

CALÇADO COM CONCEITO DE DESIGN E ENGENHARIA 3D, SOB MEDIDA, FEMININO, SALTO ALTO E CONFORTÁVEL

*Conceptual Shoe 3D Design and Engineering, Under Measure,
Female, High Hell and Comfortable*

Silva, José Augusto Marinho; PhD; FAUUSP, gutomarinho@usp.br ¹

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados finais obtidos da tese de doutorado desenvolvida entre 2012 e 2016, enfatizando a prototipagem do calçado conceitual elaborado. As técnicas utilizadas desde a concepção do produto, análise de desempenho e fabricação foram: 1) Scanner 3D; 2) Teste de baropodometria; 3) Análise de desempenho virtual; 4) Impressão 3D.

Palavras Chave: Design de Calçados; Ergonomia; Simulação Virtual; Elementos Finitos; Impressão 3D.

Abstract

This paper aims to present the final results of the doctoral thesis developed between 2012 and 2016, emphasizing the prototype of the conceptual shoes design. The techniques used for product design, performance analysis and manufacturing were: 1) 3D Scanner; 2) Baropodometry test; 3) Virtual Performance Analysis; 4) 3D printing.

Key Words: Shoes Design; Ergonomics; Virtual Simulation; Finite Elements; 3D printing.

Introdução

Para a realização do presente trabalho, desenvolveu-se uma abordagem metodológica para o projeto de calçados, focado na melhor adaptação aos pés dos usuários, representados pelo universo das mulheres, com a característica do “sob medida”, visando principalmente o conforto. Para o projeto sob medida foi utilizado um *scanner* 3D para a captura antropométrica e anatômica do pé.

¹ Designer e professor desde 1998 do curso de Desenho de Moda da FASM - Fac. Sta. Marcelina, orientador de Acessórios de Moda. Mestre (2005) em Engenharia Automotiva, POLI/USP, Dep. de Eng. Mecânica e Doutor (2016) pela FAUUSP, Fac. de Arquitetura e Urbanismo da Univ. de São Paulo. Consultor em Biomecânica dos Calçados.

O estudo da biomecânica do pé, embasados por trabalhos assim como a análise da marcha por Perry (2005), teve sua aplicação prática através da realização de testes de baropodometria, sendo esta a análise de pressão plantar resultante do contato entre o pé e a palmilha. Na análise de desempenho foram realizadas modelagens e simulações virtuais para análise pelo método dos elementos finitos (*software* de engenharia mecânica). Quanto a fabricação, foi utilizada unicamente a impressão 3D com o conceito dos metamateriais (escala nanométrica da estrutura do material) para garantir melhor resistência e, por exemplo, flexibilidade.

Base Teórica e Empírica

A metodologia consiste na utilização de simulação virtual para análise de desempenho, sendo esta uma ferramenta que pode prever possíveis falhas antes da produção em escala, principalmente pelos estudos dos fenômenos relacionados com as deformações dos materiais sofridas por cargas aplicadas, ou seja, tensão x deformação.

Para o desenvolvimento do protótipo foram consideradas especificamente questões pertinentes ao conforto que, segundo Berwanger (2011) e Van Der Linden (2004), é a característica mais difícil de se quantificar em um calçado, pois sua percepção é influenciada por diversos aspectos subjetivos. Vale ressaltar que a solução estética foi resultante da leitura e interpretação pessoal das informações obtidas pelo software, obtendo originalidade e exclusividade ao projeto, podendo ser considerado assim, tanto o produto original quanto seu método de criação. O projeto idealizado possui processo de requerimento de patente junto ao INPI - Instituto Nacional de Propriedade Intelectual, tanto para a estética realizada (patente de desenho industrial), quanto para o método proposto, referente a metodologia para análise de desempenho de calçados femininos com foco no conforto do usuário utilizando a modelagem virtual e a impressão 3D (patente de inovação).

A metodologia considerada para a elaboração do modelo de análise ocorreu pela obtenção de dados de pressão plantar realizados em ensaios de

baropodometria, utilizando palmilhas com sensores que medem as pressões instantâneas durante o passo, conforme especificações da norma ABNT NBR 14836. Os calçados selecionados para os testes foram cedidos por uma marca comercial conhecida e atuante no mercado brasileiro há mais de 30 anos, sendo modelos sociais, tipo sandálias e scarpins, considerados produtos de luxo. Essas medições são os dados de entrada para o software de análise pelo método dos elementos finitos. As forças aplicadas em uma palmilha virtual simulam as regiões dos picos de pressão obtidas pela baropodometria, caracterizando a distribuição da pressão plantar. Um pé real foi capturado digitalmente com a utilização de scanner 3D, fornecendo a base para gerar o modelo virtual para o projeto sob medida.

Essas análises auxiliaram no desenvolvimento de um novo projeto de calçado feminino de salto alto, dando o suporte necessário para a idealização de soluções que proporcionem diminuir os picos de pressão, causando assim menor desconforto e maior adequação do projeto às características fisiológicas de cada usuário pela criação de palmilhas anatômicas e personalizadas, como sugere o resultado das análises.

Uma vez que é utilizada uma metodologia que consiga prever o desempenho de um calçado antes da sua fabricação, segundo Filho (2004), são inúmeras as vantagens que podem auxiliar na otimização e melhoria dos calçados existentes, ao reduzir o tempo de desenvolvimento e os custos envolvidos, além de garantir a qualidade do produto. O design de calçados analisado pelo método dos elementos finitos, pode ser inspirado pelos resultados do seu próprio desempenho, influenciando as escolhas de soluções que auxiliem na definição do melhor projeto. Inúmeros autores, assim como Baxter (2010), intensificam a importância da união dos saberes do design e engenharia, e o quanto essa integração se faz necessária para o sucesso dos produtos em geral.

Ao final do trabalho foi desenvolvido um protótipo experimental de um calçado feminino de salto alto que reforçou a validação da pesquisa. Sua concepção abrange a elaboração de palmilha anatômica que respeite as características do pé digitalizado (representando o cliente para o projeto sob

medida), com o objetivo de melhorar o contato entre a palmilha e o pé, ajudando na melhor distribuição das pressões ocasionadas pelo caminhar. A aplicação das pressões no modelo virtual e a interpretação dos resultados obtidos pelas análises de desempenho, proporcionaram a principal inspiração para a geração da forma final do calçado.

A escolha pela fabricação em impressão 3D se dá pela oportunidade de propor uma nova metodologia de projeto e fabricação de calçados com um conceito 100% digital. Inúmeras vantagens podem ser obtidas em relação ao método tradicional de fabricação, assim como a otimização de componentes e processos, menor impacto ambiental e maior adequação do produto pelo projeto sob medida, valorizando o conforto e a saúde do usuário.

O detalhamento e descrição de cada parte do trabalho desenvolvido pode ser conferido nos demais artigos apresentados pelo autor, principalmente no 6º e 11º Colóquio de Moda de 2010 e 2015, respectivamente e no 1º, 2º e 3º CIMODE - Congresso Internacional de Moda e Design, realizados em 2012, 2014 e 2016, respectivamente. Como o objetivo deste trabalho é especificamente demonstrar o resultado obtido pelo desenvolvimento do protótipo experimental, as bibliografias apresentadas são exclusivamente referentes aos artigos acima mencionados e a própria tese de doutorado. Como nos outros artigos a apresentação limitou-se às fases do desenvolvimento e nenhum resultado foi mostrado, este artigo, por sua vez, demonstra esses resultados.

Base Empírica

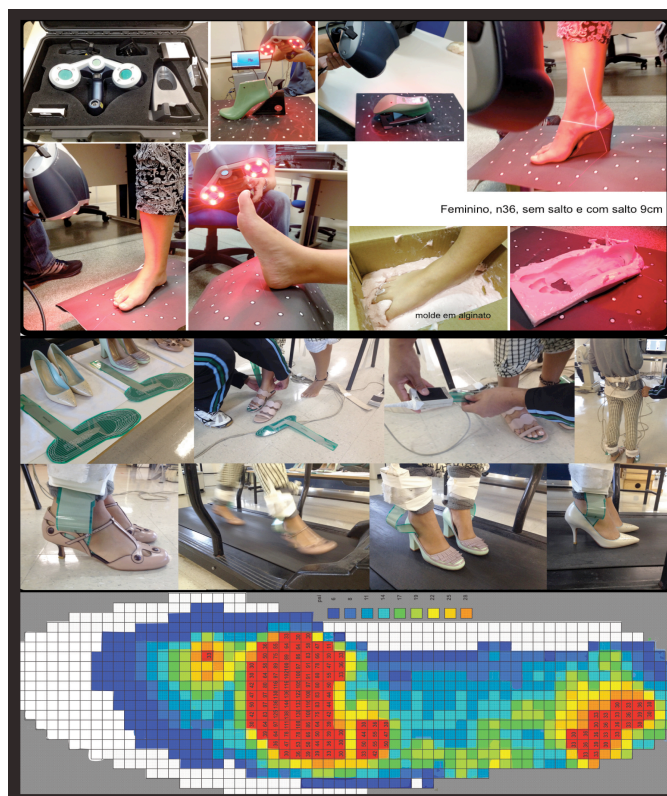
O uso das tecnologias disponíveis para a captura de elementos tridimensionais, como o scanner 3D, representa uma importante ferramenta para se obter o resultado pretendido na adequação do projeto do produto às características fisiológicas de cada usuário. Considerou-se a possibilidade de amenizar o desconforto encontrado em calçados femininos com salto alto, que normalmente não apresentam palmilhas anatômicas, nem são adequados às

medidas e proporções dos diferentes tipos de pés. Essa consideração faz com que o projeto seja caracterizado com a denominação “sob medida”.

A elaboração do modelo de análise virtual considerou a obtenção de dados de pressão plantar em ensaios de baropodometria. Esse ensaio pode ser realizado em uma plataforma de forças, mas limita-se à observação de pés descalços. Para o estudo em calçados com salto foram utilizadas palmilhas com sensores que medem as pressões instantâneas durante o passo.

Com o modelo de passo considerado como referência da média dos ensaios, gerou-se uma imagem com ambos os picos de pressão, localizados na região do calcanhar e dos metatarsos, conforme a figura 1. Mesmo ocorrendo em momentos distintos, os picos são considerados na mesma imagem para efeito de análise da situação de maior desconforto provocada pelas forças atuantes na palmilha dos calçados, independentemente do momento em que isso ocorreu.

Figura 1: Scanner 3D portátil, para a captura da fôrma do calçado e do pé. Ensaios de baropodometria para obtenção da distribuição das pressões plantares e imagem com as pressões máximas aferidas nos ensaios de baropodometria. Fonte: Acervo pessoal.



A análise pelo método dos elementos finitos fundamentou-se na simulação virtual para caracterizar os fenômenos mecânicos que representassem as solicitações reais dos esforços sofridos pela palmilha aferidos na baropodometria, objetivando dar suporte para as análises pretendidas. Por sua vez, o modelo deveria apresentar diversas informações quanto aos aspectos design (principalmente quanto a geometria e definição da estrutura) e engenharia (por considerar a ciência dos materiais, submetendo-se a aplicação de cargas a fim de obter a leitura das possíveis deformações). Para o desenvolvimento dos estudos idealizados para o trabalho, as etapas deveriam seguir as seguintes especificações:

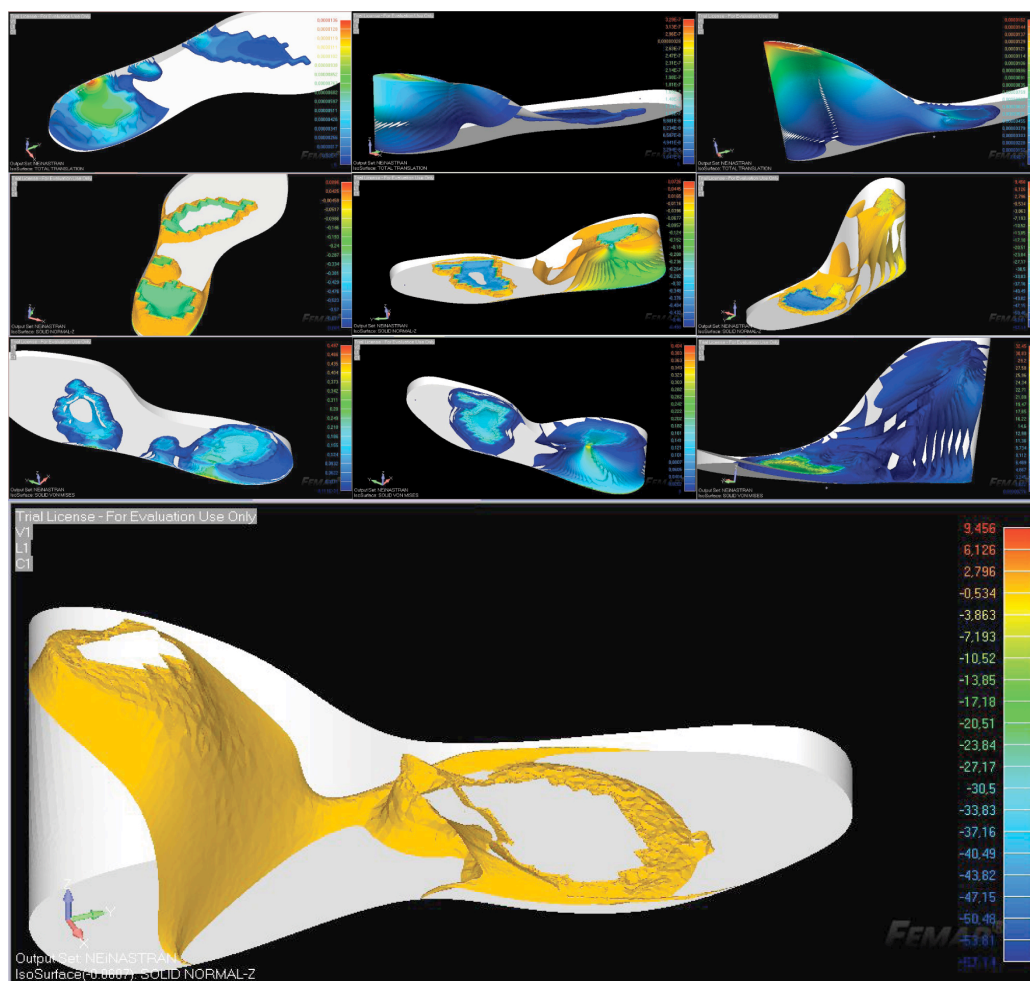
- 1) Após a criação da geometria em 3D do produto a ser analisado, deve-se definir uma malha de superfície, normalmente especificada em formas triangulares ou retangulares, onde o encontro das arestas, os vértices, representam um nó. Cada nó pode fornecer informações para a análise de deformações, por exemplo, em que as tensões aplicadas e os deslocamentos aferidos são os principais resultados gerados pelo software (a tese considerou a utilização do Femap + Nastran, inclusive para a geração das malhas).
- 2) Definir a propriedade do material a ser aplicada na estrutura de análise (normalmente pode ser encontrada na biblioteca do próprio programa). Para o desenvolvimento da tese, a palmilha foi transformada geometricamente em um bloco maciço, extrudado verticalmente, possibilitando a verificação das propagações das forças e suas reações no solo. Com esse objetivo, o material dessa plataforma não deveria influenciar na leitura dos esforços. Nesse contexto, torna-se necessário escolher algum material que apresente características isotrópicas², assim como o metal/ferro escolhido³.
- 3) A situação para a análise (denominada também “situação de contorno”) é definida pelas aplicações dos carregamentos e suas restrições. A

² Materiais isotrópicos são definidos por apresentar as mesmas propriedades mecânicas em todas as direções (VAN VLACK, 1984).

³ O metal/ferro escolhido tem as seguintes propriedades: a classificação pelo software utilizado FEMAP é A286HRES IronAlloy, sendo um material isotrópico, apresentando índice de densidade 7,43508E-4, coeficiente de expansão térmica 1,1E-5 e condutividade térmica 1,66656E-4, módulo de elasticidade 291000 e coeficiente de Poisson com o valor de 0,399039.

configuração definida para iniciar os ensaios virtuais é assim caracterizada: apesar de utilizar os dados dinâmicos coletados na baropodometria, a análise é considerada estática, por não apresentar variações de cargas ao longo do tempo. Os resultados foram obtidos pela interpretação das imagens geradas pelo software, adotando-se alguns critérios de avaliação sob a ótica da engenharia mecânica, tais como deformações em todos os graus de liberdade (Total Translation); tensões na vertical (Normal Z), e em relação à falha que indica o escoamento de sólidos antes de atingir a deformação plástica (Von Mises). Os resultados obtidos são ilustrados na figura 2.

Figura 2: Resultados dos ensaios virtuais para a verificação do deslocamento total para os saltos estudados com 1, 4,5 e 9cm de altura (da esquerda para a direita, respectivamente) - Total Translation, Normal Z e verificação do critério de falha de Von Mises (de cima para baixo, respectivamente). Em destaque, a superfície gerada no ensaio Normal Z no calçado com salto 9cm em uma determinada faixa de tensão, fonte principal de inspiração para o projeto conceitual. Fonte: Acervo Pessoal.



A união dos dois arquivos scaneados da parte inferior do pé, representa o pé relaxado (representado pela cor bege) em relação ao pé com efeito “esparramado” (representado pela cor azulada). Como o pé apoiado estava pisando sobre uma caixa de papelão preenchida com alginato, o modelo obtido pelo escaneamento representa a referência da largura que o pé assume sob a pressão do peso do corpo. Para definir o formato anatômico da palmilha, utilizou-se o arquivo do pé relaxado como principal referência para a região do calcanhar, do arco plantar e dos metatarsos. Já para os dedos, ambos os arquivos foram utilizados.

A superfície em destaque representada na figura 2, é uma *isosurface* relacionada a uma faixa de tensão específica, demonstrando a propagação das tensões pela estrutura, indicando como se dá a propagação das forças. Tomada essa faixa de tensão e agregando-se espessura estrutural, teve início a modelagem 3D.

Foi estabelecido o propósito de proporcionar certa flexibilidade ao nylon utilizado na fabricação do protótipo por impressão 3D, sendo um material rígido, com pouquíssima flexibilidade, e como o objetivo é diminuir os picos de pressão, acredita-se na possibilidade de agregar desenho estrutural nas partes mais propícias à concentração das pressões para tornar o calçado mais flexível, atribuindo-lhe maior valor ergonômico em função do amortecimento das forças, absorvidas pela estrutura do produto. O estudo e aplicação da teoria dos metamateriais, fundamentam o estudo e sua aplicação está demonstrada na sequência da figura 3.

Figura 3: Definição da linha referente à altura da lateral da palmilha e construção geométrica da palmilha anatômica e a elaboração das linhas para a construção das superfícies inspiradas na imagem da *isosurface* selecionada. Fotos do calçado conceitual. Fonte: Acervo Pessoal.



Conclusão

O teste de baropodometria serviu como base para a obtenção das informações referentes às pressões plantares, e como ferramenta de análise de calçados, também pode ser muito útil, inclusive para o designer de calçados. As medições comprovaram que o design do salto influencia significativamente na distribuição do peso corporal, observado em calçados com a mesma altura de salto, aferindo uma redução de 17% no pico de pressão registrado no modelo de calçado com salto largo em comparação ao modelo de salto fino.

Com a afirmação de que a indústria de calçados também é uma montadora de produtos, assim como a automotiva, acredita-se ter grandes possibilidades de evolução para o setor calçadista inspiradas no setor automotivo e embasadas pela hipótese da transferência de tecnologias. A percepção que se tem é que deveria-se ter uma maior utilização das ferramentas da engenharia pelos designers, uma vez que o processo do projeto do produto de engenharia é muito similar entre as duas áreas.

A realização das análises virtuais de desempenho permitiram uma validação mais aprofundada das hipóteses iniciais da pesquisa no que tange a obtenção de melhores condições de conforto para calçados femininos de salto alto.

Analisando a propagação das cargas nos planos da estruturas idealizadas, é possível realizar análises com o objetivo de fornecer opções de desenhos que realizem a mesma função da forma inicial, demonstrando a redução de material necessário para a fabricação de um componente que exerça o mesmo desempenho da peça original. O resultado é a redução significativa na quantidade de material, conseqüentemente, com menor custo para a sua fabricação.

Acredita-se na utilização desse tipo de imagem para inspirar a criação de calçados mais adaptáveis aos biotipos, sustentada pela comprovação da eficácia da análise virtual sob a ótica da biomecânica e engenharia mecânica.

Fica evidente a necessidade de preparação que um designer, engenheiro e/ou equipe devem ter para poder absorver as inúmeras referências tecnológicas disponíveis atualmente e acompanhar o avanço da realidade virtual, já que o mundo é cada vez mais dinâmico e transdisciplinar. Norman (2010), trata do futuro do mundo com a evidente integração do design com a engenharia, e isso nos traz uma realidade em que a tecnologia será cada vez mais evidente e presente na vida das pessoas, e os designers devem estar preparados para se envolver com novas situações de trabalho. Ao integrar o design, a análise, a fabricação e a montagem de produtos com o auxílio de tecnologias digitais, acredita-se que designers, arquitetos, engenheiros e construtores têm a oportunidade de redefinir fundamentalmente as relações entre a concepção e a fabricação dos produtos.

É nesse momento que esse tipo de ferramenta de análise virtual pode torna-se um grande aliado do designer de produtos, uma vez que lhe dá a capacidade de transformar a informação técnica, antes dominada somente pelos engenheiros, em importantíssimos referenciais de cunho científico, auxiliando assim na criação de produtos cada vez mais adequados ao usuário. A análise virtual pode garantir a qualidade estrutural e dos materiais necessários para suportar todas as solicitações dos esforços (proporcionando aumento de desempenho), além de ser um facilitador para colocar em prova qualquer proposta que apresente características fora do padrão convencional estabelecido pelo mercado, ao explorar novos conceitos formais sob os critérios rigorosos da estética, podendo ainda inovar ao estabelecer referências para novos padrões. Para alguns especialistas, esse contexto é suficiente para formatar um conteúdo que se enquadraria como um “lançamento de tendências”.

A impressão 3D proporciona diversas experimentações para novas concepções de calçados, mas acredita-se que as soluções de conforto devem evoluir na mesma proporção do avanço estético. A prototipagem rápida é um promissor processo de produção em um futuro próximo, abrindo assim precedentes para as impressoras tridimensionais pessoais. É certo que em breve teremos uma ampla gama de impressoras surpreendentes e incomuns,

incluindo impressoras de concreto, impressoras de vidro, *bioprinters* e impressoras portáteis, ficando cada vez mais acessíveis, facilitando e implantando o ato de customização pessoal.

Com os resultados obtidos é possível confirmar que os objetivos da pesquisa foram alcançados, comprovando a eficácia da metodologia proposta para a criação de calçados, com o foco no projeto centrado na usuária de calçados femininos de salto alto, considerando características de calçados feitos sob medida, na busca de soluções para a obtenção de conforto. As análises demonstraram meios para baixar os picos de pressão pela adoção de palmilhas anatômicas, promovendo assim a melhoria da qualidade de vida das mulheres usuárias de salto alto.

Diminuir os picos de pressão, adequar a superfície de contato da palmilha com os biotipos dos pés dos usuários melhorando a estabilidade ao caminhar, além de prolongar seu tempo de uso sem restrições de conforto são as principais contribuições obtidas momentaneamente por este estudo, constatando-se a potencialidade de diversas outras aplicações para a melhoria de novos calçados, mais anatômicos, confortáveis, com melhor desempenho, de menor custo e ambientalmente amigáveis.

Muito mais do que uma discussão de engenharia de materiais e processos de fabricação, esta tese de doutorado, defendida no departamento de Design e Arquitetura da FAUUSP, Faculdade de Urbanismo e Arquitetura da Universidade de São Paulo, trata de uma abordagem transdisciplinar que permeia os saberes da ergonomia, biomecânica, baropodometria, bioengenharia, engenharia mecânica e fabricação digital, em benefício do design de calçados, oferecendo métodos e ferramentas para a evolução do setor calçadista, através da melhor adequação aos diversos biotipos dos pés dos consumidores, sendo estes os principais beneficiários.

O modelo de calçado desenvolvido ao término da pesquisa não tem intenção de ser um objeto de desejo, mas uma tentativa de estabelecer um parâmetro inicial para promissoras evoluções do calçado, considerando-o como um produto de extrema utilidade para o ser humano, seja pela função básica da proteção, seja pelo relacionamento com outras necessidades físicas,

sociais, psicológicas, e com as questões sobre o conforto, necessário para o bem-estar físico e mental, para a manutenção do equilíbrio da marcha, para uma melhor relação com a biomecânica do pé e todos os aspectos primordiais da saúde.

Não é um início, mas a confirmação de que há a constante necessidade de um acompanhamento da (re)evolução industrial por processos metódicos para uma produção industrial inteligente, que beneficie sempre o usuário, antes das questões comerciais. O método aqui proposto para o design de calçados apresenta e especifica particularidades que permitirão a adoção de novos modelos baseados na tecnologia digital, apresentando diversas vantagens em relação aos meios habitualmente utilizados: o calçado como um benefício à própria vida humana!

Referências

ABNT NBR 14836. **Calçados**, Determinação dinâmica da distribuição da pressão plantar. 2004.

BAXTER, Mike R. **Projeto de Produto**: Guia Prático para o Design de Novos Produtos. São Paulo: Blucher, 2000.

BERWANGER, Elenilton Gerson. **Antropometria do pé feminino em diferentes alturas de salto como fundamento para conforto de calçados**. Dissertação de Mestrado em Design e Tecnologia. UFRGS. 2011.

FILHO, Avelino Alves. **Elementos Finitos**. São Paulo: Érica, 2004.

NORMAN, Donald A., **O Design do Futuro**. Rio de Janeiro: Rocco, 2010.

PERRY, J. **Análise de Marcha**. Barueri, SP: Manole, v.1, 2005.

SILVA, José Augusto Marinho. **Design 3D e Moda**: Análise Dinâmica de Calçados por um Método da Engenharia Automotiva. In: 1o CIMODE - Congresso Internacional de Moda e Design. Universidade do Minho, 5 a 7 de set. 2012. Anais do 1o CIMODE. Guimarães, Portugal, 2012. P. 2197-2216.

_____. **(I)Limitado Mundo Virtual para o Design de Calçados**. In: 2o CIMODE - Congresso Internacional de Moda e Design. Politecnico di Milano, 5 a 7 de nov. 2014. Anais do 2o CIMODE. Milão, Itália, 2014. P. 109-128.

_____. **Ergo.Cyber.Shoes:** Bioengenharia para o Design de Calçados de Salto Alto. In: 3o CIMODE - Congresso Internacional de Moda e Design. Universidade de Buenos Aires, 9 a 12 de mai. 2016. Anais do 3o CIMODE. Buenos Aires, Argentina, 2016. P. 2154-2169.

_____. **A Moda tem Cura?** Biomecânica, Design, Calçados e Salto Alto: Ingredientes quase fatais. In: 11o Colóquio de Moda. Universidade Positivo, 2 a 5 de set. 2015. Anais do 11o Colóquio de Moda. Curitiba, Paraná, 2015. Disponível em <http://www.coloquiomoda.com.br/anais/anais/11-Coloquio-de-Moda_2015/COMUNICACAO-ORAL/CO-EIXO1-DESIGN/CO-1-A-MODA-TEM-CURA-b.pdf>.

_____. **Design, Engenharia Mecânica e Meio Ambiente para a Criação, Análise e Fabricação de Calçados e Jóias.** In: 6o Colóquio de Moda. Universidade Anhembi Morumbi, 12 a 15 de set. 2010. Anais do 6o Colóquio de Moda. São Paulo, SP, 2010. Disponível em <http://www.coloquiomoda.com.br/anais/anais/6-Coloquio-de-Moda_2010/71820_Design_-_Engenharia_Mecanica_e_Meio_Ambiente.pdf>.

VAN DER LINDEN, Júlio Carlos de Souza. **Um Modelo Descritivo da Percepção de Conforto e de Risco em Calçados Femininos.** Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, UFRGS, 2004.