



**Nicholas d'Orsi Metsavaht**

**Desenvolvimento de Palmilhas Ortopédicas para  
Indivíduos com Neuropatia Periférica Utilizando  
Microestruturas**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica  
da PUC-Rio

Orientador: Anderson Pereira

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2022



## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer meus pais, Leonardo e Leandra, por sempre me orientarem nas decisões que tomei e me apoiarem em todos os aspectos da vida.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Anderson Pereira por me orientar, mostrando um nicho de estudos no qual criei enorme interesse enquanto desenvolvia este projeto.

Agradeço ao Gustavo Leporace por também me apresentar o mundo que é o estudo do comportamento biomecânico.

E finalmente agradeço a Natalia Faro por me auxiliar a compreender e estudar todo o processo de criação de palmilhas ortopédicas.

## **Resumo**

### **Desenvolvimento de palmilhas ortopédicas para indivíduos com neuropatia periférica utilizando microestruturas.**

Palmilhas ortopédicas têm um nicho na indústria para seu desenvolvimento e fabricação, além de serem cruciais para a saúde de muitas pessoas que sofrem de neuropatia periférica. A impressão 3D tem ganhado maior acessibilidade devido ao barateamento de máquinas e matéria prima, dando acesso a um amplo público, não somente profissionais, mas também para amadores. Estes equipamentos têm a capacidade de criar peças que são muito difíceis de serem fabricadas através de métodos convencionais, tanto pela escala quanto pela complexidade, assim abrindo mais espaço para o uso de metamateriais na indústria, que tem a capacidade de adquirir características distintas de qualquer outro elemento natural utilizando microestruturas. No entanto, apesar da excelente aplicabilidade de prototipação da impressão 3D, é importante a validação destas pequenas estruturas com métodos computacionais de elementos finitos.

Este trabalho tem o objetivo de realizar uma revisão bibliográfica das metodologias de desenvolvimento, tanto palmilhas ortopédicas quanto de microestruturas para projetar palmilhas que atendam os requisitos de pacientes que sofrem de neuropatia periférica e criar uma função objetivo para a alocação de microestruturas para gerar a palmilha ideal para o paciente.

## **Palavras-chave**

Neuropatia periférica; diabetes; microestruturas; metamateriais; método de elementos finitos; manufatura aditiva; baropodometria;

## **Abstract**

### **Development of orthopedic insoles for individuals with peripheral neuropathy using microstructures.**

Orthopedic insoles have a niche in the industry for their development and manufacture, and they are crucial to the health of many people suffering from peripheral neuropathy. 3D printing has gained greater accessibility due to cheaper machines and raw materials, giving access to a wide audience, not only professionals, but also hobbyists. These printers can create parts that are very difficult to be manufactured using conventional methods, both due to scale and complexity, thus opening more space for the use of metamaterials in the industry, which can have characteristics that are different from any other natural element using microstructures. However, despite the excellent applicability of 3D printing prototyping, it is important to validate these small structures with finite element method.

This work aims to perform a bibliographic review of development methodologies, both orthopedic insoles and microstructures to design insoles that meet the requirements of patients suffering from peripheral neuropathy and create an objective function for the allocation of microstructures to generate the ideal insole for the patient.

## **Keywords**

Peripheral neuropathy; diabetes; microstructures; metamaterials; finite element method; additive manufacturing; baropodometric exam.

# Sumário

Lista de figuras	7
1 Introdução	9
1.1 Motivação	9
1.2 Objetivo	10
1.3 Revisão bibliográfica	10
1.4 Metodologia	12
1.5 Resultados esperados	12
2 Motivação	13
2.1 Consequências no Pé	13
2.2 Palmilhas Ortopédicas	14
2.3 Limitações	15
2.4 Manufatura aditiva	16
2.5 Aplicações na indústria de calçados	17
3 Metamateriais e Microestruturas	19
3.1 Fundamentos de Mecânica dos sólidos	20
3.2 Processo de concepção das microestruturas	24
3.3 Resultados das microestruturas geradas	26
3.4 Método de elementos finitos	30
4 Simulações e resultados	33
4.1 Função Objetivo	33
4.2 Algoritmos Genéticos (AG)	35
4.3 Resultados	36
5 Conclusão	41
5.1 Trabalhos futuros	41
6 Referências bibliográficas	42

## Lista de figuras

Figura 1: Aplicação de microestruturas para a fabricação de um brinquedo: (a) gráfico das propriedades de cada estrutura, (b) as geometrias de cada uma destas, separadas em famílias usando cores, (c) os modelos computacionais do brinquedo, utilizando um gradiente de cor para distinguir a rigidez e a simulação de sua porosidade, (d) o projeto final fabricado [8].	10
Figura 2: Palmilhas com densidades de preenchimento variadas [9].	11
Figura 3: Baropodometria de baixa resolução [5].	12
Figura 4: Sintomas de um pé de diabético (adaptado de [13]).	14
Figura 5: Avaliação biomecânica de um indivíduo recuperando de uma lesão de cruzado anterior no joelho realizando uma corrida. Imagem de autoria própria.	15
Figura 6: Da esquerda a direita, <i>Router</i> fabricando retirando material e um impressora 3D extrudando plástico através de CNC [17,18]	16
Figura 7: Tennis Adidas Futurecraft [23].	18
Figura 8: Maçaneta que utiliza microestruturas [28].	19
Figura 9: Plano de tensões de uma célula unitária 2D.	20
Figura 10: Exemplo das consequências do coeficiente de Poisson [29].	21
Figura 11: Madeira é um exemplo de material ortotrópico [30].	22
Figura 12: Processo de homogeneização de uma célula $l3$ agregada em um meio tem suas propriedades determinadas pelo seu conjunto [29].	24
Figura 13: Parte do código de construção das microestruturas.	25
Figura 14: Geração dos nós e a linha horizontal.	25
Figura 15: Aumento da espessura de uma viga.	25
Figura 16: Famílias de microestruturas geradas.	26
Figura 17: Gráficos que relacionam as três propriedades estudadas das microestruturas.	27
Figura 18: Gráficos que relacionam as três propriedades estudadas das microestruturas.	27

Figura 19: Gráficos que relacionam as três propriedades estudadas das microestruturas filtradas. ....	30
Figura 20: Exemplo básico de uma viga engastada dividida em 3 elementos com 4 nós. A matriz K é composta pelas matrizes de cada elemento, dividido em cores, com sobreposições [33]. ....	31
Figura 21: Em sequência, a malha definida, as seções divididas com suas respectivas cargas, as microestruturas alocadas e o resultado das deformações. ....	32
Figura 22: Palmilha ortopédica com sustento para arco feita de EVA e fibra de vidro.....	33
Figura 23: Exemplo de desabamento do arco do pé. Em azul as forças e momentos exercidos no pé, em verde o arco original e em vermelho o arco sob as cargas. Imagem de autoria própria. ....	34
Figura 24: Exemplo de palmilhas, a superior utilizou somente uma microestrutura "+ com ramos" de frações volumétrica 0.3 em toda malha, enquanto a inferior foi manualmente otimizada, com frações de $b_1 = 0.56$ , $b_2 = 0.52$ , $b_3 = 0.53$ , $b_4 = 0.57$ . ....	35
Figura 25: Microestruturas "X" .....	37
Figura 26: Microestruturas "Quadrado" .....	37
Figura 27: Microestruturas "Quadrado e X" .....	38
Figura 28: Microestruturas "Diamante com +" .....	38
Figura 29: Microestruturas "X com ramos" .....	39
Figura 30: Microestruturas "X com ramos" .....	39



# 1

## Introdução

### 1.1

#### Motivação

No Brasil, cerca de 13,4 milhões de pessoas têm diabetes [1]. Cerca de 50% deste grupo pode desenvolver neuropatia periférica [2], quando o indivíduo perde a sensibilidade das extremidades do corpo e consequentemente distribui as cargas pelo pé de maneira irregular, sem perceber, aumentando o risco do desenvolvimento de úlceras em pontos de estresse.

Existe uma constante demanda para o desenvolvimento e fabricação de calçados e palmilhas, pois elas precisam ser feitas sob medida para cada paciente. A maior parte dos profissionais utiliza métodos de fabricação artesanal com remoção de material, geralmente a partir de blocos homogêneos de poliuretano com revestimento com diferentes elementos como EVA, Latex, PORON®, Plastazote®, PS Shock, dentre outros. Empresas que imprimem palmilhas têm limitações, tanto pelo processo de manufatura, quanto pelo material ou espessura da palmilha [3].

Com o desenvolvimento de impressoras 3D abre-se um novo horizonte para fabricação de objetos [4]. Agora é possível construir estruturas complexas que seriam mais difíceis com outros métodos convencionais, com materiais de engenharia de alto padrão industrial e precisão. Uma das aplicações dessa tecnologia é o desenvolvimento de Metamateriais, que obtém suas propriedades a partir da combinação de microestruturas ao invés do elemento base que o constrói, como as três famílias de estruturas e suas propriedades na Figura 1, que obtém propriedades distintas devido a configuração das conexões de treliças e suas densidades, assim possibilitando a fabricação do armadilho de brinquedo com articulações flexíveis e membros rígidos utilizando somente um material.

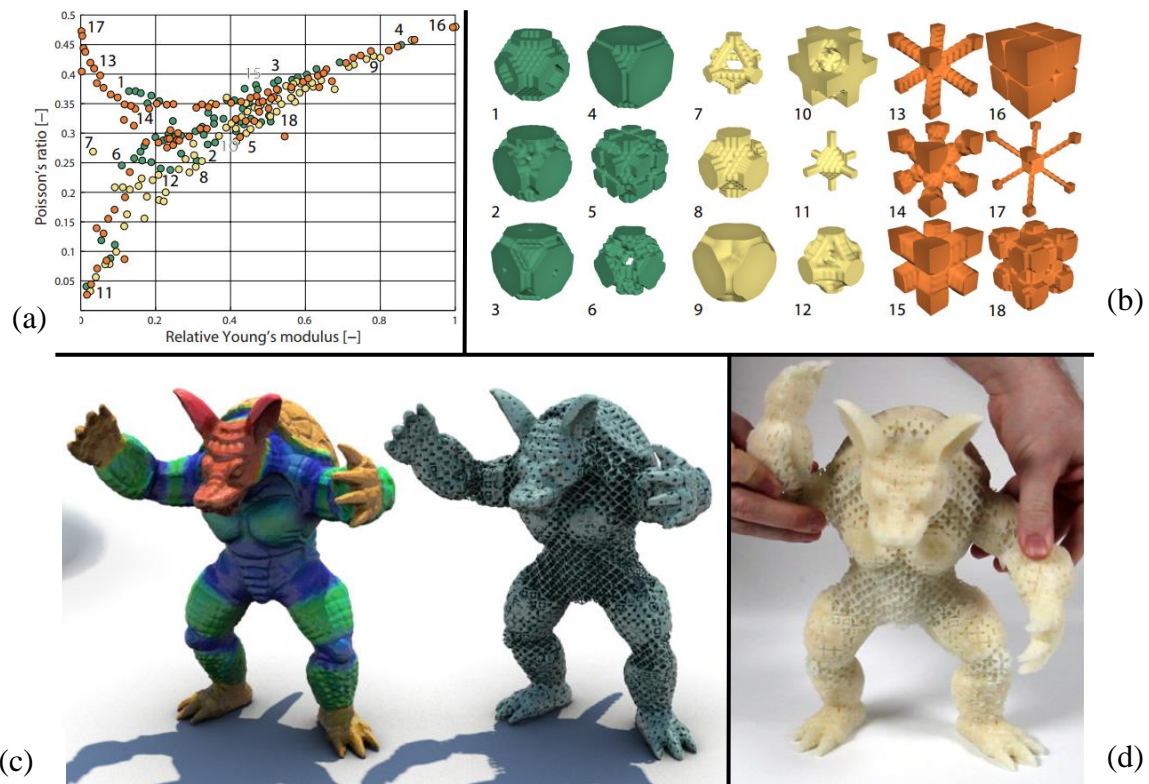


Figura 1: Aplicação de microestruturas para a fabricação de um brinquedo: (a) gráfico das propriedades de cada estrutura, (b) as geometrias de cada uma destas, separadas em famílias usando cores, (c) os modelos computacionais do brinquedo, utilizando um gradiente de cor para distinguir a rigidez e a simulação de sua porosidade, (d) o projeto final fabricado [8].

## 1.2

### Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um algoritmo que, a partir de um banco de dados com as propriedades de microestruturas, escolha o posicionamento dessas em uma palmilha a partir da baropodometria (ou Pedobarografia) - campo de distribuição de pressões no pé.

## 1.3

### Revisão bibliográfica

Collings et al. [5] realizaram uma revisão bibliográfica de como projetar uma palmilha e chegaram à conclusão que não existe um método específico, e sim o objetivo de maximizar a área de contato do pé e deixá-la macia o suficiente para gerar conforto sem afetar o desempenho.

Tang et al. [6] realizaram um estudo randomizado de dois anos a fim de comparar a distribuição de cargas com três tipos de palmilhas: uma pré-fabricada e outras duas de EVA de dureza Shore 35 A e 55 A assim como seus efeitos ao longo prazo.

Nouman et al. [7] compararam palmilhas com diferentes combinações de materiais com características conhecidas, colocando os indivíduos com neuropatia em testes dinâmicos padronizados com um dispositivo acoplado ao calçado para adquirir o mapa baropodográfico em cada instante.

No estudo de Schumacher et al. [8], foi proposto um método para desenvolver microestruturas utilizando otimização topológica com elasticidades determinadas, podendo assim criar dispositivos flexíveis com deformações prescritas precisas.

Chatzistergos et al. [9] realizaram um estudo visando otimizar a seleção de rigidez de palmilhas fabricadas em impressoras 3D para pacientes que sofrem de neuropatia periférica. Foram desenvolvidas seis palmilhas com densidades de treliças distintas, em seguida quinze indivíduos foram submetidos a testes dinâmicos com as mesmas e um dispositivo de Pedobarografia. Foi concluído que é possível determinar uma concentração de treliças com a firmeza ideal, apesar de no estudo a alocação de treliças com densidades distintas em locais específicos do pé não ser explorada.



Figura 2: Palmilhas com densidades de preenchimento variadas [9].

## 1.4

### Metodologia

O primeiro passo foi o desenvolvimento de famílias de microestruturas no MATLAB utilizando um código para manualmente criar as geometrias, variando a espessura das treliças e calculando suas propriedades, que foram armazenadas em um banco de dados.

A partir destas famílias, foi desenvolvido o algoritmo para escolher suas distribuições. Inicialmente foram casos simples bidimensionais para realizar testes utilizando elementos finitos, tendo como princípio de escolha um algoritmo que posiciona microestruturas mais macias onde há mais tensão, tendo como fator de simplificação a resolução das curvas isobáricas da Pedobarografia. Na Figura 3 é apresentado um destes exames em baixa resolução.

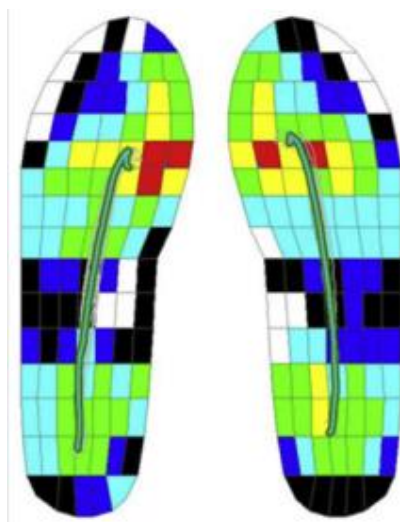


Figura 3: Baropodometria de baixa resolução [5].

## 1.5

### Resultados esperados

Espera-se desenvolver um algoritmo que gere uma palmilha a partir de microestruturas que seja compatível com o produto fabricado por profissionais da saúde, se assemelhando à combinação dos diversos materiais utilizados atualmente.

## 2

### **Motivação**

Neuropatia periférica é uma condição que afeta o sistema nervoso nas extremidades, que são todos os nervos fora do conjunto central - o cérebro e a medula espinhal. Pesquisadores acreditam que o isto ocorre com diabéticos devido ao nível elevado de açúcar no sangue, que danifica as paredes de vasos sanguíneos pequenos, reduzindo o suplemento de oxigênio e nutrientes aos nervos, fazendo a chamada doença microvascular. O indivíduo pode sofrer perdas sensoriais, motoras ou autonômicas em diferentes membros, o que dificulta a identificação dos sintomas iniciais, que variam desde falta de sensibilidade e problemas digestivos à dores incontroláveis. Diversas patologias, como obesidade, tabagismo, doenças no fígado, entre outras podem levar a esses sintomas, mas a diabetes é a doença que, por ser muito comum, causa o maior número de casos de neuropatia periférica [1].

Portanto, caso o paciente apresente sintomas, a maneira mais eficaz de tratar esta condição é através de acompanhamento periódico com um médico e hábitos preventivos, pois a neuropatia é uma condição irreversível.

#### **2.1**

##### **Consequências no Pé**

Os pés são uma estrutura de 26 ossos, 30 articulações e mais de 100 músculos, tendões e ligamentos que, em conjunto com o sistema nervoso, nos dão suporte, mobilidade e equilíbrio em atividades de carga e intensidade variada [12]. Porém, para que eles funcionem corretamente, o nosso sistema nervoso realiza correções a partir de um ciclo de realimentação com a resposta recebida pelos terminais nervosos na sola de nossos pés, assim como uma malha de controle direciona a asa de um avião. Logo, caso ocorra a perda de contato destes terminais nervosos, que de forma análoga seria quando a malha fechada do sistema perde o loop de feedback do erro, as correções não são feitas e as cargas são distribuídas de maneira irregular.

Como consequência, além do indivíduo perder parte de sua capacidade motora, a face de contato do pé com a área de apoio fica sujeita a cargas concentradas maiores do que a pele consegue sustentar. Desta forma, criam-se pequenas feridas conforme o indivíduo realiza atividades — sem ele perceber — que desenvolverão úlceras e infecções, caso não sejam acompanhadas ou tratadas preventivamente como descrito na Figura 4, que podem levar a amputação [13].

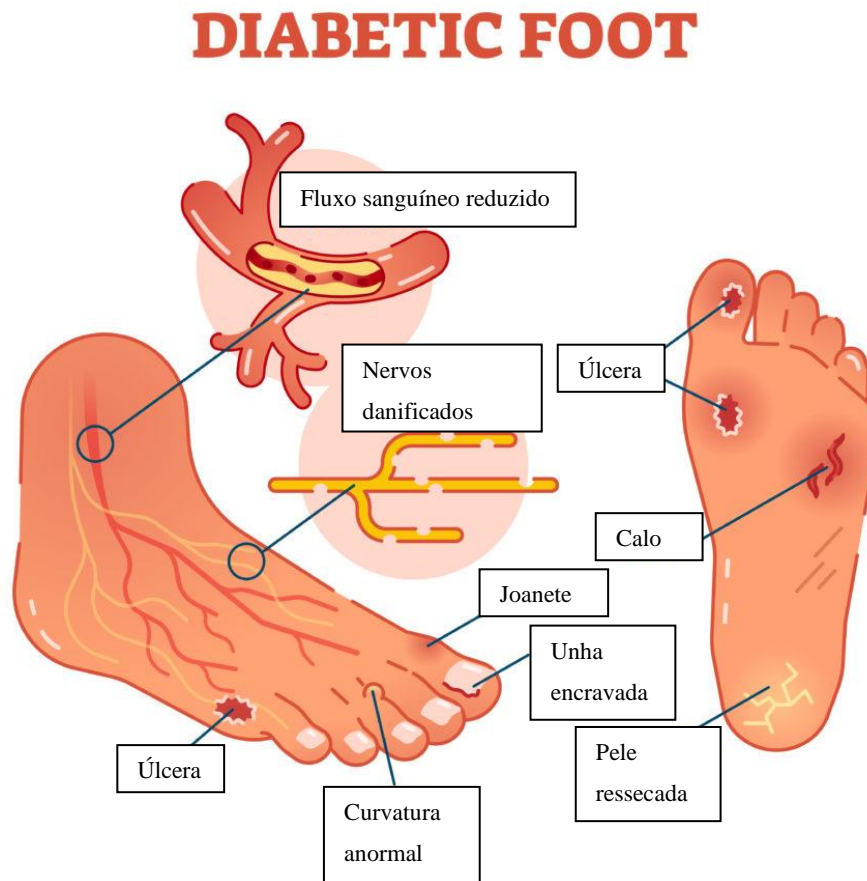


Figura 4: Sintomas de um pé de diabético (adaptado de [13]).

## 2.2

### Palmilhas Ortopédicas

Palmilhas ortopédicas são interfaces entre o pé e o calçado que, de maneira geral, tem o objetivo de maximizar o conforto. Para o caso de pacientes que sofrem de neuropatia periférica elas são projetadas para redistribuir as cargas irregulares no pé. Isto é alcançado alterando a geometria e materiais em locais específicos da palmilha, como por exemplo, posicionar materiais mais macios em locais com concentração de carga e pequenas elevações rígidas em locais com deficiência de apoio [7,9], entretanto esta metodologia é ainda bastante discutida pela comunidade

científica, como é discutido no artigo de Collings et al [5], mas, para casos mais gerais, o ideal é maximizar a área de contato da interface do pé a palmilha e escolher um material macio o suficiente, como Tang et al [6] concluíram.

Para isso, o indivíduo necessita realizar exames estáticos e dinâmicos de Pedobarografia a fim de auxiliar o profissional responsável pela confecção de sua palmilha. Existem dispositivos e softwares que adquirem dados em tempo real com diversas funcionalidades para a análise da fase de apoio, no entanto estes são protegidos por licenças e arquivos proprietários [14].

## 2.3

### Limitações

Apesar da baropodometria fornecer informações relevantes para a confecção de palmilhas, ela mostra somente uma face de um membro do corpo humano variando no tempo. Logo é somente uma parcela de um conjunto de diferentes análises que devem ser realizadas no comportamento motor completo do paciente.

Este exame desconsidera diversos graus de liberdade presentes na complexa cadeia de membros, que se complementam, para a realização das diversas atividades autônomas, observando somente a face de contato do pé.

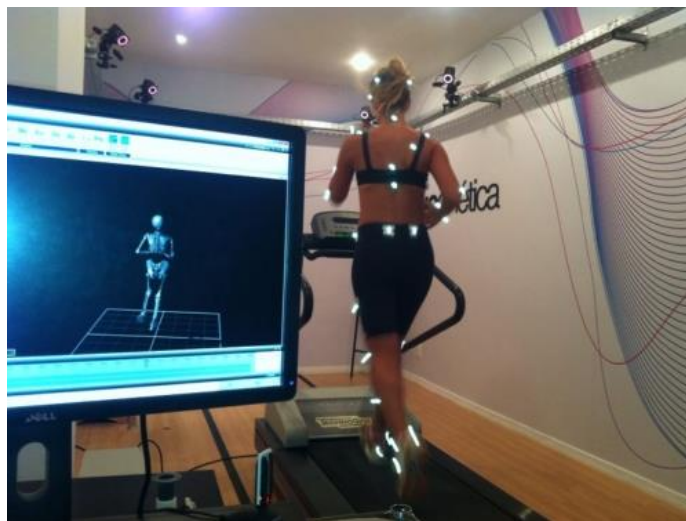


Figura 5: Avaliação biomecânica de um indivíduo recuperando de uma lesão de cruzado anterior no joelho realizando uma corrida. Imagem de autoria própria.

Portanto, para validar que as palmilhas confeccionadas estão impactando positivamente o indivíduo, é necessário realizar um estudo biomecânico *in vivo*, demonstrado na Figura 5, realizando diversas atividades para validar os quatro pilares da biomecânica: equilíbrio, mobilidade, força e conforto.



Atualmente, o setor que está liderando este tipo de pesquisa são os laboratórios de biomecânica que, através de diversos testes de mobilidade e força estáticos quanto dinâmicos, buscam compreender o comportamento do paciente como uma cadeia completa de sistemas complexos [15, 16].

## 2.4

### Manufatura aditiva

Manufatura aditiva, amplamente conhecida como impressão 3D, é um conceito de fabricação com o intuito de materializar objetos a partir de um modelo criado em software utilizando uma máquina que interprete Comandos Numéricos Computadorizados (CNC) para depositar material onde é requisitado, ao contrário demais processos de fabricação que retiram material até a peça ser esculpida por completo [17], este contraste é demonstrado na Figura 6.

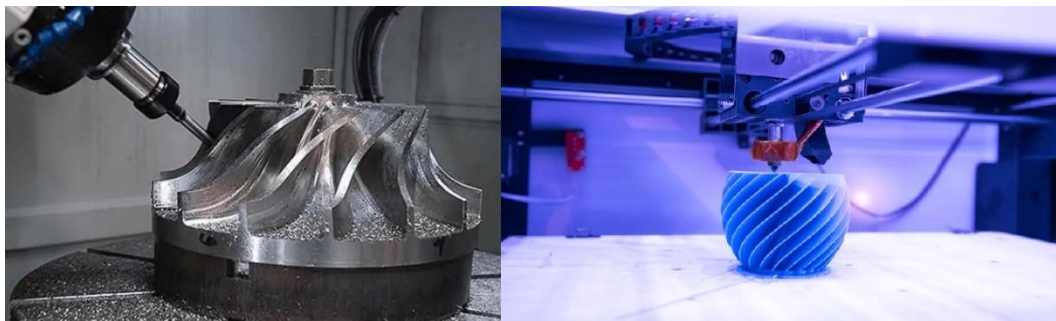


Figura 6: Da esquerda a direita, Router fabricando retirando material e um impressora 3D extrudando plástico através de CNC [17,18]

A manufatura aditiva foi idealizada por Charles Hull em 1983 que no ano seguinte patenteou a máquina de estereolitografia (SLA), onde um objeto é fabricado a partir da solidificação de um líquido ao ser exposto por luz ultravioleta em várias camadas que se sobrepõem [18].

Esta tecnologia ganhou bastante tração nas últimas décadas devido ao seu barateamento, redução de tamanho das máquinas e de tempo de fabricação, sendo a melhor opção para prototipagem e hobbies, com máquinas introdutórias custando em torno de dois mil reais (valor em 2022) [19], apesar de ser possível desenvolver peças para aplicações comerciais.

Hoje em dia, existem diversos métodos de manufatura aditiva: FDM (em inglês: *Fused Deposition Modeling*, em português: Modelagem por Fusão e Deposição), SLS (em inglês: *Selective Laser Sintering*, em português: Sintetização Seletiva a Laser), DLP (em inglês: *Digital Light Process*, em português: Processo de Luz Digital), DMLS (em inglês: *Direct Metal Laser Sintering*, em português:



Sinterização a Laser de Metal Direto), SLM (em inglês: *Selective Laser Melting*, em português: Derretimento Seletivo a Laser), EBM (em inglês: *Electron Beam Melting*, em português: Derretimento de Feixe de Elétrons), MJF (em inglês: Fusão em Múltiplos Jatos, em português: *Multi Jet Fusion*), entre outros. Cada método proporciona suas vantagens e desvantagens, como pode ser observado na Tabela 1, que foi desenvolvida por um especialista, William Guey, com mais de cinco anos de experiência neste setor industrial. Certos aspectos podem alterar dependendo do fabricante e modelo, mas em geral cada processo tem as características descritas abaixo [20].

<b>Tecnologia</b>	Velocidade	Precisão	Produtividade	Custo	Diversidade de materiais
<b>FDM</b>	Médio	Médio	Alto	Baixo	Alto
<b>SLA</b>	Alto	Alto	Alto	Médio	Médio
<b>DLP</b>	Baixo	Alto	Alto	Médio	Médio
<b>SLS</b>	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto
<b>DMLS</b>	Baixo	Médio	Baixo	Alto	Alto
<b>SLM</b>	Baixo	Médio	Baixo	Alto	Baixo
<b>EBM</b>	Médio	Alto	Médio	Alto	Baixo
<b>MJF</b>	Médio	Alto	Médio	Alto	Baixo
<b>PolyJet</b>	Médio	Alto	Médio	Alto	Alto

Tabela 1: Tabela qualitativa de métodos de impressão 3D [20].

## 2.5

### Aplicações na indústria de calçados

O interesse das empresas relacionadas à moda por impressão 3D sempre foi grande. A possibilidade de rápida prototipação, fabricação de artigos únicos e customizáveis para seus clientes agrega valor ao produto.

A multinacional Adidas está há dez anos desenvolvendo solas feitas por fabricação aditiva. Em 2014 mostrou seu primeiro protótipo em parceria com a empresa especializada Carbon e em 2017 colocou à venda um tênis, apresentado na Figura 7, no qual suas solas foram desenvolvidas para obter propriedades distintas em partes diferentes através do uso de treliças com diferentes densidades [21].

Inicialmente seria de produção limitada, porém devido ao sucesso até a data atual é possível adquirir o tênis com esta tecnologia em sua loja virtual [22].



Figura 7: Tênis Adidas Futurecraft [23].

Além de solas de calçados, outras empresas têm investido em palmilhas feitas sob medida fabricadas utilizando impressão 3D, como a Materialise [23], Fitstation [24], Orthoblastic [25] e Aetrex [26]. Todas mencionam os mesmos benefícios de versatilidade e individualidade das palmilhas, apesar de cada uma ter seus próprios métodos para adquirir dados dos pacientes e fabricar seus produtos.

A empresa Formlabs fornece um material flexível de dureza Shore 80 A [27], possibilitando a fabricação de palmilhas ortopédicas em impressoras 3D.

### 3

## Metamateriais e Microestruturas

Metamateriais são uma classe de materiais sintetizados artificialmente cujas propriedades são distintas de seu elemento base, tendo suas propriedades definidas majoritariamente pela geometria, arranjo e densidade de suas microestruturas. A princípio, estes foram desenvolvidos em 1968 pelo físico russo Victor Veselago para interferir com os campos eletromagnéticos, tendo o primeiro caso bem-sucedido no ano 2000 pelos pesquisadores da Universidade de Duke [27], no qual o item estudado teve seu índice de refração alterado para um valor negativo.

Portanto, com este conceito em mente, é possível obter uma gama de propriedades mecânicas utilizando um material base para fabricar um objeto/mecanismo, assim como grafite e diamante são essencialmente a mesma composição química, mas com arranjos de átomos distintos. No caso da Figura 8 uma maçaneta composta por sete microestruturas que realizam esforços distintos dependendo do local e magnitude da carga, possui um comportamento previsível.

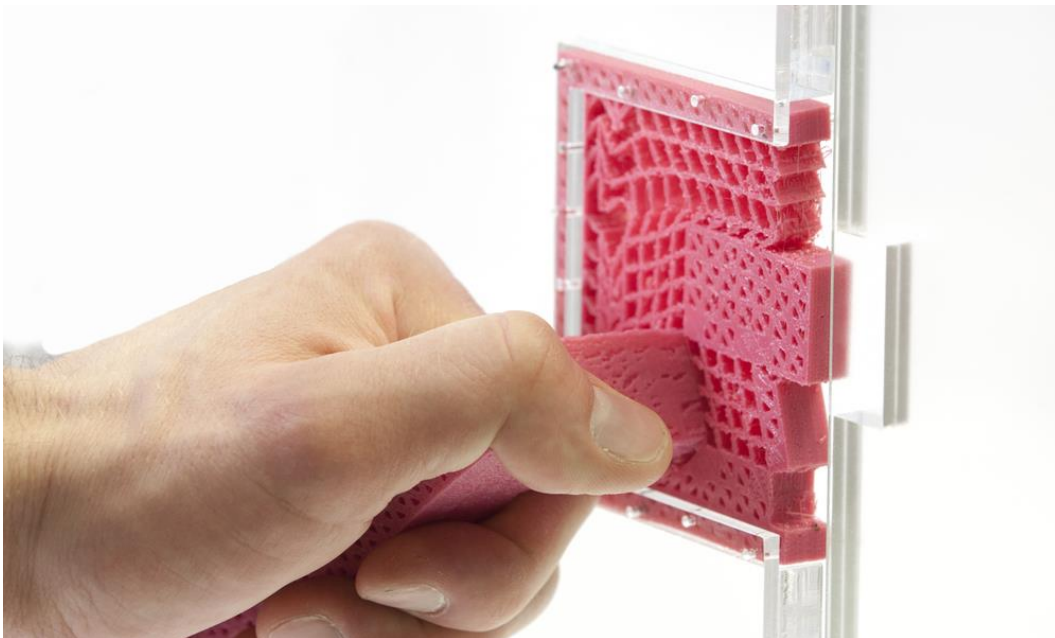


Figura 8: Maçaneta que utiliza microestruturas [28].

Uma maneira de determinar as propriedades de microestruturas é utilizando a teoria da homogeneização, bastante aplicada em materiais compósitos, que

determina as características a partir da repetição padronizada de elementos heterogêneos, agregando-as. Esta teoria foi desenvolvida para reduzir o custo computacional para realização de cálculos, mas mantendo um nível aceitável de precisão [28].

### 3.1

#### Fundamentos de Mecânica dos sólidos

No estudo da Mecânica dos Sólidos, a teoria da elasticidade é usada para modelar o comportamento de materiais cuja resposta depende apenas do estado atual de deformação.

A elasticidade linear é uma aplicação específica que relaciona a força e deformação pela Lei de Hooke unidimensional através de uma mola ideal de rigidez  $K$  unidades de força por unidades de deslocamento.

$$F = K \Delta x \quad (1)$$

Este conceito é levado para o caso unidimensional mais aprofundado de um material que se deforma elasticamente uma quantidade  $\epsilon$  relativa ao seu comprimento, com uma constante  $E$ , conhecida como o módulo de Young, em relação a tensão aplicada  $\sigma$ .

$$\sigma = E\epsilon \quad (2)$$

Entretanto, um material real tem três dimensões e nove graus de liberdade, diferente de uma mola ideal, logo é necessário organizar matematicamente suas informações em um objeto de maneira, neste caso uma matriz, que relaciona todas as tensões com as deformações, chamado de tensor de rigidez, que representa um pequeno elemento. Neste projeto o material foi simplificado para o caso bidimensional, com duas dimensões e três graus de liberdade. As equações 3 e 4 são geralmente simplificadas para a equação 5, onde o “til” representa matrizes ou vetores.

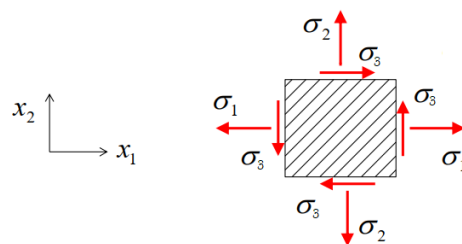


Figura 9: Plano de tensões de uma célula unitária 2D.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E & -\frac{E}{\nu} & 0 \\ -\frac{E}{\nu} & E & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma} = \tilde{C} \tilde{\epsilon} \quad (5)$$

Todos os materiais reais têm uma restrição interna. Eles devem obedecer a lei de conservação de massa, fazendo com que ele sofra deformações nos eixos perpendiculares ao alongamento. Ao mesmo que ele estica ou comprime em uma direção, ele deve ceder material para esta ação, exemplificado na Figura 10, o que leva a utilização do coeficiente de Poisson  $\nu$ , que varia para cada material e pode ter valores negativos, como no caso dos materiais auxéticos, que ao mesmo tempo que esticam em uma direção, eles se expandem nas perpendiculares [29].

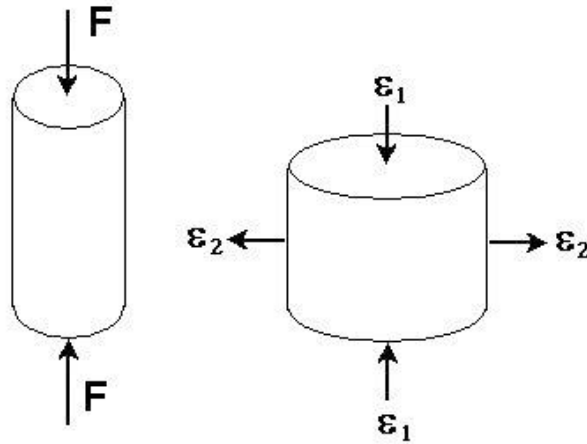


Figura 10: Exemplo das consequências do coeficiente de Poisson [29].

Um conceito importante de ter em mente é a relação entre rigidez e flexibilidade. Estas duas definições são opostas: enquanto o material mais rígido é aquele que se deforma pouco dada uma tensão aplicada, o material flexível é o que se deforma mais com a mesma carga. Este conceito é levado para mecânica a fim de diferenciar as relações de tensão e deformação. Os fenômenos de tensão e

deformação podem ser relacionados utilizando os tensores  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{S}$ , que são respectivamente de rigidez e flexibilidade.

$$\tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\mathbf{C}}^{-1} \quad (6)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\epsilon}} = \tilde{\mathbf{S}} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Portanto, é de interesse deste projeto poder determinar as características de cada microestrutura computacionalmente para que as mesmas possam ser comparadas com um nível aceitável de precisão. Uma hipótese válida para facilitar o cálculo destas propriedades é considerar o comportamento das estruturas como ortotrópicas [30].

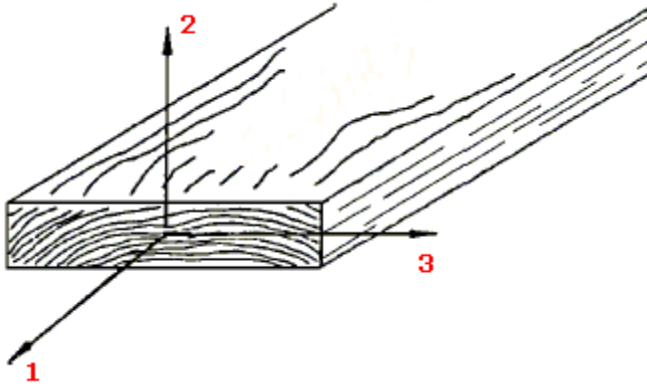


Figura 11: Madeira é um exemplo de material ortotrópico [30].

O material ortotrópico, diferente do isotrópico, não tem apenas um par de propriedades que o define ( $E$  e  $\nu$ ), mas um conjunto destes para cada eixo de orientação. Um exemplo clássico deste tipo de elemento é a madeira, que utiliza longas fibras, um material extremamente rígido, em conjunto com uma matriz de resina para obter um novo material que combina as duas propriedades, no entanto apenas o eixo paralelo às fibras possui as características desejadas, enquanto as outras duas são geralmente mais suscetíveis a deformações, logo cada eixo de atuação terá características distintas.

De acordo com a literatura [10], o tensor deste tipo de material pode ser derivado do isotrópico com pequenas modificações a fim de distinguir cada propriedade pertencente a cada eixo.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Neste tensor  $E_{ii}$  corresponde ao módulo de elasticidade na direção  $x_i$ ,  $\nu_{ij}$  corresponde ao coeficiente de Poisson do eixo  $x_i$  em relação a  $x_j$  e  $G_{12}$  é o módulo de elasticidade para o cisalhamento. Neste trabalho o tensor foi reduzido para o caso bidimensional e assumindo a simetrias das equações (10) e (11), que serão expostas na parte de concepção, das estruturas para conter um custo computacional baixo ao realizar as simulações.

$$-\frac{\nu_{21}}{E_{22}} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} \quad (10)$$

$$E_{22} = E_{11} \quad (11)$$

Ademais, é necessário definir um método para determinar os tensores mencionados anteriormente para calcular as propriedades. É possível determiná-las para cada estrutura realizando diversos cálculos locais de cada membro da estrutura. No entanto este método é extremamente custoso, logo foi escolhido a metodologia de homogeneização.

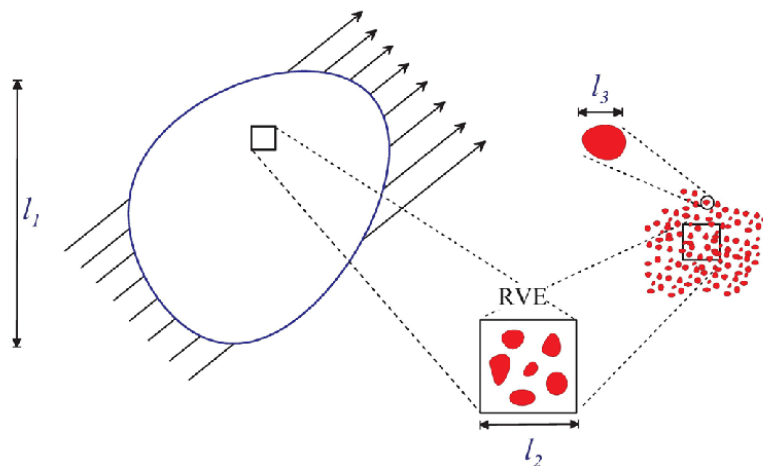


Figura 12: Processo de homogeneização de uma célula  $l_3$  agregada em um meio tem suas propriedades determinadas pelo seu conjunto [29].

O equacionamento deste método é complexo e que requer um conhecimento mais aprofundado de mecânica dos sólidos, além de outros conceitos mais abstratos, entretanto seu conceito é simples e o método de aplicação computacional foi implementado por Andreassen et al. [10] em MATLAB [11] através de um algoritmo de baixo custo computacional para obter numericamente a matriz do tensor de rigidez de uma microestrutura.

O intuito da homogeneização é determinar as características de um material heterogêneo repetindo-o periodicamente até que, em uma certa escala macroscópica, seja criado um material homogeneizado, reduzindo a complexidade do problema e custos computacionais pelas propriedades serem agregadas. Este método foi utilizado por Schumacher et al. [8] para determinar as propriedades de suas microestruturas.

No entanto, tem suas limitações, pois o resultado é a interação de um conjunto de células iguais, então o resultado sempre terá uma divergência de um caso real, especialmente se houver interações com estruturas distintas.

### 3.2

#### Processo de concepção das microestruturas

Uma rotina em MATLAB de autoria própria em conjunto com o orientador deste trabalho, Professor Anderson Pereira, baseado no projeto no qual teve participação, Polytop [31], foi desenvolvida para gerar as estruturas utilizando geometrias básicas.



Inicialmente é gerada uma malha de elementos finitos de resolução N por N, logo são escolhidas as coordenadas de pontos que serão referência para gerar linhas que constituirão as microestruturas.

```
Name = 'X'; % nome da microestrutura
NODE = [0,0; 1,0; 1,1; 0,1]; % localização dos nós no plano cartesiano
ELEMENT = [1,3; 2,4]; % nós selecionados para serem conectados
```

Figura 13: Parte do código de construção das microestruturas.

Na sequência de imagens da Figura 14 demonstra como é feita a microestrutura com forma de uma barra horizontal em uma malha 15 por 15.

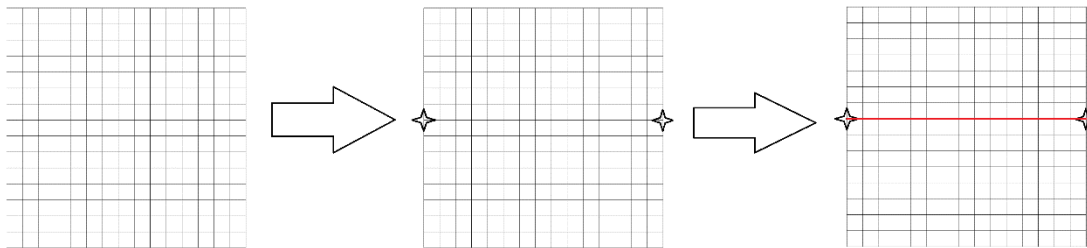


Figura 14: Geração dos nós e a linha horizontal.

Com a geometria da estrutura definida, as linhas adquirem uma espessura para obter um material sólido. As linhas estabelecidas no passo anterior servem como referência do centro das vigas que compõem a estrutura.

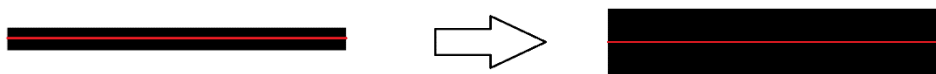


Figura 15: Aumento da espessura de uma viga.

Em seguida inicia-se o processo de cálculo do tensor de elasticidade da microestrutura utilizando o método de homogeneização mencionado anteriormente, assim como a fração de volume dela, que é simplesmente determinada contando quantas células estão preenchidas com material do total.

Para este trabalho foram geradas quatorze microestruturas ortotrópicas, todas na mesma resolução de 200 por 200 elementos. Essencialmente, existem quatro estruturas base, nas quais são combinadas ou tem uma pequena modificação para

gerarem outras. A Figura 16 mostra quais foram desenvolvidas. A viga horizontal foi criada para a verificação de resultados.

Para cada uma o autor criou uma rotina para aumentar a espessura das linhas iterativamente até a densidade relativa do material chegar a um, equivalente a uma microestrutura totalmente preenchida com o material base, assim a minha única rotina de código criou uma família para cada estrutura.

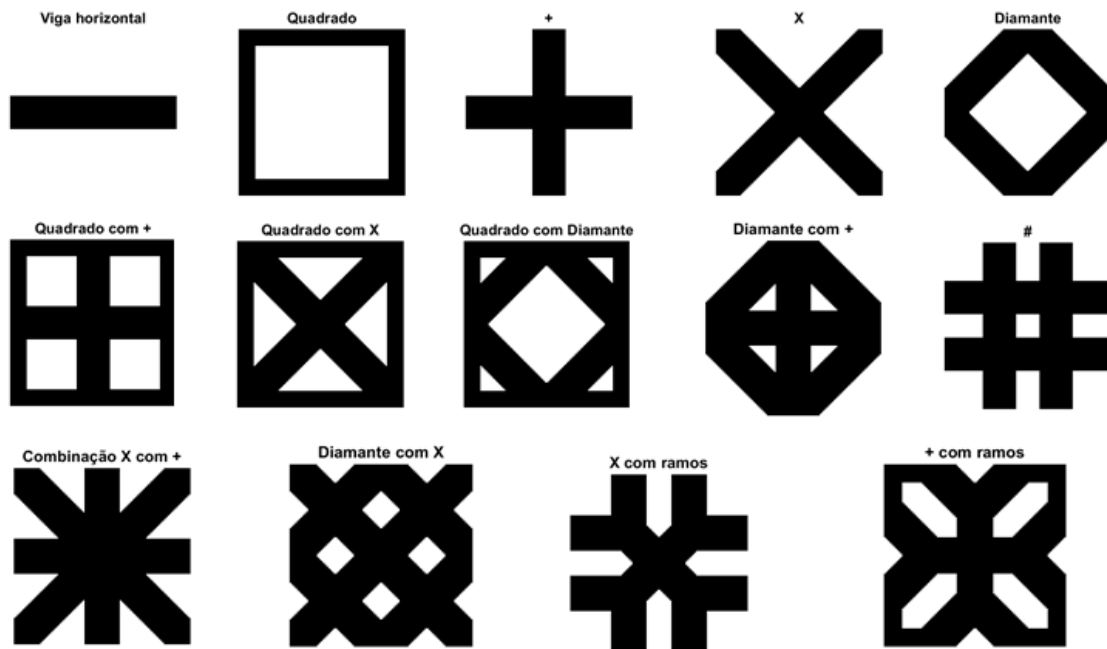


Figura 16: Famílias de microestruturas geradas.

### 3.3

#### Resultados das microestruturas geradas

As propriedades foram calculadas e representadas graficamente utilizando o MATLAB. As propriedades escolhidas para o material base foram  $E = 1 \text{ MPa}$  e  $\nu = 0.3$ . Estes atributos foram escolhidos de forma arbitrária, pois podem ser facilmente modificados em código para simular materiais específicos com propriedades conhecidas.

Com as estruturas criadas em um banco de dados, foram gerados gráficos similares ao do estudo de Schumacher et al. [8] para comparar e verificar as propriedades de cada uma. Na Figura 17 encontram-se três gráficos para a comparação das três propriedades essenciais para análise: fração de volume ( $\forall$ ) referido também como densidade relativa, elasticidade no eixo  $x_1$  ( $E_1$ ) e o coeficiente de Poisson perpendicular ao eixo  $x_1$  ( $\nu_{12}$ ).

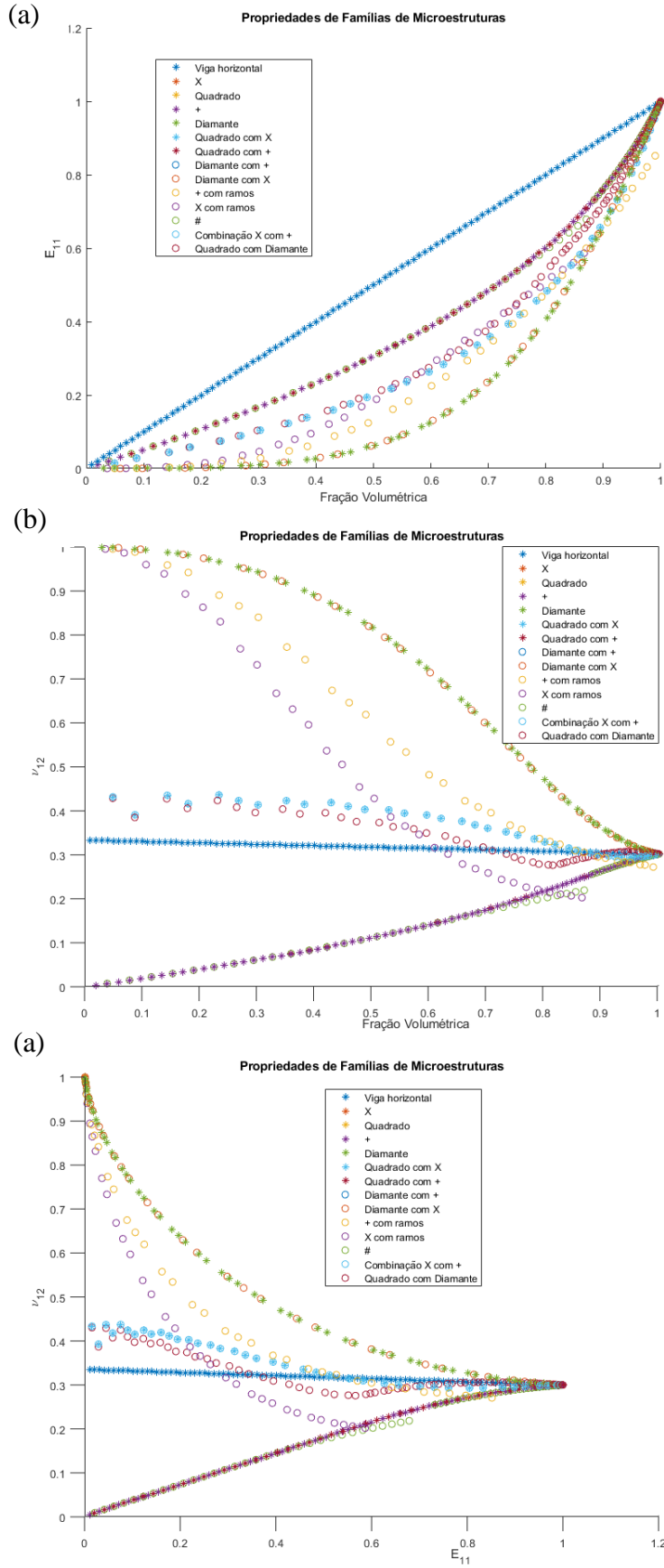


Figura 17: Gráficos que relacionam as três propriedades estudadas das microestruturas.

Na Figura 17 (a) observa-se que o coeficiente de elasticidade no eixo 1 das famílias de microestruturas é diretamente proporcional à densidade relativa, no entanto para cada família a proporcionalidade é diferente. A relação entre o coeficiente de elasticidade e a densidade é linear para a viga horizontal, mas a “diamante” é quase exponencial, tendo as demais como intermediárias entre estas. Portanto dada uma restrição de densidade, por exemplo, é possível escolher a estrutura ideal para cada aplicação, como ter uma rigidez ou coeficiente de Poisson específico menor do que do elemento base, uma vez que esta propriedade dita o quanto o material se deformará nas direções ortogonais à aplicação da carga. Esta é a gama de propriedades que se espera obter com microestruturas para ter uma versatilidade na fabricação de objetos.

Outro aspecto que se pode observar é que existem microestruturas com propriedades redundantes: “Quadrado”, “+”, “#” e “Quadrado com +”; “X”, “Diamante” e “Diamante com X”; “Quadrado com diamante” e “Diamante com +”.

Este resultado era esperado, pois cada grupo de famílias é basicamente uma mesma estrutura, apenas mais concentrada, como demonstrado na Figura 18. Por exemplo, as estruturas “Quadrado com +”, “Quadrado” e “+”, são essencialmente a

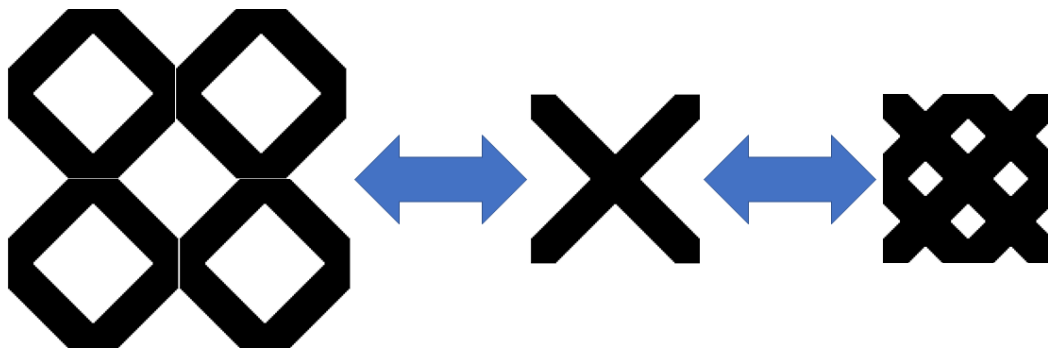
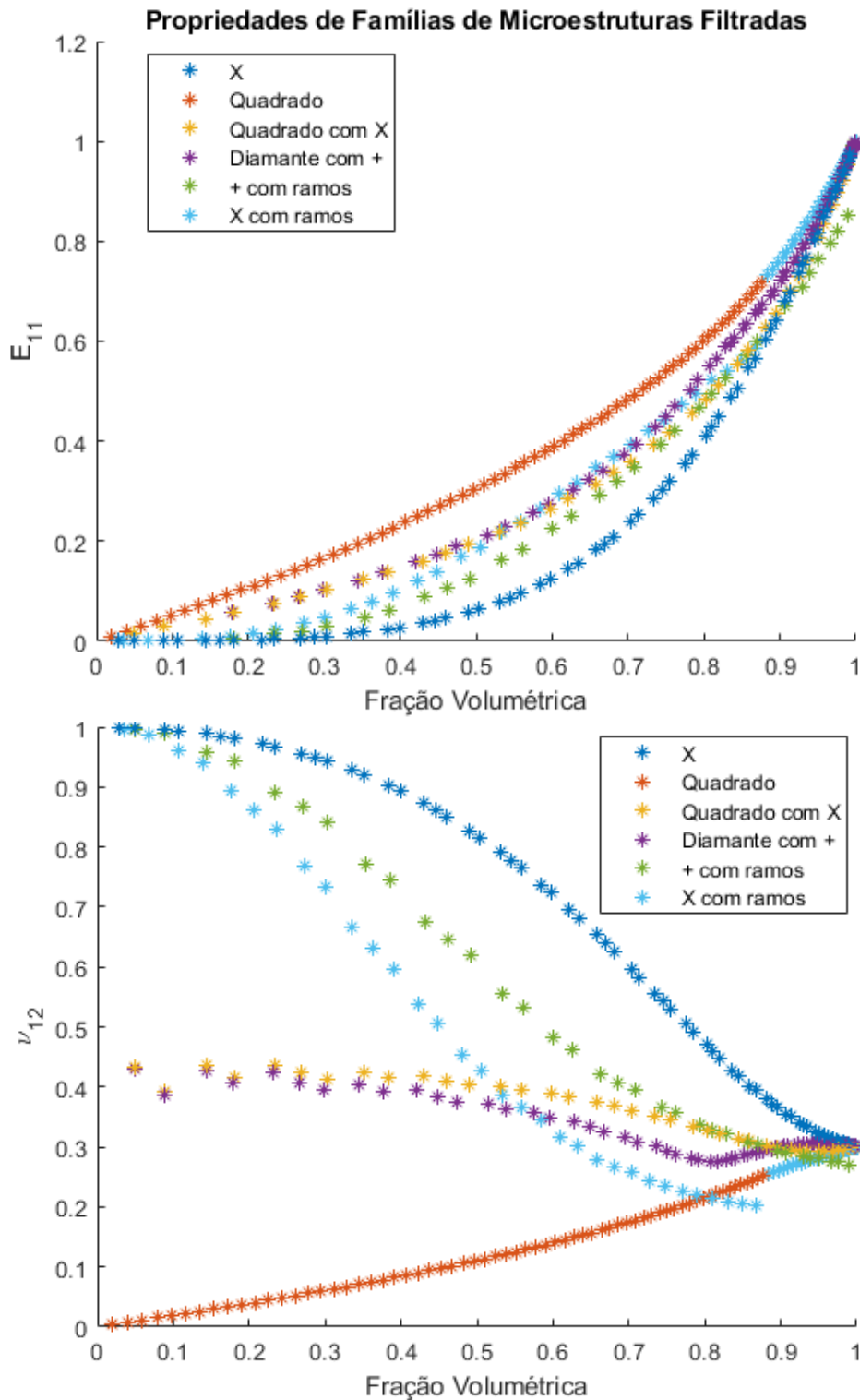


Figura 18: Similaridades das estruturas “Diamante”, “X” e “Diamante com X”.

mesma estrutura em concentrações diferentes. Esses resultados pelo método de homogeneização são consistentes com o esperado para essas microestruturas.

Para a validação dos resultados pode-se ver que a estrutura mais básica, a viga horizontal, tem seu comportamento calculado como era de se esperar, com o módulo de elasticidade aumentando linearmente junto com a densidade.

Filtrando as famílias redundantes, obtemos os seguintes gráficos da Figura 19:



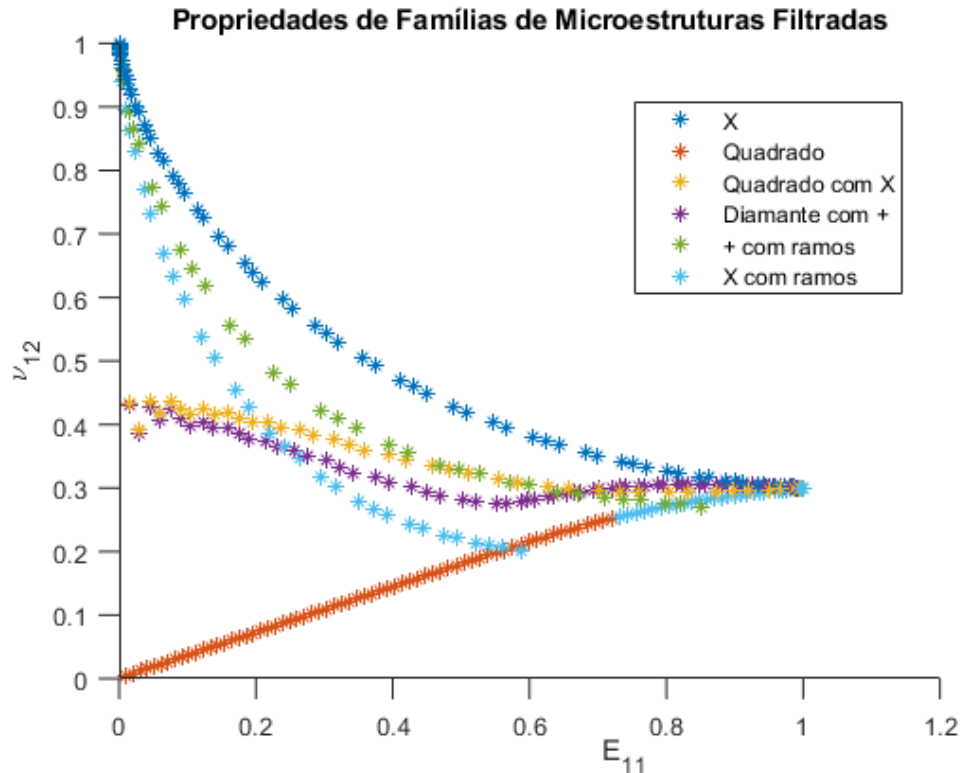


Figura 19: Gráficos que relacionam as três propriedades estudadas das microestruturas filtradas.

### 3.4

#### Método de elementos finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma maneira de determinar o comportamento de fenômenos complexos numericamente. Ao contrário da metodologia analítica, na qual é determina soluções exatas através de formulações matemáticas, ele aborda o problema complexo resolvendo equações diferenciais a partir da discretização do domínio em partes chamadas elementos finitos, subdividindo um espaço em vários pequenos elementos [32].

A Figura 20 demonstra um exemplo básico de uma viga engastada, onde cada elemento é definido matematicamente como uma matriz que contém suas propriedades, que para o caso de mecânica dos sólidos, relacionam tensão e deformação, como foi discutido no Capítulo 3.1, e estes são conectados por pontos nodais, que tem como propósito impor a lei de continuidade e apresentar os resultados.

Este problema é resolvível devido a restrição mencionada anteriormente, onde um ponto nodal com dois ou mais elementos em comum deve se deslocar a mesma quantidade em relação a todos os elementos, e as condições de contorno,

como o elemento 1 estar engastado. Na Figura 20 é também apresentada a matriz “K” de N por N graus de liberdade que representa o comportamento global da viga, que é formada pelas matrizes de cada elemento com sobreposições consecuentes dos nós [33].

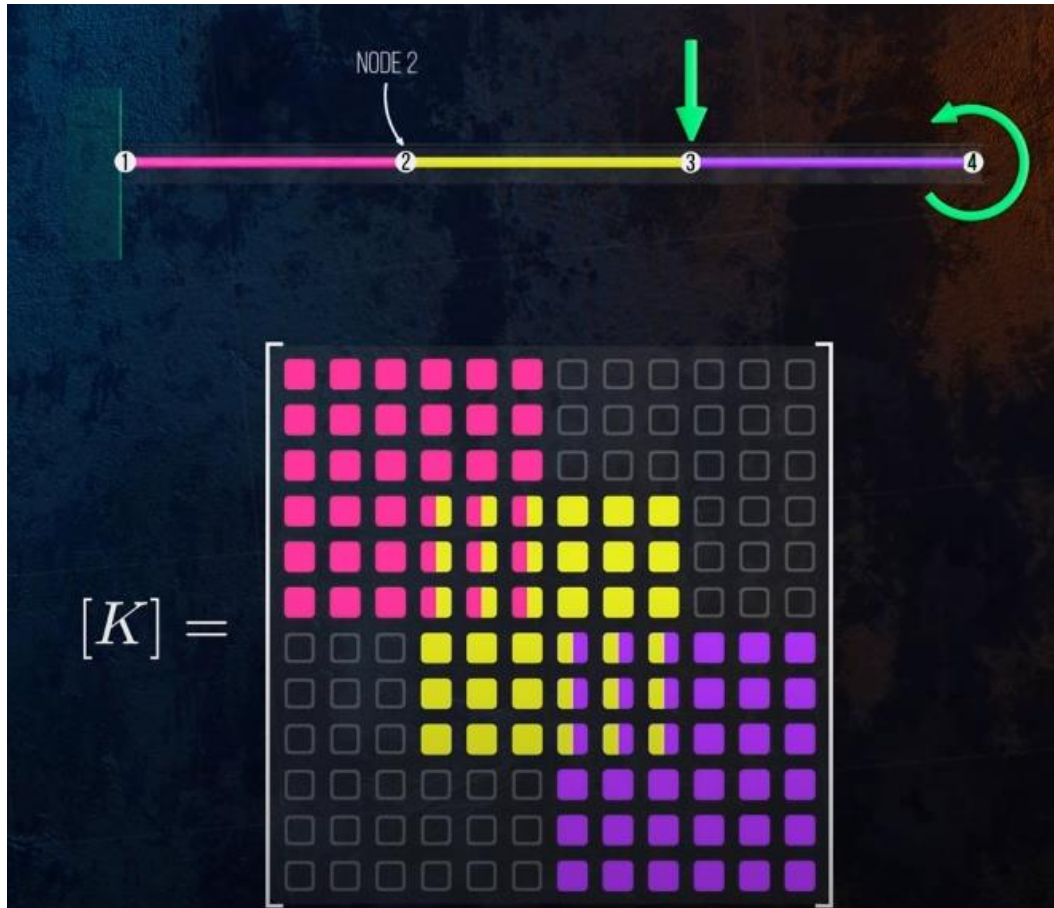


Figura 20: Exemplo básico de uma viga engastada dividida em 3 elementos com 4 nós. A matriz K é composta pelas matrizes de cada elemento, dividido em cores, com sobreposições [33].

Na análise quasi-estática de estruturas, que é o caso deste trabalho, procura-se encontrar o campo de deslocamento que satisfaz o equilíbrio. Existem três fases para este método: o pré-processamento, as simulações e o pós-processamento.

O pré-processamento é o estágio em que o domínio e a malha são criados junto com as condições de contorno, como as posições, orientações e magnitudes das forças aplicadas, os tipos de apoio, como o engastado ou simples móvel, onde o deslocamento em pelo menos um eixo é zero e as propriedades da microestrutura que deseja ser estudada.

Neste projeto foi desenvolvida uma malha para simular uma palmilha para um pé de tamanho 43 (padrão brasileiro), ela consiste em 490 elementos, 70 horizontais por 7 verticais, para simular o comportamento de uma palmilha vista

lateralmente, com cargas variadas aplicadas na parte superior e engastada na face inferior. Este processo é demonstrado na Figura 21.

A malha foi dividida em quatro seções, cada uma para representar qualitativamente um apoio de um pé humano com suas respectivas cargas aplicadas ( $p_1 = 1\text{ N}$ ,  $p_2 = 3.5\text{ N}$ ,  $p_3 = 0.5\text{ N}$  e  $p_4 = 5\text{ N}$ ). Dividindo em seções também ajuda a reduzir o custo computacional para as simulações, pois cada seção receberá somente uma microestrutura de cada família.

Com a malha definida, as microestruturas são alocadas para preencher cada área dividida, limitando a somente uma família por simulações.

O próximo estágio é a simulação dos deslocamentos em cada elemento, calculando também a média total, seu desvio padrão, o coeficiente de variação e a flexibilidade total da palmilha, parâmetros estes serão explicados no próximo capítulo. As figuras seguintes foram geradas a partir da mesma simulação, na qual todas as regiões foram preenchidas com a mesma microestrutura “X” e fração volumétrica constante.

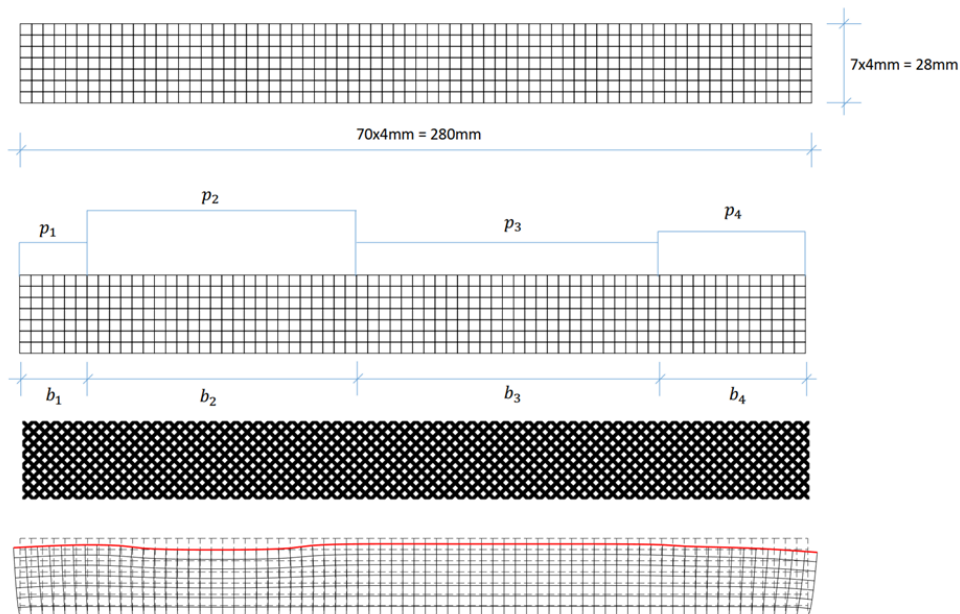


Figura 21: Em sequência, a malha definida, as seções divididas com suas respectivas cargas, as microestruturas alocadas e o resultado das deformações.

Logo a última fase é o pós processamento, no qual as informações dos pontos nodais são extraídas e utilizadas para realizar cálculos secundários ou serem expostas de maneira mais palpável através de gráficos.



## 4

### Simulações e resultados

#### 4.1

##### Função Objetivo

Como discutido nos trabalhos de Tang et al. [6] e Collings et al. [5] um objetivo válido na criação de uma palmilha para pessoas que sofrem de neuropatia periférica é maximizar a área de contato da interface do pé, mantendo sua forma original, e utilizar materiais com rigidez 35 e 55 Shore A.

Um exemplo de mantimento da configuração original é o arco do pé, que é crucial para dar sustentação ao tornozelo e distribuir as cargas entre o calcâneo e o metatarso, que ficam na sua base. No entanto, alguns indivíduos sofrem de uma condição chamada de “pé plano”, que ao aplicar cargas, o seu arco desaba, tanto por falta de força quanto pela total perda de contato neurológico dos músculos, o que leva a distribuição desequilibrada de tensões ao longo do pé e causando uma torção no tornozelo. A Figura 23 ilustra este fenômeno. A linha em verde é o arco natural que deveria ser mantido, já a vermelha é a consequente das cargas aplicadas no pé.

Portanto, é importante o desenvolvimento de uma palmilha que dê sustentação a este arco, como a da Figura 22, e ao mesmo tempo tenha uma maciez para o conforto e segurança ao usuário, pois esta área do pé é a que tem a pele menos preparada para impactos ou sustento.



Figura 22: Palmilha ortopédica com sustento para arco feita de EVA e fibra de vidro.



Figura 23: Exemplo de desabamento do arco do pé. Em azul as forças e momentos exercidos no pé, em verde o arco original e em vermelho o arco sob as cargas. Imagem de autoria própria.

Logo é válido otimizar a palmilha para que não haja uma variação significativa nas deformações das seções, preservando a forma original e deformando uniformemente.

Então, por mais desnivelado que seja o apoio do pé do indivíduo, a palmilha deve maximizar a distribuição regular destas cargas, ou seja, minimizar o coeficiente de variação, que é valor absoluto do desvio padrão, e deixar todas as deformações o mais próximas da média. Na figura 24 é possível observar a diferença entre as duas malhas, uma que foi mal otimizada comparada a uma com cargas bem distribuídas.

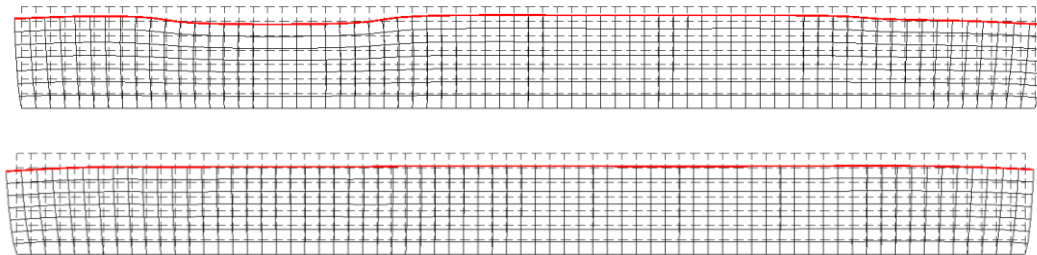


Figura 24: Exemplo de palmilhas, a superior utilizou somente uma microestrutura "+ com ramos" de frações volumétrica 0.3 em toda malha, enquanto a inferior foi manualmente otimizada, com frações de  $b_1 = 0.56, b_2 = 0.52, b_3 = 0.53, b_4 = 0.57$ .

## 4.2

### Algoritmos Genéticos (AG)

AG é uma simulação de seleção natural que pode ser utilizada para resolver diversos problemas de otimização, incluindo os que possuem máximos ou mínimos locais e globais. Ele é baseado na teoria evolutiva, onde uma população de indivíduos, que no caso da computação são conjuntos de dados, tentam sobreviver para procriar uma futura geração. O que define se uma parcela destes indivíduos procriará é uma função objetivo, aonde os que chegaram o mais próximo do resultado ótimo, ou seja, mais bem adaptados, têm filhos que adquirem características de seus pais, que é a repartição pseudoaleatória de atributos, e possivelmente uma mutação, para diversificar os resultados e evitar a concentração e resultados em máximos locais.

O software MATLAB tem disponível para usuários acadêmicos e inscritos a "Global Optimization Toolbox" que provê diversas funções, incluindo uma de algoritmos genéticos, para a determinação de soluções globais de problemas complexos, que podem conter mais de uma solução.

Foram definidas duas restrições e condições de contorno para este projeto. Primeiramente é necessário material totalmente preenchido (sólido) nas camadas

superiores e inferiores da palmilha para que, no caso de implementação real, a rugosidade do material não cause desgaste desnecessário dela e que a porosidade da superfície não machuque os pés do indivíduo.

A outra restrição é definir os limites inferior e superior da fração volumétrica do material para 0.3 e 0.7 a fim de recriar as limitações de resolução e precisão das impressoras 3D disponíveis.

### 4.3

#### Resultados

Ao longo deste trabalho foram feitas diversas simulações a fim otimizar a configuração das palmilhas. A Tabela 2 mostra os resultados numéricos e em seguida as Figuras 25 a 30 mostram as respectivas estruturas com suas deformações, onde os quadrados cinza descontínuos são os elementos em sua forma original, a linha vermelha é o deslocamento na superfície causado pelas tensões e a malha com linhas contínuas são os elementos deslocados.

Estruturas	Frações Volumétricas				Deslocamento		
	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
"X"	0.68	0.6	0.6	0.67	-82.884	5.58	-0.067
"Quadrado"	0.31	0.31	0.31	0.31	-122.185	0.284	-0.002
"Quadrado e X"	0.46	0.43	0.43	0.46	-110.708	2.87	-0.026
"Diamante de +"	0.54	0.51	0.51	0.54	-88.148	2.182	-0.025
"+ com ramos"	0.66	0.63	0.63	0.66	-70.289	2.269	-0.032
"X com ramos"	0.68	0.66	0.66	0.68	-60.573	0.988	-0.016

Tabela 2: Tabela de resultados de simulações otimizadas para cada família de microestruturas.



Figura 25: Microestruturas "X"

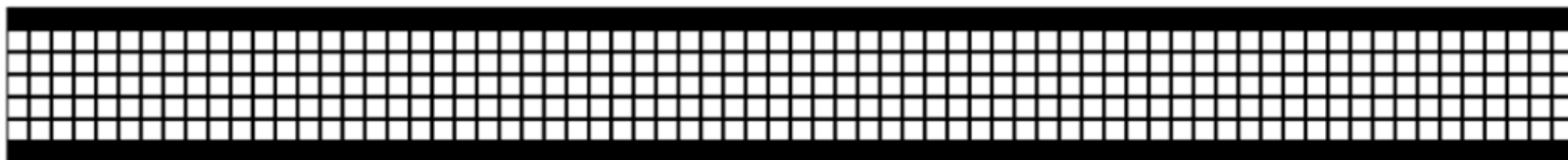


Figura 26: Microestruturas "Quadrado"



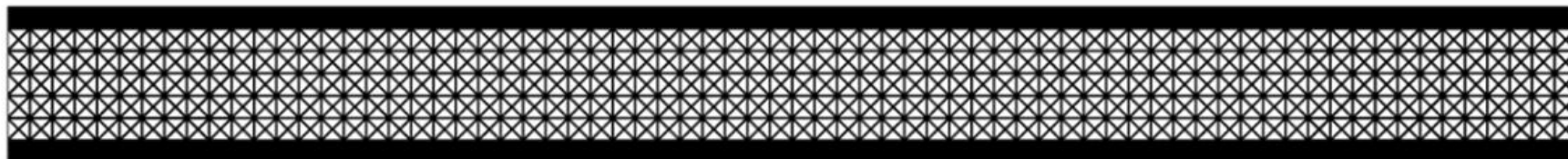


Figura 28: Microestruturas “Quadrado e X”

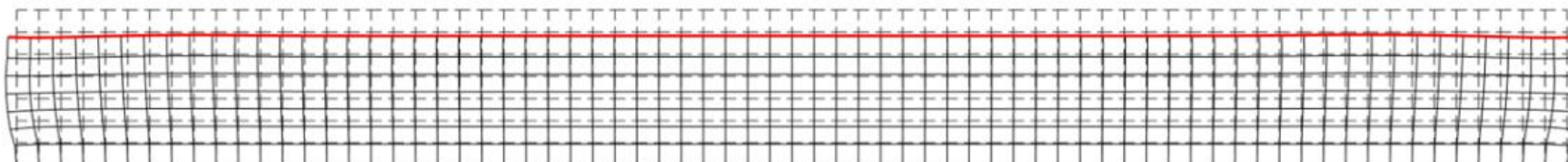
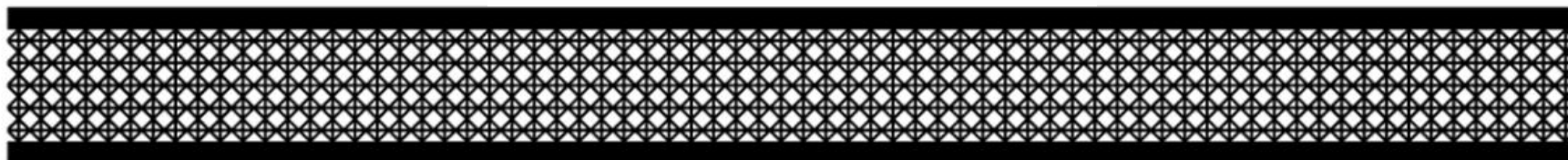


Figura 27: Microestruturas “Diamante com +”

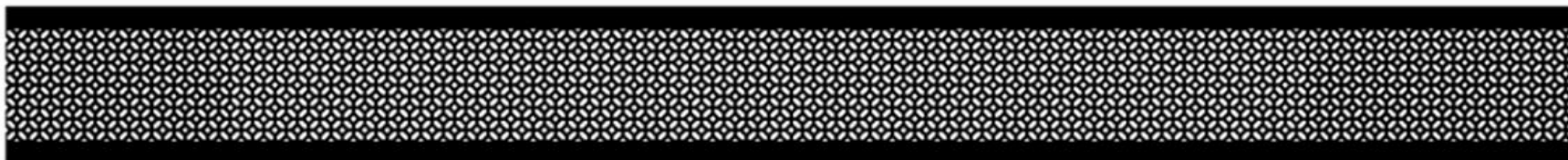


Figura 30: Microestruturas "X com ramos"

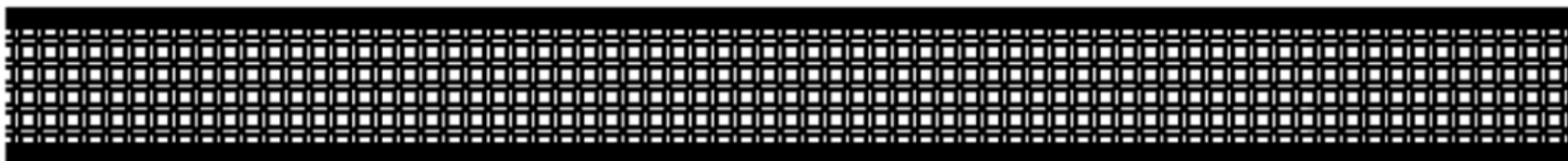


Figura 29: Microestruturas "X com ramos"

A família de microestruturas que apresentou os melhores resultados foi a “Quadrado” com o coeficiente de variação de 0,2%. Avaliando as condições de contorno, os gráficos das propriedades e restrições das simulações, este resultado é coerente. A microestrutura “quadrado” é, basicamente, um conjunto de vigas ortogonais, as verticais dão sustento total às forças perpendiculares que são aplicadas na superfície de contato, algo que certamente mudaria em um cenário real e dinâmico. Além disto, é possível observar com a Tabela 2 e a Figura 19 uma relação entre o coeficiente de Poisson e o coeficiente de variação. Os piores resultados estão associados a coeficientes de Poisson maiores e a família de microestruturas “Quadrado” é a única que obtém valores menores que 0.2, ou seja, as deformações perpendiculares à ação das cargas afetam a deformação na superfície.



## Conclusão

Os resultados apresentados mostram que o objetivo de minimizar o coeficiente de variação de uma palmilha sob cargas estáticas pode ser atingido com resultados menores que 6.7%.

É necessário reconhecer que estas otimizações são resultados de diferentes planos de variáveis devido ao número reduzido de restrições, sendo uma destas a deformação mínima e máxima admissível.

Dada toda a bibliografia existente, tanto de metodologias para determinar microestruturas quanto de funções objetivo para a alocação de materiais, este estudo mostra que existe uma base científica e praticidade desta tecnologia para as inúmeras possibilidades que poderão beneficiar indivíduos com neuropatias periféricas, que se torna mais viável devido ao progresso das impressoras 3D. Assim, num futuro próximo, profissionais da saúde poderão produzir seu produto do começo ao fim com um grande grau de liberdade para o *design* de palmilhas, sem as limitações de recortar artesanalmente insertos e acabamentos.

### 5.1

#### Trabalhos futuros

Para o progresso deste projeto, os próximos passos devem ser considerados:

- A geração e desenvolvimento de microestruturas no espaço 3D junto com uma malha de mesma dimensão.
- Determinar a resolução e escala possível na fabricação de microestruturas em impressoras 3D.
- Fabricar as palmilhas e realizar testes *in vivo*, tanto estáticos quanto dinâmicos, em um laboratório de biomecânica.

## Referências bibliográficas

- [1] O. J. M. do Nascimento, C. C. B. Pupe, e E. B. U. Cavalcanti, “Neuropatia diabética”, *Rev. dor*, vol. 17, p. 46–51, 2016, doi: 10.5935/1806-0013.20160047.
- [2] C. W. Hicks e E. Selvin, “Epidemiology of Peripheral Neuropathy and Lower Extremity Disease in Diabetes”, *Curr Diab Rep*, vol. 19, nº 10, p. 86, ago. 2019, doi: 10.1007/s11892-019-1212-8.
- [3] G. U.-S. Empresariais, “Feet Solutions - Tecnologia em palmilhas”. <https://www.feetsolutions.com.br> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [4] B. Berman, “3-D printing: The new industrial revolution”, *Business Horizons*, vol. 55, nº 2, p. 155–162, mar. 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- [5] R. Collings, J. Freeman, J. M. Latour, e J. Paton, “Footwear and insole design features for offloading the diabetic at risk foot—A systematic review and meta-analyses”, *Endocrinology, Diabetes & Metabolism*, vol. 4, nº 1, p. e00132, 2021, doi: 10.1002/edm2.132.
- [6] U. Tang, R. Zügner, V. Lisovskaja, J. Karlsson, K. Hagberg, e R. Tranberg, “Comparison of plantar pressure in three types of insole given to patients with diabetes at risk of developing foot ulcers – A two-year, randomized trial”, *Journal of Clinical & Translational Endocrinology*, vol. 1, dez. 2014, doi: 10.1016/j.jcte.2014.06.002.
- [7] M. Nouman, T. Dissaneewate, W. Leelasamran, e S. Chatpun, “The insole materials influence the plantar pressure distributions in diabetic foot with neuropathy during different walking activities”, *Gait Posture*, vol. 74, p. 154–161, out. 2019, doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.08.023.
- [8] C. Schumacher, B. Bickel, J. Rys, S. Marschner, C. Daraio, e M. Gross, “Microstructures to control elasticity in 3D printing”, *ACM Trans. Graph.*, vol. 34, nº 4, p. 1–13, jul. 2015, doi: 10.1145/2766926.
- [9] P. E. Chatzistergos, A. Gatt, C. Formosa, K. Farrugia, e N. Chockalingam, “Optimised cushioning in diabetic footwear can significantly enhance their capacity to reduce plantar pressure”, *Gait & Posture*, vol. 79, p. 244–250, jun. 2020, doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.009.
- [10] E. Andreassen e C. S. Andreasen, “How to determine composite material properties using numerical homogenization”, *Computational Materials Science*, vol. 83, p. 488–495, fev. 2014, doi: 10.1016/j.commatsci.2013.09.006.

- [11] “MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink”. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [12] “Anatomia Orientada Para a Clínica - Moore - 7ª Ed. - Baixar pdf de Docero.com.br”, *Docero.com.br*. <https://docero.com.br/doc/nc5c85> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [13] “Illustration-of-common-diabetic-foot-problems-768x675.jpg (768×675)”. <https://blog.medicaresolutions.com/wp-content/uploads/2019/11/Illustration-of-common-diabetic-foot-problems-768x675.jpg> (acessado 21 de novembro de 2021).
- [14] “FlexInFit - Sensor Medica”. <https://www.sensormedica.com/en/flexinfite/> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [15] G. Zeitoune, G. Leporace, L. A. Batista, L. Metsavaht, P. R. G. Lucareli, e J. Nadal, “Do hip strength, flexibility and running biomechanics predict dynamic valgus in female recreational runners?”, *Gait Posture*, vol. 79, p. 217–223, jun. 2020, doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.006.
- [16] “IBTS - Home”. <https://www.brasilsaude.org.br/> (acessado 21 de novembro de 2021).
- [17] ceren, “Introduction to Computer Numerical Control”, *Geomiq*, 30 de agosto de 2021. <https://geomiq.com/2021/08/30/introduction-to-computer-numerical-control/> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [18] “Nossa história”, *3D Systems*, 12 de janeiro de 2017. <https://br.3dsystems.com/our-story> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [19] “IMPRESSORA 3D FDM ENDER-3 CREALITY 3D”, *Creality Store*. <http://www.crealitystore.com.br/impessora-3d-ender-3-fdm-creality-3d> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [20] PRINTIT3D, “Tipos de Impressora 3D e suas aplicações”, *Impressão 3D*, 8 de novembro de 2018. <https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-impressora-3d> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [21] “Adidas 3D Printed Shoes: The Latest Advancements”, *All3DP*, 19 de setembro de 2020. <https://all3dp.com/2/adidas-3d-printed-shoes/> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [22] “Tênis adidas Futurecraft 4D - Preto adidas”, *adidas Brasil*. <https://www.adidas.com.br/tenis-adidas-futurecraft-4d/FZ2560.html> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [23] “3D-Printed Custom Orthotics | Materialise Motion”. <https://www.materialise.com/en/industries/motion> (acessado 20 de novembro de 2021).

- [24] “Fitstation”. <https://www.fitstation.com/footandankle.html> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [25] “Orthobaltic - 3D PRINTED INSOLES”. <https://www.orthobaltic.eu/3d-printing.html> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [26] “3D Printing Insoles & Orthotics - Aetrex Worldwide”. [https://www.aetrex.com/3D-printing.html?lang=en\\_US](https://www.aetrex.com/3D-printing.html?lang=en_US) (acessado 20 de novembro de 2021).
- [27] “David R. Smith Group”. <http://people.ee.duke.edu/~drsmith/metamaterials.htm> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [28] S. J. Hollister e N. Kikuchi, “A comparison of homogenization and standard mechanics analyses for periodic porous composites”, *Computational Mechanics*, vol. 10, nº 2, p. 73–95, mar. 1992, doi: 10.1007/BF00369853.
- [29] “Poisson’s Ratio - Soft-Matter”. [http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Poisson%27s\\_Ratio](http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Poisson%27s_Ratio) (acessado 30 de janeiro de 2022).
- [30] “Isotropic and Orthotropic Materials - 2012 - SOLIDWORKS Help”. [http://help.solidworks.com/2012/english/solidworks/cworks/isotropic\\_and\\_orthotropic\\_materials.htm](http://help.solidworks.com/2012/english/solidworks/cworks/isotropic_and_orthotropic_materials.htm) (acessado 30 de janeiro de 2022).
- [31] C. Talischi, G. H. Paulino, A. Pereira, e I. F. M. Menezes, “PolyTop: a Matlab implementation of a general topology optimization framework using unstructured polygonal finite element meshes”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 45, nº 3, p. 329–357, mar. 2012, doi: 10.1007/s00158-011-0696-x.
- [32] “O que é o Método dos Elementos Finitos e como ele é usado na simulação”, *ESSS*. <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/> (acessado 20 de novembro de 2021).
- [33] The Efficient Engineer, *Understanding the Finite Element Method*, (2021). Acessado: 30 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=GHjopp47vvQ>