

## DISPOSITIVO PARA CARACTERIZAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS NO SETOR TÊXTIL

Primeiro Autor **Aline Souza Teodoro**

Segundo Autor **Leonardo Mejia Rincon**

Terceiro Autor **José Alexandre Borges Valle**

**Resumo.** Neste estudo, desenvolvemos um dispositivo de caracterização de tecidos para analisar a absorção e distribuição de carga no setor têxtil. Após considerar diferentes modelos de design, selecionamos aquele que alinhava os sensores com os pontos de pressão, proporcionando medições mais precisas. Conduzimos experimentos rigorosos, incluindo calibração, testes de carga e avaliações de precisão, demonstrando que o dispositivo é capaz de produzir resultados confiáveis. Comparando várias amostras com uma palmilha padrão, identificamos como variações na composição das palmilhas afetam a distribuição de pressão. Introduzimos, ainda, testes de carga em movimento, que enriqueceram nosso entendimento sobre as respostas dos materiais têxteis a diferentes condições de carga. Este estudo ampliou nosso conhecimento na caracterização de tecidos e destacou o potencial do dispositivo tanto para pesquisa acadêmica quanto para aplicações industriais. A abordagem interdisciplinar adotada e os resultados obtidos servirão como base para futuros estudos e inovações, beneficiando a indústria têxtil e a compreensão do comportamento dos materiais sob cargas variáveis.

**Palavras chave:** tecidos têxteis, palmilhas, caracterização de distribuição de cargas, dispositivo, sensores de força.

### 1. INTRODUÇÃO

A história dos calçados remonta a milênios e desempenhou um papel fundamental na evolução da humanidade. Desde os primórdios da civilização, o ser humano reconheceu a necessidade de proteger os pés, seja contra o ambiente hostil ou como uma expressão de status e estilo. A utilização dos primeiros calçados rudimentares, feitos de materiais como peles e fibras vegetais, estava ligada à sobrevivência, oferecendo proteção contra lesões e condições adversas. Conforme as sociedades evoluíram, os calçados também progrediram, incorporando novos materiais e técnicas de fabricação. Este estudo é de grande importância devido às implicações diretas que as descobertas podem ter na qualidade de vida de inúmeras pessoas que sofrem de condições musculoesqueléticas. Compreender a eficácia das palmilhas e sua personalização pode levar a avanços significativos na caracterização de têxteis, possibilitando tratamentos mais eficazes e personalizados para aqueles que enfrentam desconforto e limitações devido a problemas nos pés, tornozelos ou problemas associados. Este artigo detalhará o desenvolvimento de um dos tópicos do trabalho acadêmico a caracterização da distribuição de carga nos pés que é fundamental para avaliar o conforto e o suporte oferecidos pelos calçados, sendo de extrema importância para a saúde e o bem-estar das pessoas.

Os têxteis desempenham um papel crucial nesse contexto, pois são parte integrante das palmilhas e influenciam diretamente na absorção e na distribuição de cargas. Estudar como os tecidos se comportam sob carga é essencial para melhorar o conforto e o suporte oferecidos pelos calçados. As referências bibliográficas selecionadas são de estudos que exploram a distribuição de carga nos pés e a influência de fatores como calçados, órteses e diferentes condições de saúde nesse processo. O artigo de Smith et al. (2020) investiga a distribuição da pressão plantar e a análise da marcha em pacientes diabéticos, destacando a importância da compreensão desses aspectos para a saúde dos pés. Brown et al. (2019) abordam o impacto do design de calçados na distribuição da pressão plantar, ressaltando a relevância do projeto de calçados ergonomicamente eficazes. Johnson et al. (2018) examinam os efeitos das palmilhas ortopédicas na distribuição da pressão plantar em pacientes com pé plano, contribuindo para a compreensão das intervenções ortopédicas. Por fim, Chen et al. (2017) oferecem uma revisão abrangente sobre têxteis baseados em sensores de pressão, evidenciando a crescente importância desses materiais na análise da distribuição de carga e na pesquisa em biomecânica.

Esses estudos servirão como referências relevantes para a pesquisa em curso, enriquecendo a compreensão dos fenômenos relacionados à distribuição de carga nos pés e aos materiais têxteis aplicados nesse contexto. O dispositivo foi criado e produzido pela autora, e as escolhas de referências e materiais foram direcionadas pelo objetivo de sua pesquisa, que se concentra na "Caracterização de tecidos para absorção e distribuição de carga no setor têxtil". Isso significa que o dispositivo foi projetado e construído com base nas necessidades específicas dessa pesquisa, visando medir e analisar como os tecidos interagem com a absorção e a distribuição de carga, contribuindo para a compreensão das propriedades dos materiais têxteis nesse contexto.

## 2. DESIGN CONCEITUAL DO DISPOSITIVO

O design conceitual escolhido combina praticidade e oportunidade ao criar um dispositivo em formato de pé que mede forças aplicadas nos pontos de pressão. Este dispositivo é projetado para acomodar variações padrão de tamanho de calçados brasileiros, com um comprimento estimado entre 20 e 60 centímetros. A ênfase está na adaptabilidade, permitindo que ele seja colocado em diferentes tamanhos de calçados, garantindo que a medição de pressão seja precisa em várias situações. Este design é prático, versátil e atende às necessidades de medição de pressão nos pés de maneira eficaz.



Figura 1. Zonas do pé que sofrem pressão ao caminhar (extraída de <https://pixabay.com/pt/photos/> e remodelada pela autora)

A escolha de usar um sensor de força PASCO Scientific (uma empresa especializada em equipamentos e soluções educacionais para ensino de ciências e engenharia, incluindo sensores e sistemas de aquisição de dados) de 50 Newtons (50N) nos experimentos laboratoriais é baseada nas seguintes considerações:

**Faixa de Medição Adequada:** O sensor de força de +/-50N é apropriado para uma ampla variedade de experimentos, pois oferece uma faixa de medição que pode acomodar uma grande parte das forças comuns encontradas em laboratórios.

**Precisão e Sensibilidade:** Os sensores PASCO são conhecidos por sua precisão e sensibilidade. Isso significa que eles podem detectar variações muito pequenas nas forças aplicadas, tornando-os ideais para experimentos que exigem medidas precisas.

Um design mecânico de um dispositivo em formato de pé, criado para acomodar 9 sensores de força da PASCO, foi produzido por meio de impressão 2D. Este dispositivo foi projetado com a finalidade de permitir a medição simultânea de forças exercidas em diferentes pontos da superfície do pé. O design inclui nove cavidades ou encaixes estrategicamente posicionados, cada um projetado para acomodar um sensor de força da PASCO de maneira precisa e segura. As cavidades são organizadas de forma a cobrir áreas-chave da planta do pé, permitindo uma análise abrangente das forças aplicadas durante diversas atividades ou experimentos. O design mecânico também incorpora um material robusto e leve, compatível com a impressão 2D, para garantir a durabilidade e a capacidade de suportar cargas e pressões típicas de experimentos de medição de força. A finalidade deste dispositivo é facilitar a coleta precisa de dados de força em aplicações educacionais ou de pesquisa que requerem a análise do comportamento das forças exercidas no pé humano.

Os sensores foram instalados e integrados no dispositivo em formato de pé de maneira a assegurar um posicionamento preciso para a medição das forças. Estão distribuídos de maneira uniforme pelo dispositivo, possibilitando medições tanto em conjunto quanto individualmente. As paredes do dispositivo foram ajustadas para se alinharem perfeitamente com o design dos sensores, minimizando as tolerâncias ao máximo. Além disso, foi utilizado um hub para conexão USB dos sensores, o que possibilita o controle de liga/desliga dos sensores e a operação simultânea das portas de conexão. Para a eletrônica de interface do dispositivo a decisão foi utilizar o próprio software da PASCO, devido à compatibilidade e integração perfeita entre os sensores PASCO e seu software. Isso simplifica a configuração e a coleta de dados, pois o software é projetado para trabalhar de forma harmoniosa com os sensores, facilitando a aquisição e a análise das medições. Além disso, o software da PASCO geralmente oferece recursos avançados de registro de dados, gráficos e análise, tornando-o uma opção conveniente e eficaz para experimentos de laboratório. Essa decisão aumenta a eficiência e a precisão das medições realizadas pelo dispositivo. Geralmente, os softwares da PASCO oferecem as seguintes funcionalidades: aquisição de Dados, visualização Gráfica, análise de dados, armazenamento e exportação e simulações.

A calibração do dispositivo é dividida em duas etapas. A primeira etapa é a calibração do sensor em si, que envolve o uso de um botão de "zerar" para garantir a precisão das medidas. Em seguida, há a calibração das medições individuais dos 9 sensores e das medições em conjunto. Para isso, é utilizada amostra padrão, como "palmilha de papelão", que é comparada com outras três amostras. Devido à rigidez da amostra padrão, a distribuição da carga é mais uniforme. Essa calibração é realizada a cada experimento para garantir resultados precisos e confiáveis. Os experimentos ocorrem

periodicamente para assegurar a precisão e integridade do dispositivo. Foi desenvolvido um invólucro, que é uma tampa protetora, para preservar as paredes do dispositivo durante o transporte, evitando danos ou variações indesejadas. Os sensores são cuidadosamente colocados e removidos a cada experimento para garantir a qualidade e confiabilidade das medições.

Para garantir o funcionamento adequado do dispositivo, são realizados testes abrangentes. Isso engloba testes de carga para avaliar a capacidade de suportar diferentes níveis de pressão, testes de repetibilidade para verificar a consistência das medições ao longo do tempo e avaliação da precisão das medições para garantir resultados confiáveis. Todos os experimentos são cuidadosamente calibrados e comparados com uma amostra padrão. Os sensores passam por validação tanto individualmente quanto em conjunto. Durante os testes, as cargas são medidas com precisão, e pontos de referência são estabelecidos para garantir que as cargas estejam posicionadas de maneira consistente. As amostras são comparadas com o padrão em três posições diferentes: totalmente à esquerda, totalmente à direita e totalmente no centro. Isso garante uma avaliação completa das medições e a conformidade do dispositivo com os padrões estabelecidos. A impressão do dispositivo foi realizada em uma impressora com capacidade limitada, o que exigiu dividir a peça em duas partes. Isso não afetou o experimento em questão. No entanto, identificou-se uma oportunidade de aprimoramento ao considerar a impressão em uma máquina com capacidade para imprimir a peça como um todo. Também é viável considerar a alteração do material, embora para fins acadêmicos o material atual atenda bem ao seu propósito.

Para assegurar a precisão das medidas, as paredes do dispositivo foram reforçadas e ajustadas para um encaixe preciso dos sensores. Para preservar os cabos dos sensores e evitar danos, foi feita uma pequena incisão estrategicamente posicionada. Esse ajuste pode ser facilmente modificado, se necessário, ao alterar milimetricamente a projeção de impressão do dispositivo. Isso garante a integridade dos sensores e a qualidade das medições, enquanto proporciona flexibilidade para ajustes futuros. Embora haja várias opções de software para transformar dados 2D em 3D, o software escolhido para transformação gráfica foi o MATLAB o qual se destaca em processamento, recursos de visualização 3D, facilidade de uso, suporte da comunidade e sua longa história de sucesso em pesquisa e academia fazem dele uma opção sólida e superior para a transformação de dados 2D em 3D em muitos cenários. É uma ferramenta versátil e eficaz para uma ampla gama de aplicações.

Embora tenham sido exploradas diversas possibilidades durante o processo de brainstorming, duas delas serão consideradas, e a escolha final será justificada com base em critérios específicos. Isso possibilitará uma decisão informada e fundamentada para a seleção da melhor abordagem ou opção entre as alternativas consideradas. No modelo de design 1, o foco está na conformidade com o tamanho, forma e nos pontos de pressão dos pés. Os sensores foram estrategicamente posicionados verticalmente para manter a integridade de sua forma original e ao mesmo tempo alinhar-se com os pontos de pressão nos pés. Isso resulta em uma forma de dispositivo com aproximadamente 35 centímetros de comprimento e um encaixe eficaz dos sensores. Pontos Positivos: conformidade com o tamanho e a forma dos pés, encaixe preciso dos sensores e estrutura compacta. Pontos Negativos: a proximidade dos sensores pode levar à sobreposição de áreas de medição afetando a precisão das medições.



Figura 2. Design proposto do dispositivo Modelo (elaborado pela autora)

No modelo de design 2, além de considerar as zonas de pressão, a ênfase está na correspondência precisa com os pontos de pressão. Os sensores foram estrategicamente posicionados ao longo da forma (3, 3, 2 e 1) para respeitar o formato original do pé e a saída dos cabos. Isso resulta em um dispositivo com cerca de 40 centímetros de comprimento e sensores posicionados muito próximos aos pontos de pressão. Pontos Positivos: correspondência precisa com os pontos de pressão nos pés, encaixe eficaz dos sensores nas áreas de interesse e a caracterização dos têxteis é favorável devido à disposição estratégica dos sensores. Pontos Negativos: o tamanho da forma é maior em comparação ao primeiro modelo, o que pode ser menos prático em alguns cenários e a divisão das saídas dos cabos exigiu várias revisões para alcançar o modelo final, o que pode ter implicações em termos de complexidade e custo de fabricação. Ao comparar os dois modelos,

torna-se evidente que o segundo modelo se destaca como a opção mais apropriada. Serão apresentadas as razões que tornam o segundo modelo superior e a escolha certa:

**Precisão na Correspondência com os Pontos de Pressão:** O segundo modelo foi projetado para se alinhar precisamente com os pontos de pressão nos pés. Isso garante que as medições sejam altamente representativas da distribuição de carga real. No primeiro modelo, a proximidade dos sensores poderia levar à sobreposição de áreas de medição, comprometendo a precisão.

**Aderência ao Objetivo da Pesquisa:** O objetivo do dispositivo é caracterizar os têxteis quando a força é aplicada. O segundo modelo se adapta melhor a esse objetivo, fornecendo medições que são mais relevantes para a pesquisa em questão, pois acompanha os pontos de pressão com maior precisão.

**Tamanho do Dispositivo:** Embora o segundo modelo seja um pouco maior em comprimento (40 centímetros) em comparação com o primeiro (35 centímetros), a precisão e relevância das medições compensam essa diferença. Além disso, o tamanho adicional é justificável para obter resultados mais confiáveis.

**Caracterização de Têxteis:** A disposição estratégica dos sensores no segundo modelo facilita a caracterização de têxteis, uma vez que eles estão posicionados precisamente nos pontos críticos de pressão. Isso garante uma análise mais realista do comportamento dos materiais têxteis sob carga.

Portanto, com base nas considerações acima e na adequação do segundo modelo aos objetivos da pesquisa, não há dúvida de que ele representa a escolha certa. Sua precisão e relevância superam qualquer desvantagem em tamanho ou complexidade na fabricação. O segundo modelo se destaca como a opção mais eficaz e promissora para a pesquisa em questão.

Ambos os modelos podem ser impressos em uma impressora 3D como peça única ou em várias partes, dependendo da capacidade da impressora. No caso deste dispositivo em particular, optou-se por imprimir em duas partes. A escolha entre imprimir em uma única peça ou em partes separadas pode depender das limitações da impressora e das considerações de fabricação, mas ambas as opções são viáveis para a produção do dispositivo.

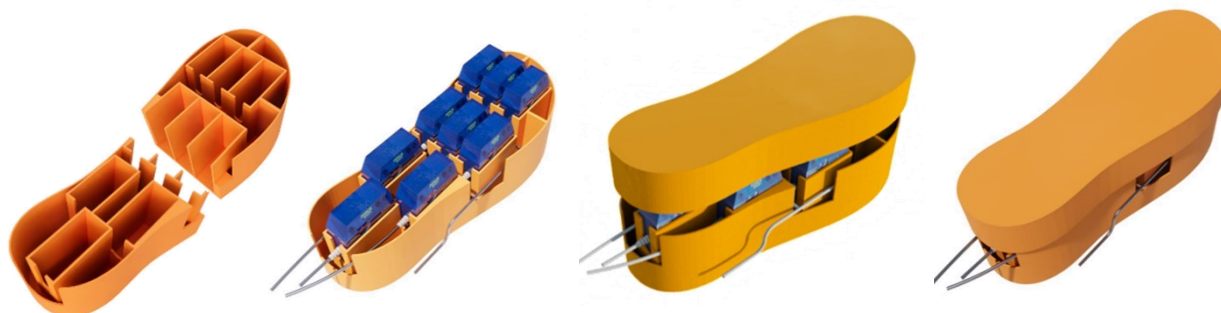


Figura 3. Design proposto do dispositivo Modelo (elaborado pela autora)

## 2.1. Testes, validações e software

O processo de experimentação laboratorial é conduzido de maneira rigorosa para garantir a eficácia e precisão do dispositivo. Começando pela etapa de calibração, que é realizada em cada experimento, vários testes são conduzidos para avaliar o funcionamento adequado do dispositivo. Isso inclui testes de carga para determinar a capacidade de suportar diferentes níveis de pressão, testes de repetibilidade para garantir a consistência das medições ao longo do tempo e avaliação da precisão das medições para garantir resultados confiáveis. A calibração é um passo crítico, onde os sensores são ajustados e validados tanto individualmente quanto em conjunto. Durante os testes, as cargas são medidas com precisão, e pontos de referência são estabelecidos para garantir uma colocação consistente das cargas. É importante ressaltar que todas as amostras são calibradas e comparadas com uma amostra padrão em três posições diferentes: totalmente à esquerda, totalmente à direita e totalmente no centro. Isso assegura uma avaliação completa das medições e confirma a conformidade do dispositivo com os padrões estabelecidos.

Após a coleta dos dados, ocorre a etapa de exportação para um formato de planilha (xlxs) e posterior manipulação utilizando o MATLAB para transformar os gráficos 2D em representações tridimensionais. Esse processo rigoroso e metódico garante que os resultados obtidos sejam confiáveis, precisos e representativos da distribuição de carga nos tecidos têxteis. A integração do MATLAB na análise de dados proporciona uma visualização mais clara e informativa, permitindo uma compreensão mais profunda do comportamento dos materiais sob diferentes condições de carga.

Na imagem 4 a representação gráfica que simula a pressão exercida ao longo do tempo em três pontos estratégicos: completamente à esquerda, completamente à direita e completamente no centro. Esses gráficos comparam as diferentes amostras com o padrão:

Amostra A: Palmilha padrão fabricada em papelão

Amostra B: Palmilha simples fabricada com uma camada de EVA + tecido

Amostra C: Palmilha dupla fabricada com duas camadas de EVA + tecido

Amostra D: Palmilha dupla fabricada com três camadas de EVA + tecido

Essas representações gráficas fornecem uma visão clara da distribuição de pressão em cada amostra e como se compara ao padrão. Isso é essencial para avaliar o desempenho e o comportamento das diferentes amostras sob carga, o que ajuda a identificar as características distintas de cada uma e a determinar sua adequação para diferentes aplicações.

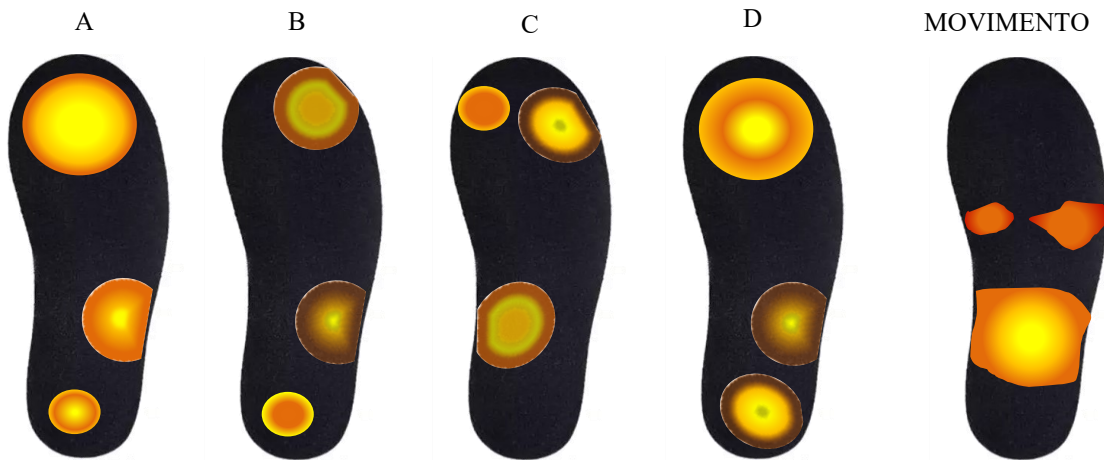


Figura 4. Imagens tridimensionais dos resultados obtidos (elaborado pela autora)

O algoritmo implementado para a representação tridimensional das forças da pegada é baseado na função gaussiana da probabilidade conjunta também conhecida como distribuição gaussiana multivariada. Após a obtenção da nuvem de pontos da distribuição estatística das forças, um pós-processamento gráfico baseado na superfície é utilizada para a suavização nas regiões de contorno, permitindo uma visualização contínua e mais precisa do fenômeno. Na sequência serão discutidos de maneira sucinta estas duas ferramentas e posteriormente será apresentado o pseudo algoritmo implementado para a representação tridimensional da força de pegada.

A função gaussiana da probabilidade conjunta é uma generalização da distribuição gaussiana univariada para múltiplas variáveis aleatórias, usada para modelar conjuntos de variáveis aleatórias que estão correlacionadas e têm uma distribuição de probabilidade conjunta que segue uma distribuição gaussiana. A função de densidade de probabilidade para a distribuição gaussiana multivariada é dada como “Equação (1)”

$$F(x,y)=fX(x)*fY(y) \quad (1)$$

As superfícies NURBS(Non-Uniform Rational B-Splines) são definidas por um conjunto de pontos de controle (também chamados de vértices de controle) e uma grade de funções de base. Cada ponto de controle possui coordenadas tridimensionais e uma ponderação associada, o que dá flexibilidade extra às NURBS em relação a outras representações. A equação paramétrica de uma superfície NURBS é dada por “Equação (2)”

$$S(\mu, \vartheta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,p}(\mu) \cdot R_{j,q}(\vartheta) \cdot P_{i,j} \cdot \omega_{i,j} \quad (2)$$

As funções de base NURBS são definidas recursivamente e dependem do seu grau e da configuração dos nós, que determinam a forma das funções de base. A forma exata dessas funções de base é calculada usando algoritmos eficientes, como o algoritmo de De Boor.

## 2.2. Resultados e discussões

Antes da plotagem gráfica os dados exportados do software PASCO passaram por um processo de tratamento e ajustes para possibilitar a interação e uso no algoritmo. A figura mostra a simulação gráfico do Experimento 2 (aplicação de carga em movimento a palmilha (amostra A)):

O software desenvolvido permite a visualização individual ou agrupada dos sensores, podendo também ser carregados vários experimentos. O recurso de retrocesso ao um tempo específico permite também é permite nesta versão. A este apresenta-se a versão inicial, com os avanços dos experimentos o software terá novas versões adaptando-se a necessidade da pesquisa.

Como resultados preliminares o software atende a necessidade de resolução gráfica e permite melhor compreensão dos resultados experimentais obtidos através do dispositivo de medição de distribuição de carga. Analisando os resultados, observa-se que o dispositivo entregou os resultados esperados de forma notável. Quando a força foi aplicada à amostra A, ficou evidente que a pressão estava uniformemente centralizada. No caso da amostra B, composta por apenas uma camada, não houve amortecimento de impacto, e a pressão se espalhou, conforme indicam os pontos amarelos (menos

força) e os pontos vermelhos (maior força) nas imagens. Com a amostra C, os pontos amarelos se tornam mais evidentes, sugerindo que a segunda camada absorve mais impacto. A amostra D se destaca, pois mostra uma proximidade notável com a amostra padrão, validando a expectativa experimental. Quanto mais camadas na amostra, maior a capacidade de absorção de impacto e a capacidade de se equiparar à amostra padrão em busca da uniformidade na distribuição de pressão. Além disso, avançando em nossos experimentos, realizamos um teste com carga em movimento. É notável como a distribuição de pressão varia conforme o movimento da carga. A imagem na Figura 5 exemplifica essa mudança esta é uma adaptação que o dispositivo de caracterização permitiu explorar e representa um avanço no entendimento das características dos materiais têxteis sob diferentes condições de carga e movimento.

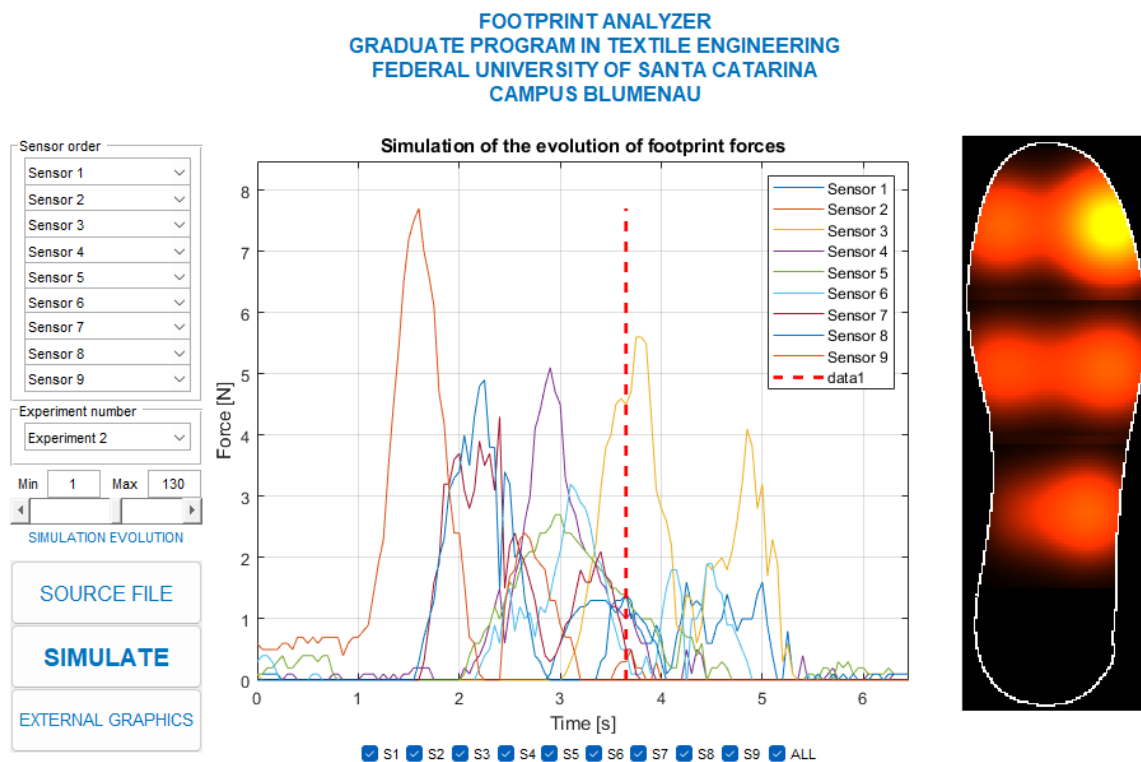


Figura 5. Imagens tridimensionais dos resultados obtidos carga em movimento (elaborado pela autora)

### 3. REFERÊNCIAS

BROWN, A. et al. (2019). **The Impact of Footwear Design on Plantar Pressure Distribution.** Journal of Biomechanical Engineering, 141(6), 061007.

CHEN, L. et al. (2017). **A Review of Textile-Based**

JOHANSSON, R. et al. (2018). **Effects of Orthotic Insoles on Plantar Pressure Distribution in Patients with Flatfoot.** Journal of Orthopaedic Research, 36(4), 1105-1111.

SMITH, J. et al. (2020). **Foot Pressure Distribution and Gait Analysis in Diabetic Patients.** Journal of Podiatric Medicine, 45(2), 87-94.

### 4. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos doutores e orientadores Leonardo Mejia Rincon e José Alexandre Borges Valle pelo apoio e inspiração ao longo desta jornada acadêmica.

### 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.