com os padrões de ativação biológica real. O software de código aberto OpenSim executou o pipeline mecânico, processando a dinâmica inversa a partir das

forças de reação do solo e gerando as matrizes temporais de compressão e cisalhamento do joelho.

Os dados numéricos de força resultantes desse motor físico refletem a física clássica aplicada ao movimento do atleta na transição da pisada. Contudo, essa representação mecânica contínua necessita de um processamento estatístico que organize as séries temporais em variáveis discretas assimiláveis por sistemas computacionais inteligentes. A organização dessas matrizes e sua transferência para o ambiente de desenvolvimento de algoritmos estabelecem o vínculo lógico com a etapa subsequente de inteligência computacional.

3.2. Estruturação do Dataset e Classificação Via SVM Linear

O ambiente de programação estruturado em linguagem Python funcionou como a ferramenta de tabulação, normalização e análise estatística avançada do dataset biomecânico. As curvas temporais de forças de cisalhamento e compressão foram discretizadas a partir de seus valores de pico e integradas em matrizes lineares de características. Para assegurar a robustez da validação estatística, o banco de dados foi fracionado de maneira controlada, isolando dezoito amostras para o processo de ajuste dos parâmetros e reservando nove amostras distintas para a fase de testes independentes.

O procedimento de classificação supervisionada empregou o algoritmo de Máquinas de Vetores de Suporte com a aplicação rigorosa de um kernel linear. De acordo com a arquitetura matemática documentada por Pedregosa et al. (2011) no desenvolvimento da biblioteca scikit-learn, a implementação do

SVM linear permite mapear diretamente os hiperplanos de separação no espaço original dos dados, garantindo que os coeficientes do vetor ortogonal correspondam fielmente à contribuição de cada variável na fronteira de decisão. O modelo foi treinado para maximizar a margem de separação entre os padrões seguros e lesivos, extraíndo na sequência os pesos de cada característica biomecânica.

A conclusão do treinamento e a extração dos pesos matemáticos encerram a fase de processamento técnico dos dados dentro do pipeline proposto. O desempenho do modelo de classificação e a relevância quantitativa de cada força articular frente à decisão da inteligência artificial fornecem os subsídios numéricos da pesquisa. Esses resultados empíricos e suas respectivas implicações teóricas são detalhados na seção seguinte, confrontando os achados matemáticos com a literatura ortopédica clássica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados obtidos por meio do pipeline computacional integrado reflete a capacidade de discriminação geométrica do classificador frente às variáveis cinéticas extraídas. Os dados foram organizados de forma a expor inicialmente a eficiência estatística do algoritmo de aprendizado e, na sequência, o significado físico dos coeficientes gerados no plano de separação. Esta abordagem permite correlacionar o desempenho matemático do modelo com a causalidade mecânica observada na ortopedia.

A análise integrada e a interpretação das matrizes numéricas foram conduzidas em função da hipótese e dos objetivos estabelecidos na introdução deste estudo. Os achados quantitativos e o confronto

com a literatura específica da área são detalhados nos subtópicos sequenciais abaixo.

4.1. Desempenho Estatístico do Classificador SVM Linear

A avaliação inicial do pipeline concentrou-se na capacidade de generalização e separação do algoritmo supervisionado ao lidar com amostras independentes de validação. O classificador operando com restrição linear processou a matriz de teste contendo ciclos normativos e ciclos com padrão de sobrecarga mecânica. O modelo demonstrou estabilidade matemática na convergência dos dados, estabelecendo uma fronteira de decisão nítida e livre de sobreajuste entre os dois comportamentos motores avaliados.

O comportamento estatístico resultante desse processo de teste foi discretizado por meio de métricas clássicas de desempenho algorítmico, estando detalhado na Tabela 1. Conforme estabelecido nos critérios de validação de modelos preditivos em medicina desportiva por Halilaj et al. (2018), a obtenção de sensibilidade máxima (recall igual a um) é o parâmetro mais crítico em sistemas de triagem clínica, pois assegura que nenhum indivíduo sob risco real de lesão seja classificado incorretamente como seguro pelo sistema. O modelo alcançou acurácia global e recall de 100% no conjunto de teste, validando empiricamente a estabilidade da separação linear.

A obtenção de métricas ideais nesta prova de conceito confirma a viabilidade de separar padrões motores complexos a partir de projeções geométricas puramente lineares. Esses resultados demonstram que as restrições físicas impostas previamente pelo motor computacional do OpenSim simplificaram o espaço de busca

estatística do classificador Python. Com a eficiência da separação matemática devidamente comprovada, torna-se necessário investigar o significado ortopédico dos pesos atribuídos às variáveis de entrada, fazendo o vínculo direto com os coeficientes mecânicos que ditaram o comportamento da inteligência artificial.

4.2. Análise dos Pesos das Características e Causalidade Biomecânica

A segunda etapa de análise consistiu na abertura matemática do vetor ortogonal ao hiperplano para identificar quais variáveis dinâmicas exerceram maior influência na tomada de decisão do modelo. A extração dos coeficientes quantificou a relevância isolada das forças de contato articular geradas durante a manobra esportiva de mudança de direção. A magnitude numérica de cada peso indica a sensibilidade da fronteira linear frente às variações de carga sofridas pelo joelho no ambiente virtual.

Os valores exatos dos pesos atribuídos pelo algoritmo às três forças articulares principais estão descritos na Tabela 2. Esse resultado numérico corrobora diretamente os achados clínicos clássicos de McLean et al. (2004), os quais apontam que o aumento abrupto na força de cisalhamento anterior da tíbia é a causa primária para o tensionamento perigoso e subsequente falha mecânica do LCA. O classificador validou essa causalidade física ao atribuir o peso preponderante de 2,39 à força de cisalhamento antero-posterior, demonstrando que o algoritmo aprendeu leis biomecânicas consolidadas.

A expressiva diferença entre o peso do cisalhamento antero-posterior e os demais componentes cinéticos confirma que a força

ortogonal ao eixo tibial é a assinatura biomecânica primária da instabilidade. A consonância entre a física mecânica do OpenSim e a álgebra linear do SVM encerra a exposição ordenada dos dados empíricos desta pesquisa. O cumprimento integral dos objetivos analíticos e a confirmação da hipótese estabelecem a base para o fechamento do manuscrito, avançando diretamente para as considerações finais e conclusões estruturadas do estudo.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O pipeline computacional proposto atende integralmente ao objetivo geral deste estudo, demonstrando que a integração entre simulações neuromusculoesqueléticas in silico e o algoritmo de aprendizado de máquina Support Vector Machine com kernel linear constitui uma ferramenta precisa e matematicamente estável para a triagem automatizada de padrões de movimento. O modelo responde à pergunta inicial da pesquisa ao confirmar a hipótese de que o cisalhamento antero-posterior da tíbia atua como a variável de maior peso e sensibilidade na diferenciação entre os ciclos biomecânicos seguros e de risco. Os objetivos específicos são cumpridos por meio da extração bem-sucedida das cargas articulares e da consolidação de uma prova de conceito que apresenta acurácia ideal no diagnóstico de vulnerabilidades mecânicas.

A relevância prática desta investigação reside na viabilização de um método digital de monitoramento de dose interna que elimina a dependência de infraestruturas físicas laboratoriais complexas e de alto custo operacional. Como contribuição científica, o estudo prova que a aplicação de restrições físicas preexistentes no motor mecânico simplifica o espaço de busca estatística, permitindo que

fronteiras estritamente lineares classifiquem gestos esportivos complexos com alta interpretabilidade ortopédica. Contudo, a principal limitação deste trabalho concentra-se na dependência de dados secundários originados de marcadores reflexivos convencionais, o que restringe a execução do pipeline ao ambiente de pós-processamento computacional.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a substituição dos dados cinemáticos de entrada por matrizes geradas via sistemas de visão computacional markerless, permitindo que o processamento do OpenSim e a classificação do SVM linear ocorram em tempo real diretamente no ambiente de treinamento dos clubes de futebol. Este avanço tecnológico resolve a lacuna de campo e consolida a transição da modelagem virtual para uma plataforma prática de diagnóstico preventivo diário. O encerramento desta etapa metodológica e o alcance dos índices estatísticos propostos validam a arquitetura desenvolvida, fornecendo a sustentação necessária para a expansão do framework em bancos de dados populacionais mais amplos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, F. C.; PANDY, M. G. Dynamic optimization of human walking. **Journal of Biomechanical Engineering**, [S. l.], v. 123, n. 5, p. 381-390, 2001.

DELP, S. L. et al. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, [S. l.], v. 54, n. 11, p. 1940-1950, 2007.

HALILAJ, E. et al. Machine learning in biomechanics: methodology and applications. **Journal of Biomechanics**, [S. l.], v. 81, p. 1-11, 2018.

MCLEAN, S. G. et al. Effect of altered dynamic soccer cutting maneuvers on ACL loading. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, [S. l.], v. 36, n. 8, p. 1399-1408, 2004.

NIGG, B. M.; HERZOG, W. **Biomechanics of the musculo-skeletal system**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, [S. l.], v. 12, p. 2825-2830, 2011.

VAPNIK, V. N. **The nature of statistical learning theory**. New York: Springer-Verlag, 1995.

¹ Discente do Curso Superior de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas da Universidade do Estado da Bahia Campus II. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Curso Superior de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas da Universidade do Estado da Bahia Campus II. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Docente do Curso Superior de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas da Universidade do Estado da Bahia Campus II. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)