

Jonathan Mendes Carvalheiro

Desenvolvimento de um sistema visual e táctil para a caracterização da elasticidade dos materiais

Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Fevereiro de 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores

Desenvolvimento de um sistema visual e táctil para a caracterização da elasticidade dos materiais

Jonathan Mendes Carvalheiro

Orientador

Professor Helder de Jesus Araújo

Júri:

Professor Paulo José Monteiro Peixoto (Presidente)

Professor Helder de Jesus Araújo (Vogal)

Professor Nuno Miguel Mendonça da Silva Gonçalves (Vogal)

Fevereiro de 2016

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Helder de Jesus Araújo pelo apoio e pelas ideias que me foram dadas ao longo da dissertação.

Agradeço também ao Instituto de Sistemas e Robótica, ao Eng.º Tiago Dias e ao Rodrigo Ferreira pela paciência, companheirismo e ajuda que contribuíram para a conclusão deste projeto.

Agradeço à minha avó, Alice Justiniano, por todo o apoio, paciência, amor e carinho que me deu ao longo de todos estes anos, ao meu pai e esposa, Manuel Carvalheiro e Júlia Jesus, e à minha mãe e marido, Regina Mendes e Vítor Pereira, pela educação, apoio e valores que me inculcaram, ao João Simões, Inês Costa e respetivas famílias, pois sem vocês tudo teria sido mais difícil, à minha namorada Lavínia Sanches, em que as palavras não bastarão para agradecer tudo o que fez, aos meus irmão, Ricardo Carvalheiro e Joana Carvalheiro, por todo o apoio e paciência que tiveram comigo, à minha irmã Yara Pereira, pelos pequenos e carinhosos momentos que me proporcionou. Quero agradecer à minha avó Maria Fatia, e principalmente ao meu avô Luciano Mendes, por tudo o que fizeram por mim.

Por fim quero agradecer a todos os meus amigos, pois com vocês *I'll Never Walk Alone!*

Resumo

O sentido do tato está a tornar-se cada vez mais relevante principalmente nos campos da robótica, visão por computador, automação industrial e medicina. Este sentido tem um enorme potencial e inúmeras aplicações que permitem uma maior interação entre a máquina e o mundo exterior. No entanto tem sido pouco estudado em comparação com algum dos sentidos tradicionais, mas tem ganho cada vez mais importância devido à sua aplicabilidade às tecnologias existentes.

Esta dissertação contribuiu para uma avaliação de materiais quanto às suas propriedades elásticas, com recurso a dispositivos menos dispendiosos e de fácil adaptação a sistemas já existentes, além de ter uma enorme abertura para trabalhos futuros.

A estratégia adotada baseou-se na sincronização entre uma câmara de tempo de voo (ToF) e um sensor barométrico para assim conseguir realizar uma análise e classificação da deformação de objetos no mundo. Com isto, fomos capazes de provar que é possível, com estes dois dispositivos, fazer uma caracterização do material ao nível da sua deformidade a baixo custo.

Palavras-Chave: PMD, Parâmetros de Elasticidade, Deformação de objetos, ToF, Sensores Barométricos.

Abstract

The sense of touch is becoming increasingly important especially in robotics, computer vision, industrial automation and medical fields. This sense has enormous potential and various applications that allow greater interaction between the machine and the outside world. However, it has been less studied compared to other traditional senses and has gained increasing importance due to its applicability to existing technologies.

This dissertation has contributed to the evaluation of materials, in terms of their elastic properties, using less expensive devices and easy adaptation to existing systems, besides having a huge opening for future work.

The strategy adopted was based on synchronization between camera flight time (ToF) and a barometric sensor to thereby accomplish an analysis and classification of the deformation objects in the world. With this, we were able to prove that it is possible, with these two devices, to make a characterization of the material in terms of its deformity at low cost.

Keywords: PMD, Elasticity parameters, Warping objects, ToF, Barometric Sensors

Conteúdo

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
Lista de Acrónimos.....	v
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação	4
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estrutura da tese.....	5
Capítulo 2	7
Revisão da Literatura.....	7
2.1 Fusão do Tato e Visão e a Deformabilidade de Objetos.....	7
2.1.1 Tato e as Propriedades dos Objetos.....	7
2.1.2 Conceito de Pressão.....	8
2.1.3 Sensores de Pressão	9
2.1.4 Influência da Visão na Percepção Tátil de um Objeto	9
2.1.5 Propriedades Mecânicas dos Materiais	11
2.2 Sensor Barométrico – Takkstrip	16
2.2.1 Comparação da Takkstrip com Sensores Similares.....	17
2.3 Câmara de Tempo de Voo 3D (ToF)	18
2.3.1 PMD CamBoard nano	20
2.3.2 Comparação da PMD CamBoard nano com câmaras similares	22
2.4 Raspberry Pi.....	22
2.3.3 RPi 2 B	23
Capítulo 3	25
Desenvolvimento.....	25

3.1	Calibração da PMD CamBoard Nano.....	25
3.2	Calibração dos sensores de pressão	26
3.3	Ligação entre o RPi e a Takkstrip.....	29
3.4	Cálculo dos Parâmetros de Elasticidade de Objetos	30
3.4.1	<i>Pipeline</i> do Sistema	30
3.4.2	Aquisição e transmissão de dados da Takkstrip	30
3.4.3	Receção, calibração e armazenamento de dados provenientes do RPi 2 B 32	
3.4.4	Aquisição da nuvem de pontos e a reconstrução 3D da superfície	32
3.4.5	Cálculo do erro de medida da PMD CamBoard nano após a reconstrução 3D	36
3.4.6	Visualização em RT da força exercida e da nuvem de pontos	36
3.5	Classificação do objeto entre rígido e deformável em tempo real.....	38
3.5.1	<i>Pipeline</i> do Sistema	38
3.5.2	Aquisição e transmissão de dados da Takkstrip	38
3.5.3	Aquisição da imagem em profundidade e aplicação do algoritmo de deteção da ponta do dedo.....	39
3.5.4	Visualização em RT da posição da ponta do dedo em função do tempo .	41
3.5.5	Classificação do material entre “Rígido” e “Deformável” em RT	41
	Capítulo 4	45
	Testes e Resultados.....	45
4.1	Cálculo dos parâmetros de elasticidade	45
4.2	Classificação do objeto entre rígido e deformável em tempo real.....	50
4.2.1	Teste de classificação com o ovo	51
4.2.2	Teste de classificação do tomate	52
4.2.3	Teste de classificação do cubo de algodão	53
	Capítulo 5	55
	Conclusões e Trabalho Futuro.....	55

5.1	Conclusões	55
5.2	Trabalho Futuro	56
	Bibliografia	57
	Apêndice A	61
	Anexos	61

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Demonstração de alguns dos principais sentidos do ser humano [3]	1
Figura 1.2 Diferentes tipos de testes aplicados à pele para despoletar diferentes tipos de exteroceptores e proprioceptores [3]	2
Figura 1.3 - Exemplo de uma prótese de uma mão estudada por M. Zecca [4]	3
Figura 2.1 Procedimentos manuais e propriedades dos objetos associadas [5].....	8
Figura 2.2 Exemplos de sensores de pressão [7]	9
Figura 2.3 Deformação de um objeto através de um sistema robótico integrado com sensores de força e uma câmara. [15].....	10
Figura 2.4 (a) Ilustração de uma tração (b) Ilustração de uma compressão (c) Ilustração de um cisalhamento (d) Ilustração de uma torção [34]	11
Figura 2.5 Demonstração da Lei de Hooke [35]	12
Figura 2.6 Ilustração das variáveis necessárias para o cálculo do Módulo de Young [36]	14
Figura 2.7 Ilustração das variáveis presentes na equação 2.3 e 2.5.....	15
Figura 2.8 Takkstrip [17].....	16
Figura 2.9 Sensor MPL115A2 e o diagrama de blocos do dispositivo [18].....	16
Figura 2.10 Takkstrip fundidos com a VitaFlex 20. Alterada de [17].....	17
Figura 2.11 Operações de uma câmara 3D ToF [20]	18
Figura 2.12 Dois métodos ToF: pulsado (cima) e de CW (baixo)	19
Figura 2.13 PMD CamBoard nano em funcionamento [37]	21
Figura 2.14 Símbolo do RPi [38]	23
Figura 2.15 Raspberry Pi 2 B [39].....	23
Figura 3.1 Imagens fornecidas pelo MetriCalibrate Intrínsic 1.5.0.0 do xadrez. Comparação entre a imagem distorcida (vermelho) e a imagem calibrada (verde) (esquerda) e o xadrez usado para a calibração (direita).....	26
Figura 3.2 Takkstrip após corte e solda dos sensores.....	26
Figura 3.3 Ligação I ² C entre o RPi e a Takkstrip (topo) e a ilustração do circuito (base)	27
Figura 3.4 Suporte desenvolvido para a calibração e uso do sensor barométrico (esquerda) e método de calibração usando uma balança de precisão (direita).....	29

Figura 3.5 Pipeline do sistema desenvolvido para o cálculo dos parâmetros de elasticidade.....	30
Figura 3.6 Ilustração hierárquica dos programas desenvolvidos para o cálculo dos parâmetros de elasticidade e as suas dependências.....	30
Figura 3.7 Demonstração das diferenças entre os contadores de "server", "pmd_reconstruction" e "takkstrip_reader.m".....	31
Figura 3.8 Esquema ilustrativo dos módulos e das suas dependências da biblioteca PCL [40]	33
Figura 3.9 Esquema demonstrativo do funcionamento do pacote ROS "pmd_reconstruction"	33
Figura 3.10 Triangulação com (direita) e sem (esquerda) a aplicação do filtro MovingLeastSquares	35
Figura 3.11 Imagem original (superior esquerda), point cloud sem filtros (superior central), point cloud após o filtro RadiusOutlierRemoval (superior direita), point cloud após o filtro PassThrough (inferior esquerda), point cloud após o filtro MovingLeastSquares (inferior direita).	36
Figura 3.12 Gráfico em tempo real da força (N) pelo tempo decorrido até ao momento da interrupção do sistema (s)	37
Figura 3.13 Pipeline do sistema desenvolvido para a classificação dos objetos.....	37
Figura 3.14 Ilustração hierárquica dos programas desenvolvidos para classificação dos materiais e as suas dependências.....	38
Figura 3.15 Sistema de classificação de objetos entre deformável.....	38
Figura 3.16 Esquema demonstrativo do funcionamento do programa "fingertracking".....	39
Figura 3.17 Gráfico de demonstração da oscilação da posição do centro da ponta do dedo quando esta se encontra em repouso.....	41
Figura 4.1 Cubo de algodão usado nos testes.....	46
Figura 4.2 Imagem em amplitude (esquerda) e a posição da câmara em relação ao cubo de algodão (direita).....	46
Figura 4.3 Conjunto das quinze meshes geradas (superior esquerdo), comparação da reconstrução do objeto em repouso e deformado (superior direita), segmento de reta guia do deslocamento vertical (inferior esquerdo), segmento de reta guia do deslocamento horizontal (inferior central) e as duas segmentos de reta guias e os pontos de referência dos deslocamentos (inferior direita).	47

Figura 4. 4 Diagrama de caixa referente aos valores do módulo de Young obtidos das dez experiências realizadas ao cubo de algodão.....	47
Figura 4.5 Gráfico ilustrativo das médias dos coeficientes de Poisson obtidas das amostras de cada uma das experiências realizada.....	48
Figura 4.6 Objetos usados no teste de classificação.....	50
Figura 4.7 Força exercida pela ponta do dedo em função do tempo (teste do ovo).....	51
Figura 4.8 Força exercida pela ponta do dedo em função do tempo (teste do tomate)...	52
Figura 4.9 Força exercida pela ponta do dedo em função do tempo (teste do cubo de algodão).....	53
Figura A.1 Comparação do spline da média com a regressão polinomial de 3º grau....	59
Figura A.2 Gráfico de bigodes das medidas efetuadas pelo sensor de pressão por peso.	60
Figura A.3 Gráfico da força aplicada durante o teste descrito na secção 4.1 em função do tempo	61
Figura A.4 Posição da ponta do dedo ao longo do tempo (teste do ovo)	62
Figura A.5 Posição da ponta do dedo ao longo do tempo (teste do tomate)	63
Figura A.6 Posição da ponta do dedo ao longo do tempo (teste do cubo de algodão)...	64

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Média dos valores recebidos pela Takkstrip em função dos pesos e o RSME correspondente.....	28
Tabela A.1 Vários tipos de tecnologias de sensores de força e a suas propriedades [41]	62
Tabela A.2 Câmaras ToF disponíveis no mercado e as suas características [33].....	66
Tabela A.3 Módulo de Young para diferentes materiais [1].....	67

Lista de Acrónimos

PMD – Photonic Mixer Device

IR – Infrared

LED– Light-emitting diode

SO – Sistema Operativo

RGB – Red, Green, Blue

ROS – Robot Operating System

MDK – Matlab Development Kit

SDK – *Software* Development Kit

SSH – Secure Shell

ToF – Time-of-Flight

FSR – Force-Sensing Resistor

MEMS – Microeletromechanical Systems

VRP – Variable-Reluctance Pressure

GPS – Global Position System

IC – Inter-Integrated Circuit

CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

CW – Continuous-Wave

SPAD – Single-Photon Avalanche Diode

FoV – Field of View

SBI – Suppression of Background Illumination

RPi – Raspberry Pi

RSME – Root Square Minimum Error

RSS – Residual Sum of Squares

RT – Real Time

fps – *Frames* per second

TCP – Transmission Control Protocol

IP – Internet Protocol

PCL – Nuvem de pontos Library

VTK – Visualization Toolkit

Capítulo 1

Introdução

A percepção do mundo exterior é adquirida através de sistemas sensoriais desenvolvidos ao longo do processo evolucionário natural. Ao ser humano são lhe tradicionalmente atribuídos cinco sentidos: a visão, a audição, o paladar, o olfato e o tato. O sentido do tato pode ser definido como um sistema que consegue medir uma propriedade de um objeto ou de uma situação de contacto, através do contacto físico entre o sistema e o objeto[2]. É um dos sentidos menos valorizado, mas sem o qual o ser humano poderia perder a sua capacidade de deteção dos movimentos e da posição dos membros. Perderia, consequentemente, a capacidade de andar, a perda da precisão e da velocidade nos movimentos, principalmente os das mãos, e também da capacidade de comunicar através de linguagem corporal [3].

A importância do tato não se cinge só ao ser humano, pois tem uma relevância crítica na vida dos animais. A aranha, apesar de não ter uma boa capacidade visual, compensa com uma percepção de toque bastante precisa. Esta consegue perceber o que está a acontecer em seu redor através das vibrações, conseguindo diferenciar uma situação entre o vento, insetos capturados, predadores ou até mesmo outras aranhas [2].

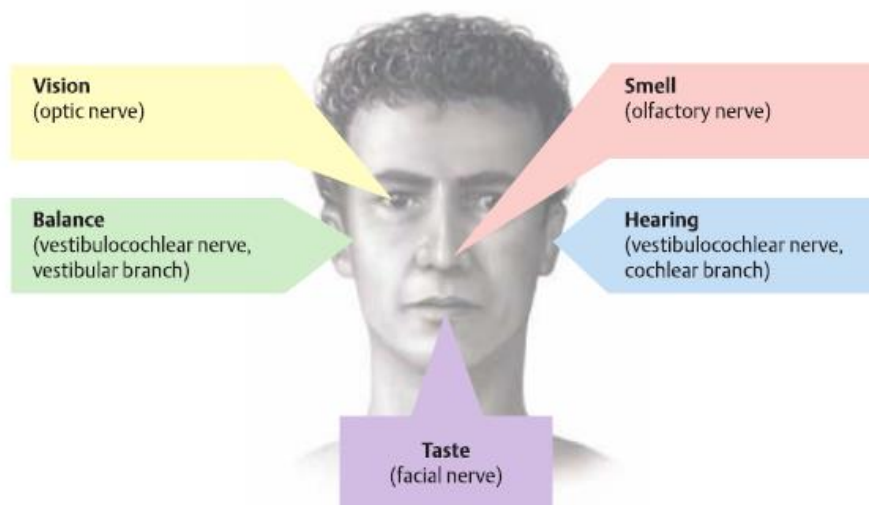


Figura 1.1 - Demonstração de alguns dos principais sentidos do ser humano [4]

No ser humano, a sensibilidade pode ser distinguida entre exteroceptiva (percepção exterior) e proprioceptiva (percepção interior), dependendo da fonte do estímulo. No caso

da exteroceção, como vem do exterior, é captada através de exteroceptores na pele. Na proprioceção a fonte do estímulo é interior como num músculo ou tendão (que dá informação sobre a posição relativa do corpo).



Figura 1.2 Diferentes tipos de testes aplicados à pele para despoletar diferentes tipos de exteroceptores e proprioceptores [3]

Na figura 1.2, estão representados testes de forma a despoletar diferentes tipos de sensações do ser humano, tanto proprioceptivas como exteroceptivas. Com esta figura consegue-se perceber que no mesmo local, a pele contém vários tipos de exteroceptores. A exteroceção pode ser distinguida em dois diferentes tipos de perceção: a perceção epicrítica (toque da luz, vibração, discriminação a dois pontos) e a perceção protopática (dor e temperatura), sendo que a última inclui a componente emocional (e.g. a dor provoca transtorno emocional).[4]

Esta classificação de sensações também pode ser aplicável à área da robótica mais especificamente quando se refere a humanoides ou mãos robóticas. Neste caso, estas não são adquiridas através de exteroceptores ou proprioceptores, mas sim por sensores. Na mão robótica referida por M. Zecca et al.[5], na figura 1.3, existem sensores proprioceptivos de posição (sensor de Efeito de Hall), sensores proprioceptivos da posição angular das juntas (sensor de Efeito de Hall), sensores proprioceptivos da força dos tendões (sensor de tensão) e sensores exteroceptivos de força (sensor FSR).

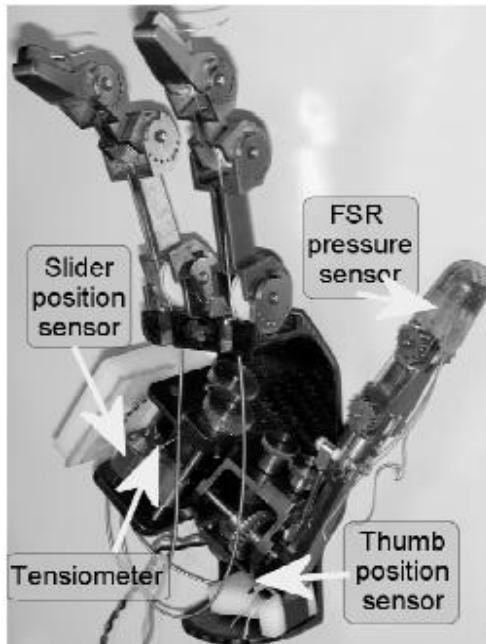


Figura 1.3 - Exemplo de uma prótese de uma mão estudada por M. Zecca [5]

Na robótica, o sentido do tato nos sistemas robóticos pode ser fornecido através de sensores de tato. Uma vez que estes apenas fornecem dados resultantes de um contacto, quisemos estudar e aplicar um dispositivo que fornecesse a visão, sendo assim possível ao sistema robótico identificar e ter uma perceção do mundo onde está o objeto, de forma a conseguir estudar ou considerar aplicações necessárias para ambos os dispositivos. Existem vários tipos de câmara que podem ser úteis para este propósito e nesta dissertação é explorado o uso de uma câmara ToF com o propósito de retirar o máximo de informação visual possível. Apesar de existirem muitos tipos de sensores que conseguem dar uma informação física da força, pressão, ou de simples contacto com um objeto, recorreremos ao uso de sensores barométricos que nos dão a informação da pressão aplicada no contacto.

1.1 Motivação

O que esta tecnologia pode fornecer tem sido um fator relevante para o desenvolvimento de várias aplicações. Principalmente ao nível da medicina, é muito explorada para a investigação de mãos, braços e dedos robóticos[5]–[8], para que desta forma as pessoas que sejam amputadas consigam usufruir da sensação de tato. A cirurgia robótica também tem sido um tópico bastante explorado nesta área [9].

Adicionando a capacidade visual a um sistema equipado com sensores tácteis, traz inúmeras vantagens principalmente para um sistema robótico, dando-lhe uma perceção do objeto no mundo. Este assunto é abordado por Burgard [6], [7] com o objetivo de criar modelos de deformabilidade de objetos e por Bimbo [8] na estimação da pose do objeto durante a manipulação. Apesar do grande desenvolvimento neste âmbito, há potencial para criar inúmeras aplicações, que provêm da simbiose entre a visão e o tato, em sistemas robóticos.

Esta dissertação surge da necessidade de explorar soluções na identificação de objetos recorrendo à combinação de uma câmara ToF PMD CamBoard nano[9] com sensores barométricos Takkstrip [10]. Esta tecnologia abrange várias áreas, desde a área da medicina (próteses), aplicações diretas em sistemas robóticos, até à indústria dos videojogos (realidade virtual, uso de objetos reais em jogos).

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste em identificar objetos quanto à sua elasticidade, ou seja, se são objetos rígidos ou deformáveis, e o cálculo dos parâmetros de elasticidade do mesmo recorrendo a um sistema que combina a visão com o senso do tato.

Para se atingir este objetivo usou-se uma câmara ToF (PMD CamBoard nano), cinco sensores barométricos (Takkstrip) e um RPi 2 B. Sendo a PMD CamBoard nano uma câmara ToF, foi possível extrair dados como a nuvem de pontos em 3D da cena, a imagem em amplitude, e em profundidade. A Takkstrip após calibração, fornece dados da força aplicada sobre os mesmos em Newtons, dados esses recolhidos através de uma ligação I²C ao RPi 2 B.

Para além disto, pretendia-se fazer uma análise mais científica da deformabilidade dos materiais, com o cálculo dos parâmetros de elasticidade (módulo de Young e coeficiente de Poisson), identificação do modelo e do tensor de deformação.

1.3 Estrutura da tese

A dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

Capítulo 1 - É feita uma introdução sobre o assunto desta dissertação, como a motivação a que nos levou à sua realização, objetivos e a sua estrutura.

Capítulo 2 - Introdução aos conceitos teóricos inerentes ao problema, onde é dada importância ao uso do senso do tato, são caracterizadas as câmaras ToF, explorando principalmente a PMD Camboard Nano, um estudo sobre os vários tipos de sensores de tato e caracterização da Takkstrip e descrição do RPi 2 B.

Capítulo 3 - São descritas as propostas de solução realizadas para a caracterização da elasticidade dos objetos e classificação em tempo real entre objetos deformáveis e rígidos através do sistema proposto. Explicam-se, em detalhe, através de um *pipeline* e de uma descrição detalhada de todo o *software* envolvido na coordenação entre os dispositivos e a calibração da câmara e dos 5 sensores da Takkstrip.

Capítulo 4 - Encontram-se aqui os testes e resultados obtidos a partir das abordagens desenvolvidas.

Capítulo 5 - Por fim, são elaboradas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura fundamental para a compreensão do projeto. É evidenciada a importância da percepção do tato, das propriedades mecânicas dos materiais, sendo focadas as propriedades elásticas. Fizemos uma análise sobre a pressão e os sensores de pressão existentes de forma a posteriormente introduzir a Takkstrip e a contextualização dos seus sensores de pressão. É introduzido também o funcionamento das câmaras ToF, e especificamente da PMD CamBoard nano e uma comparação com as suas semelhantes. Finalmente, é dada uma visão geral sobre o RPi 2 B.

2.1 Fusão do Tato e Visão e a Deformabilidade de Objetos

2.1.1 Tato e as Propriedades dos Objetos

Inicialmente a investigação centrava-se na extração de propriedades de objetos através da exploração manual, tendo sido relevante na compreensão de como e qual a informação que podemos adquirir através do toque. S.J. Lederman [11] percebeu em 1993 que através dos procedimentos da figura 2.1 seria possível retirar propriedades como a textura, dureza, temperatura, forma, volume, funcionalidades e a mobilidade dos objetos. Isto é relevante pois a partir destes procedimentos, desenvolveram-se e poderão vir a ser desenvolvidos sensores ou aplicações que consigam explorar as propriedades dos objetos. Nesta dissertação, as propriedades em que nos iremos focar serão as propriedades elásticas dos objetos.

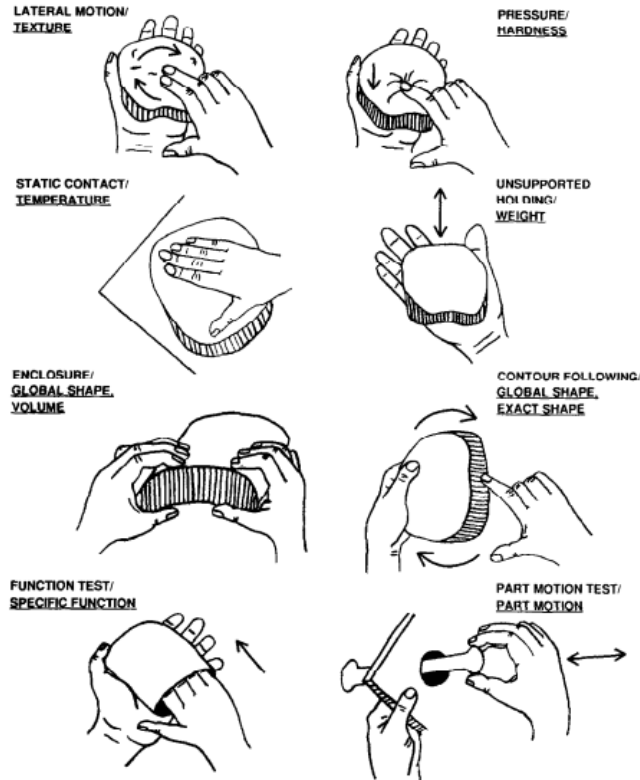


Figura 2.1 Procedimentos manuais e propriedades dos objetos associadas [11]

2.1.2 Conceito de Pressão

Com o baixar do custo dos sistemas microelectromecânicos (MEMS) o desenvolvimento desta tecnologia disparou (uma queda entre 80 a 90 % do preço nos últimos 8 anos [12]) o que se traduziu no aparecimento de vários tipos de sensores no mercado, inclusive dos sensores de pressão.

O conceito de pressão surge inicialmente através do trabalho de Evangelista Torricelli, estudante de Galileu Galilei. Durante as suas experimentações com mercúrio, em 1643, percebeu que a atmosfera exerce pressão sobre a Terra. Posteriormente, Blaise Pascal, percebeu que a pressão da atmosfera varia com a elevação. Em 1660, Robert Boyle, estabeleceu a sua famosa relação: *“O produto das medidas de pressão e de volume é constante para uma dada massa de ar a uma temperatura constante”*. Em 1738, Bernoulli desenvolveu a teoria da pressão do gás até ao ponto onde a lei de Boyle poderia ser deduzida analiticamente, antecipando a lei de Charles-Gay-Lussac afirmando que a pressão aumenta com o aumento da temperatura do gás a um volume constante.

As unidades SI da pressão é em Pascal ($1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$). Em alguns casos específicos, a unidade atmosfera é usada, sendo denominada de 1 *atm*, sendo uma atmosfera a pressão exercida num cm^2 por uma coluna de água de 1 metro de altura a 4° Celsius. Considerando a atmosfera ideal da Terra (760 Torr (mmGh), $1 atm = 101.325 Pa$).[13]

2.1.3 Sensores de Pressão

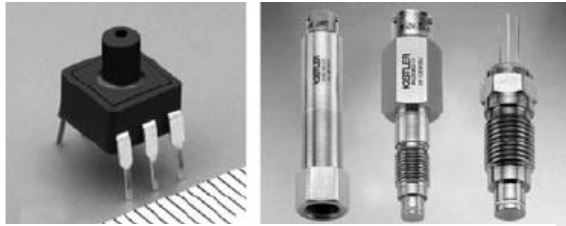


Figura 2.2 Exemplos de sensores de pressão [13]

Um sensor de pressão exige bastante mais que uma conversão, para chegar a um valor de pressão a partir de um sinal elétrico, fazendo deste um sensor bastante complexo. O princípio de funcionamento deste tipo de sensor é baseado na conversão de um resultado de pressão exercida num elemento sensível numa determinada área. Como resultado, a pressão medida pode ser reduzida a um deslocamento ou à força que provoca o deslocamento. Os sensores de pressão podem variar em diferentes tipos, sensores de pressão baseados em mercúrio, foles, membranas, placas finas, piezoresistividade, sensores capacitivos, VRP, optoelectrónicos, sensores de pressão indireta e de vacum. Na tabela A.1 é possível analisar as melhores e piores características dos vários tipos de tecnologias.

2.1.4 Influência da Visão na Percepção Tátil de um Objeto

A visão é por muitos considerado um dos principais sentidos do ser humano, pois é através desta que conseguimos ter uma percepção do mundo circundante e permite interagir com este de forma ativa. As próprias memórias estão muito associadas a este sentido, tal como a arte, a condução de uma viatura, porque todos estes necessitam da informação que só a visão pode fornecer. A percepção tátil não é um destes casos, porque um ser humano, independentemente de ter visão ou não, consegue adquirir as propriedades de um objeto através do toque.

Aliar a visão ao sentido do tato consegue dar ao ser humano ou mesmo a um sistema robótico, a noção do objeto no mundo, a avaliação tanto ao nível da sua forma como ao nível do seu comportamento quando aplicados certos estímulos, percebendo assim se se trata de um objeto deformável, robusto, áspero, perigoso, entre outras inúmeras propriedades.

Num sistema robótico são bem perceptíveis quais as vantagens de integrar a visão num sistema tátil, pois a capacidade de perceção tátil ao nível da robótica ainda é pouco desenvolvida comparada com a do ser humano, tanto ao nível da precisão como ao nível da quantidade de informação retirada. Uma câmara, em conjunto com os sensores de táteis, proporciona ao sistema robótico uma capacidade de avaliação e de perceção de um objeto muito maior fornecendo informação ao nível da sua posição 3D em relação ao sistema, as alterações em tempo real do objeto, à forma do próprio objeto. Foi este o principal motivo pelo qual optámos por estudar este tipo de sistemas e perceber que informações e que aplicabilidades poderão oferecer.



Figura 2.3 Deformação de um objeto através de um sistema robótico integrado com sensores de força e uma câmara. [7]

2.1.5 Propriedades Mecânicas dos Materiais

As propriedades mecânicas dos materiais podem ser alteradas consoante a natureza da carga aplicada e do tempo em que é aplicada, tal como as condições ambientais a que o material está sujeito. Esta carga ou tensão pode ocorrer de várias formas, nomeadamente, por tração (a força aplicada ocorre no sentido inverso ao da reação de apoio ou inércia resultante do sistema de forças), compressão (a força é aplicada no mesmo sentido que a reação de apoio ou inércia resultante do sistema das forças), cisalhamento ou corte (tendência a cortar o material em que ocorre um deslocamento paralelo no sentido oposto de duas secções contíguas), flexão (a tensão tem uma tendência de rotação angular no eixo de simetria do corpo e tangencial à reação de apoio ou inércia resultante do sistema das forças) e torção (a tensão tem tendência a uma rotação angular sobre o eixo geométrico do corpo e axial à reação de apoio ou inercia resultante das forças).

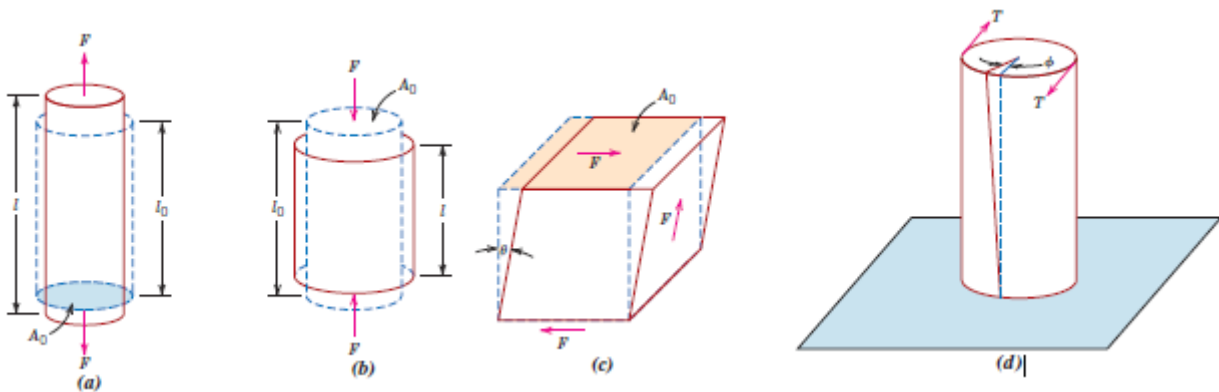


Figura 2.4 (a) Ilustração de uma tração (b) Ilustração de uma compressão (c) Ilustração de um cisalhamento (d) Ilustração de uma torção [38]

Nesta dissertação estudamos a possibilidade de um objeto ser ou não deformável por meio de uma câmara ToF e sensores de tato, encaminhando o nosso foco para a elasticidade dos materiais (uma das propriedades mecânicas dos materiais).

Quando um material elástico é deformado por causa de uma força exterior, o material oferece resistência. Essa resistência é interior e é responsável por restaurar o estado original do material quando a força externa deixa de atuar. Existem vários módulos de elasticidade, nomeadamente o módulo de Young, o módulo de cisalhamento e o módulo volumétrico. Em todos estes, as medidas estão inerentes às propriedades elásticas do material, tal como a resistência à deformação. Por exemplo, o módulo de Young é aplicado quando se quer estudar a extensão e a compressão do material, enquanto o módulo de rigidez é aplicado quando se quer estudar o cisalhamento do material.[14]

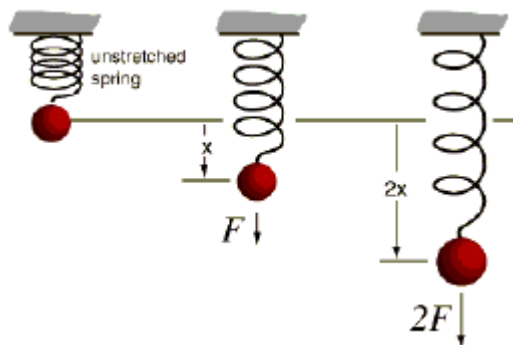


Figura 2.5 Demonstração da Lei de Hooke [39]

A elasticidade dos materiais é descrita pela curva de tensão-deformação, a qual demonstra a relação entre a tensão (a força interna restauradora média por unidade de área) e a deformação (deformação relativa)[15]. Para a maioria dos metais ou materiais cristalinos, a curva é linear para pequenas deformações, e a relação tensão-deformação pode ser descrita pela lei de Hooke. A lei de Hooke é um princípio físico que afirma que a força precisa para expandir ou para comprimir uma mola é proporcional à distância de compressão ou extensão.

Contudo, se a tensão ultrapassar o limite elástico (tensão mínima a partir da qual o objeto atinge uma deformação permanente) a relação deixa de ser linear. Para tensões maiores que o limite elástico, o material adota um comportamento plástico, ou seja, as deformações serão permanentes e, como consequência, o material não voltará à sua forma original quando a tensão deixa de ser aplicada [16]. Para um material tipo borracha, a curva tensão-deformação aumenta quanto maior for a tensão aplicada, o que significa que fica cada vez mais difícil esticar o material à medida que se vai aplicando mais tensão, acontecendo o inverso com os metais, ou seja, quanto maior for a tensão aplicada mais fácil fica de esticar.[17]

Existem dois tipos de relação tensão-deformação, o primeiro lida com materiais que são só elásticos para pequenas deformações. O segundo lida com materiais que não estão limitados a pequenas deformações. Para pequenas deformações, a medida de tensão usada é a tensão de Cauchy e para medir a deformação usa-se o tensor infinitesimal de força. Estes estão relacionados com a relação linear já anteriormente referida (lei de Hooke), e o resultado previsto do comportamento do material é estimado pela elasticidade linear.

A elasticidade linear aplica-se a muitos materiais elásticos como as molas mas, como referido anteriormente, apenas em pequenas deformações. A primeira versão da ideia foi formulada por Robert Hooke em 1675, e em 1678 publicou a resposta da relação linear conhecida por lei de Hooke [18], que estabelece a relação entre o deslocamento e a força através da seguinte equação:

$$F = -kx \quad (2.1)$$

Nesta equação, a variável k representa a constante elástica da mola, onde também ficou estabelecida a relação entre a deformação (ε) e a tensão (σ), onde E é o módulo de Young:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.2)$$

Esta dissertação tem como um dos objetivos o cálculo do módulo de Young, logo a compreensão do seu conceito é fundamental para entender o trabalho realizado. Como foi referido anteriormente, o módulo de Young aparece na equação da relação tensão-deformação e é uma das propriedades da elasticidade linear dos materiais sólidos que define a relação entre a deformação e a tensão num material. A sua unidade SI é o pascal e permite o cálculo da variação de dimensão de um material elástico e isotrópico (uniformidade em todas as direções quando está sujeito a uma tensão) sobre uma tensão ou cargas de compressão. Este módulo é capaz de prever qual é o máximo da compressão ou da extensão do material. Através da equação 2.2 é possível deduzir o módulo de Young:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{\Delta LA} \quad (2.3)$$

Onde,

A é a área de secção transversal onde é aplicada a força;

F é a força exercida no material;

ΔL é a diferença de comprimento entre o material antes e pós deformação;

L_0 é o comprimento original do objeto.

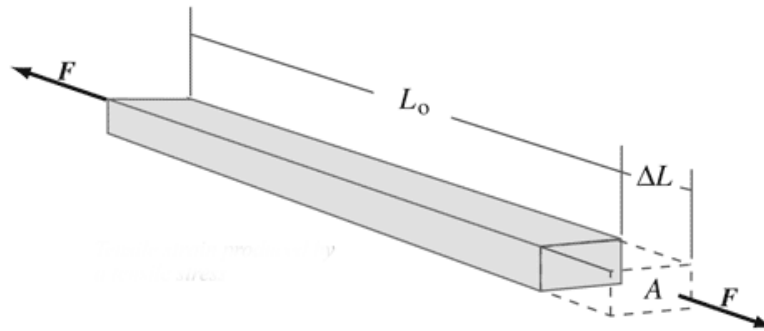


Figura 2.6 Ilustração das variáveis necessárias para o cálculo do Módulo de Young [40]

Mas para que um material seja descrito elástica e isotropicamente é necessário pelo menos mais um parâmetro, entre o módulo de cisalhamento, módulo volumétrico, e o coeficiente de Poisson, sendo o coeficiente de Poisson mais adequado ao trabalho desenvolvido.

O coeficiente de Poisson também conhecido por coeficiente de expansão na transversal axial, é o rácio negativo da deformação do transversal axial. Quando um material isotrópico é comprimido numa direção, este tende a expandir para duas direções perpendiculares na direção da compressão (efeito de Poisson). Por outro lado, se ao material for aplicada uma tensão extensora, este tende a contrair-se nas direções transversais à direção do alongamento, e.g. ao ser aplicada uma tensão extensora a uma borracha, esta vai ficando cada vez mais fina. Assim o coeficiente de Poisson será a proporção da contração relativa com a expansão relativa, e terá os mesmos valores que numa situação de compressão[19]. Este coeficiente pode ser definido pela seguinte equação:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (2.4)$$

Onde:

ν representa o coeficiente de Poisson

ϵ_x representa a deformação na direção do coordenada cartesiana x (transversal)

ϵ_y representa a deformação na direção do coordenada cartesiana y (transversal)

ϵ_z representa a deformação na direção do coordenada cartesiana z (longitudinal)

Em materiais isotrópicos, o coeficiente de Poisson tem uma gama de valores entre -1 e 0.5 mas, tipicamente, em materiais isotrópicos usados em engenharia a gama varia entre 0.2 e 0.5 [20], sendo que um coeficiente de Poisson de 0.5 indica que o material mantém uma conservação de volume perfeita, mas se esse valor for 0 significa que não houve de toda conservação do volume. No nosso caso como a tensão aplicada causa uma contração, Δd será uma deslocação perpendicular ao sentido da força, sendo d a largura do objecto e usando a equação 2.3, obtemos[7]:

$$\nu = \frac{L_0/\Delta L}{d/\Delta d} = \frac{L_0\Delta d}{d\Delta L} = \frac{EA\Delta d}{Fd} \quad (2.5)$$

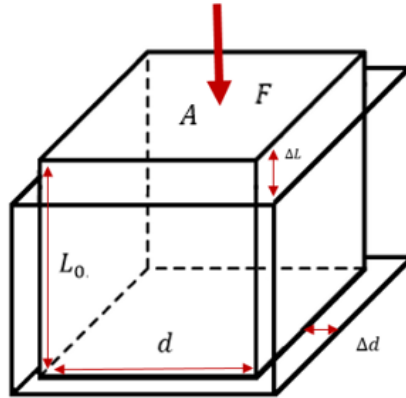


Figura 2.7 Ilustração das variáveis presentes na equação 2.3 e 2.5

A partir do módulo de Young e do coeficiente de Poisson é possível calcular o módulo de cisalhamento (G) e o módulo volumétrico (K) de um material isotrópico como é possível observar pelas equações 2.6 e 2.7. O módulo de cisalhamento é a propriedade elástica que caracteriza a mudança de forma quando aplicada uma força como a que está representada na figura 2.4 c). O módulo volumétrico mede a resistência do material a uma compressão uniforme.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.6) \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.7)$$

2.2 Sensor Barométrico – Takkstrip

Nesta dissertação decidimos estudar a Takkstrip e tentar saber se, com esta tecnologia, é possível chegar aos objetivos propostos. Este produto consiste em cinco sensores espaçados entre si por 8 mm e por um *microchip* que permite aceder à placa por PC sem conflitos de endereços.

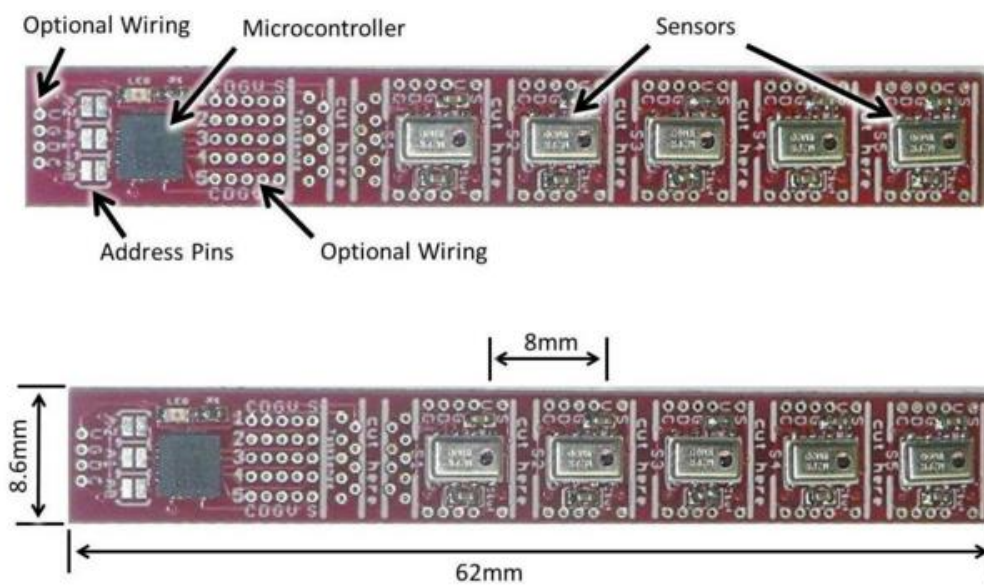


Figura 2.8 Takkstrip [10]

Os sensores poderão ser retirados da Takkstrip e conectados ao *microchip* (responsável pelo controlo de tráfego dos endereços). Cada sensor fornece informação da pressão aplicada e da temperatura a que o sensor se encontra. Estes sensores são denominados sensores barométricos tendo sido desenvolvidos para integrar produtos como estações meteorológicas de mesa e sistemas de GPS. São sensores de baixo

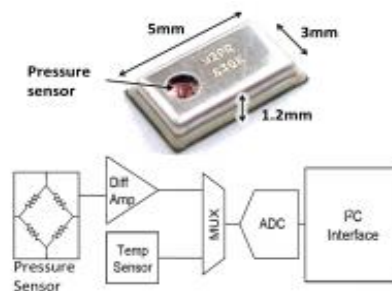


Figura 2.9 Sensor MPL115A2 e o diagrama de blocos do dispositivo [22]

consumo e produzidos em massa a baixo custo. Como já foi referido anteriormente, estão incorporados com o protocolo de bus I²C [21]. Este sensor tem incorporado um orifício de ventilação relativamente largo (1 mm de diâmetro) onde se encontra o sensor de pressão.

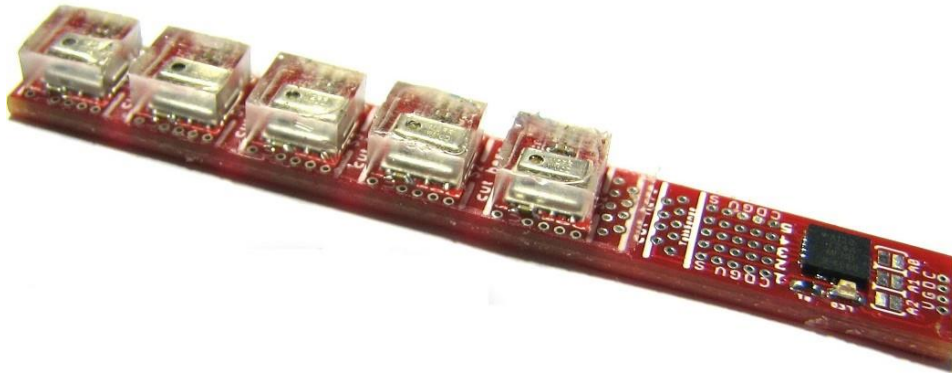


Figura 2.10 Takkstrip fundidos com a VitaFlex 20. Alterada de [10]

A sensibilidade destes sensores varia consoante a rigidez e a espessura da borracha aplicada sobre o sensor barométrico. A borracha usada nestes sensores é a *VytaFlex 20* e tem uma espessura de 3.5 mm.[10][22]

2.2.1 Comparação da Takkstrip com Sensores Similares

Existem sensores no mercado que podem ser aplicados da mesma forma como a Takkstrip foi usada nesta dissertação. Entre os demais são destacados o *BioTac*, o array táctil de *Weiss*, e o array capacitivo *DigiTact* [23]. Todos os anteriores contêm características iguais ou superiores ao da Takkstrip e conseguem, por exemplo a *Biotac*, fornecer dados como a deteção de vibrações e fluxo de calor. Todos estes sensores são bastante caros, com um custo superior a 500 € e a Takkstrip tem um custo de aproximadamente 180 €.

Sendo a Takkstrip bastante precisa com uma resolução de <0.01 N, com uma frequência de saída de 100 Hz, contendo cinco sensores que podem ser destacados da Takkstrip e com um custo de menos de 50% que as alternativas, torna esta tecnologia adequada para o trabalho desenvolvido.

2.3 Câmara de Tempo de Voo 3D (ToF)

A câmara 3D ToF é uma tecnologia que fornece uma imagem 3D usando um *array* de pixéis CMOS de baixo custo combinado com um fonte de luz ativa modular. Geralmente são câmaras compactas, fáceis de usar e de elevado *frame-rate*, o que faz destas uma boa solução para inúmeras aplicações.

Estas câmaras funcionam com uma cena iluminada através da sua fonte de luz modular. A diferença de fase entre a iluminação e a reflexão é medida e traduzida em distância.

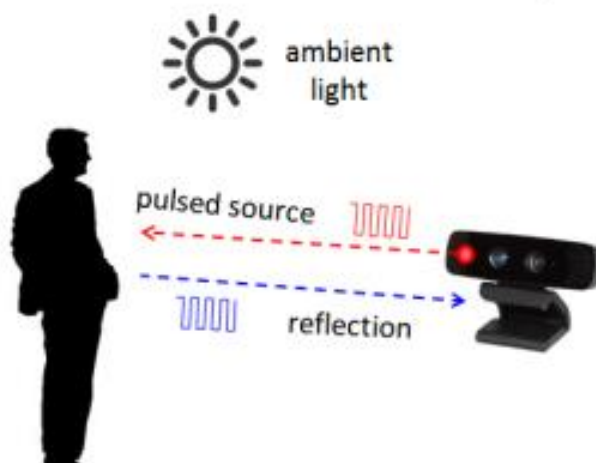


Figura 2.11 Operações de uma câmara 3D ToF [24]

Tipicamente, a iluminação é proveniente de um laser ou de um LED operando na zona dos infravermelhos ($\sim 850\text{nm}$), invisível para o olho humano. Estão também equipadas com um sensor de imagem que irá receber a luz e posteriormente converter a energia fotónica em corrente eléctrica. A luz recebida pelo sensor tem duas componentes, uma componente refletida e uma componente de ambiente. A informação da distância (profundidade) é incorporada na componente refletida.

Para detetar a diferença de fase entre a iluminação e a reflexão, a fonte de luz é pulsada ou modulada por uma CW (*Continuous-Wave*), tipicamente sinusoidal ou quadrada, sendo a última a mais comum por ser mais facilmente aplicável em circuitos digitais. A modulação pulsada pode ser obtida ao integrar fotoeletrões da luz refletida ou iniciar um contador rápido a partir da primeira deteção da reflexão mas, para este contador é necessário um foto-detetor muito rápido, sendo usualmente usado um SPAD (*Single-Photon Avalanche Diode*).

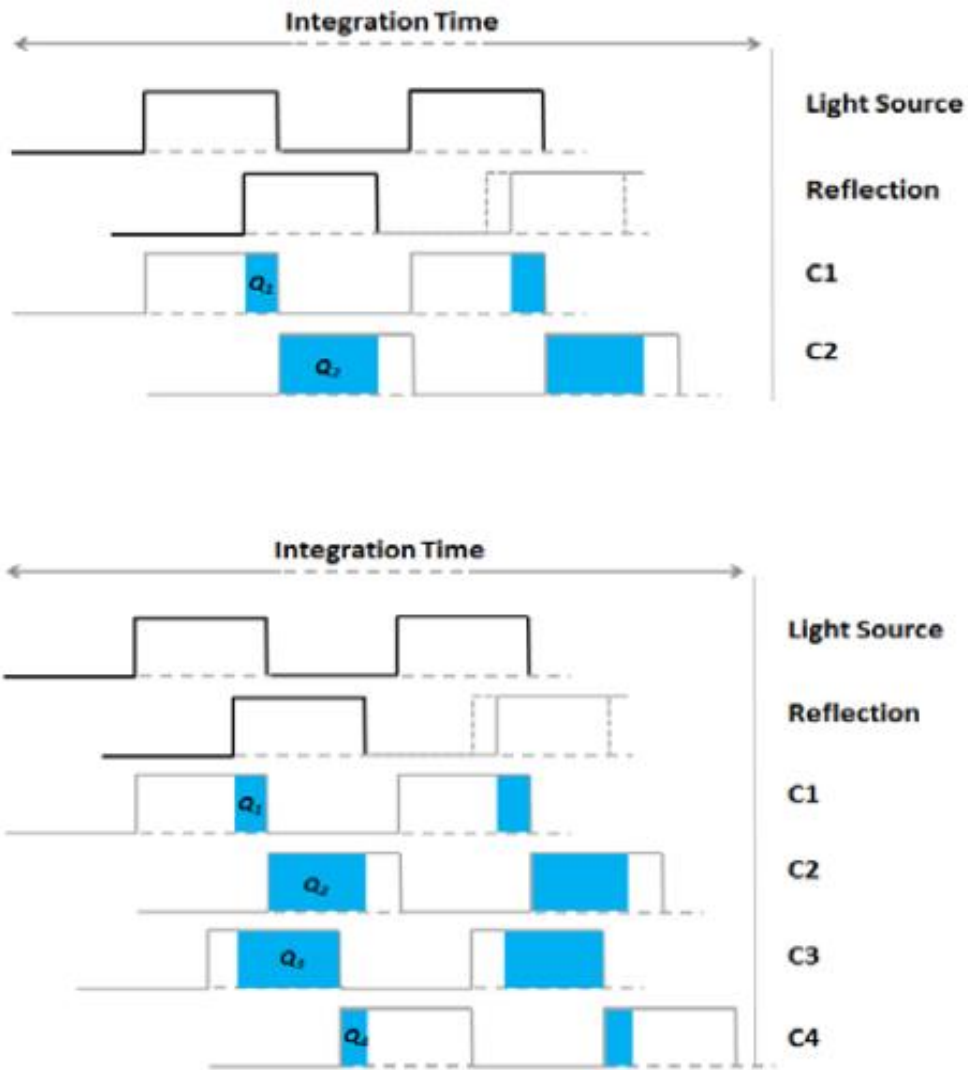


Figura 2.12 Dois métodos ToF: pulsado (cima) e de CW (baixo)

O método pulsado é direto, a fonte de luz ilumina por um breve período (Δt), e a energia refletida é amostrada a cada pixel, em paralelo, usando duas janelas *out-of-phase*, C1 e C2, com o mesmo (Δt). As cargas elétricas acumuladas durante as amostragens (Q_1 e Q_2) são medidas e usadas no cálculo de distâncias (d) usando a fórmula (c é a constante da velocidade da luz):

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (2.8)$$

Por outro lado, o método CW suporta várias amostras por medida, com cada amostra desfasada por 90° , num total de quatro amostragens. Usando esta técnica, a fase angular entre a iluminação e a reflexão (ϕ) e a distância (d) podem ser calculadas através da seguinte fórmula:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q3 - Q4}{Q1 - Q2}\right) \quad (2.9)$$

$$d = \frac{c}{4\pi f} \varphi \quad (2.10)$$

Segue-se então a medida da intensidade do pixel (A) e do *offset* (B) que é calculada através de:

$$A = \frac{\sqrt{(Q1 - Q2)^2 + (Q3 - Q4)^2}}{2} \quad (2.11)$$

$$B = \frac{Q1 + Q2 + Q3 + Q4}{4} \quad (2.12)$$

À primeira vista, a complexidade do método CW comparado com o método pulsado pode parecer injustificado mas, analisando as equações do método CW, compreende-se que os termos, $(Q3 - Q4)$ e $(Q1 - Q2)$ reduzem o efeito da constante de *offset* das medidas. O quociente na equação da fase reduz o efeito das constantes do ganho das distâncias medidas, como um sistema de amplificação e atenuação. A amplitude refletida (A) e o *offset* (B) têm um impacto na exatidão da medida da profundidade [24].

2.3.1 PMD CamBoard nano

A *Photonic Mixer Device* (PMD) é um sensor semiconductor recente criado pelo Professor R. Shwarte para a S-TEC GmbH em 1997. Tal como as convencionais câmaras ToF, a CamBoard Nano mede a distância através do desfasamento entre a luz emitida e recebida. É assegurado que a distância entre o sensor de imagem PMD e o objeto, é a mesma que a do objeto à ótica recetora da PMD, para que o cálculo da distância ao objeto seja simplesmente a medida do comprimento a dividir por 2.

A PMD CamBoard Nano foi desenhada essencialmente para o reconhecimento de gestos, com um FoV de 90° horizontal por 68° vertical, com 90 fps, com uma gama de profundidade entre os 5 e os 50 cm. As dimensões da câmara são de 37 mm por 30 mm por 25 mm e, com um peso de 34 g, a câmara usa um LED (*OSRAM Dragon SFH4235*) e um sensor (*pmd PhotonICs 19k-S3* com SBI) o que permite o fornecimento de quatro tipos de dados por pixel (amplitude, profundidade, *flag* e coordenadas cartesianas em XYZ) e uma resolução de 165 por 120 pixéis. Ao contrário das versões anteriores das câmaras ToF da PMD CamBoard, tem um valor 30 MHz inalterável para a frequência de modulação, o que se pode transmitir numa desvantagem caso seja necessário melhorar a gama de profundidades ou operar com múltiplas câmaras ToF em simultâneo.

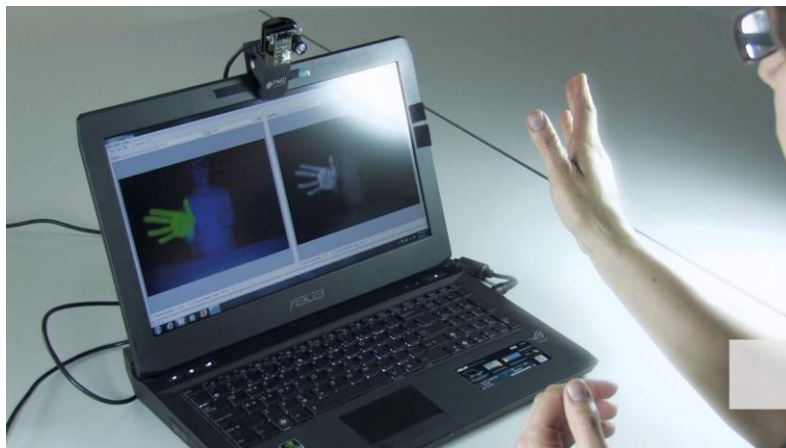


Figura 2.13 PMD CamBoard nano em funcionamento [9]

O valor da profundidade retornado especifica a distância entre a linha de vista e o objeto observado. Não é a altura do sensor acima do plano mas a distância diagonal do sensor ao ponto do plano. O valor da amplitude diz respeito à intensidade do sinal, onde é descrita a quantidade de luz modulada recebida. Este valor é independente da luz ambiente, pois só é recebida a luz do LED IR da CamBoard Nano, sendo esta uma das grandes vantagens desta câmara, pois consegue operar em ambientes de muita e de pouca luz. O valor da flag dá informação quanto à precisão do pixel, podendo variar entre inválido, saturado, baixo sinal ou inconsistente. Por fim, o valor das coordenadas XYZ fornece uma matriz das coordenadas calculadas da medida da distância do pixel num *array* de dados (x_n, y_n, z_n) [25].

A CamBoard Nano é um sensor ativo, ou seja, este tem uma fonte emissora de luz (LED IR). A luz emitida é então refletida numa superfície, e devolvida para o sensor de

imagem. O tempo e a qualidade do sinal recebidos são interpretados para produzir o mapa de profundidades. Este tipo de dispositivos requer uma alta distância mínima e pouca precisão devido à iluminação num único ponto. O embutimento do SBI é o que permite a esta câmara trabalhar tanto em ambiente com muita luz como com pouca. Quando a medição está a ser realizada a SBI intervém e assegura que só os fotoeletrões são detetados da luz modulada em cada pixel [26]. Isto é o que distingue a PMD CamBoard nano de muitas outras câmaras ToF, por exemplo a Microsoft Kinect, que é altamente afetada pela luz solar.[27]

2.3.2 Comparação da PMD CamBoard nano com câmaras similares

Devido à diversidade de aplicações desta tecnologia foram desenvolvidos muitos tipos de câmaras ToF. Na tabela A.2 é apresentada uma visão geral sobre as principais câmaras disponíveis.

Nesta tabela é possível observar dois modelos mais recentes que a PMD *technologies* lançou, a PMD CamCube e a CamBoard pico^S (existe um modelo mais recente da CamBoard pico, denominada de pico flexx).

Verifica-se que a Leap Motion é a câmara com melhores características, superando a PMD CamBoard nano tanto ao nível do campo de visão (150 por 120° contra os 90 por 68° da CamBoard nano) como ao nível da resolução (640 por 240 contra os 165 por 120 pixéis da CamBoard nano).

2.4 Raspberry Pi

O RPi é um computador do tamanho de um cartão de crédito de baixo custo onde se pode ligar um monitor ou uma TV, um teclado e um rato. É capaz de fazer praticamente tudo o que um computador normal faz, desde navegar na internet a ver vídeos em HD.

Este minicomputador também tem a capacidade de interagir com o mundo exterior e pode ser usado em vários tipos de projetos digitais, desde máquinas musicais a estações meteorológicas. [28]

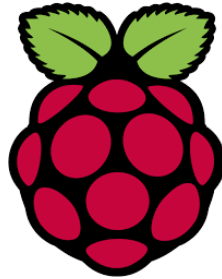


Figura 2.14 Símbolo do RPi [41]

2.3.3 RPi 2 B

O RPi 2 Modelo B representa um grande aumento de desempenho em relação ao modelos anteriores: cerca de 6 vezes mais rápido do que estes. Além disso, houve melhoramento no processador, sendo usado o Cortex-A7 de quatro núcleos e na memória RAM, possuindo 1Gb. Todas as restantes características são iguais às do modelo RPi B+.

Ao nível do *software*, o RPi 2 B consegue suportar vários *distros* Linux (Raspbian, Snappy Ubuntu Core e toda a gama de ARM GNU/Linux) e o Windows 10.

Foi mantida a compatibilidade de *hardware* e *software* com as anteriores versões do RPi - Modelo A+ / B+.

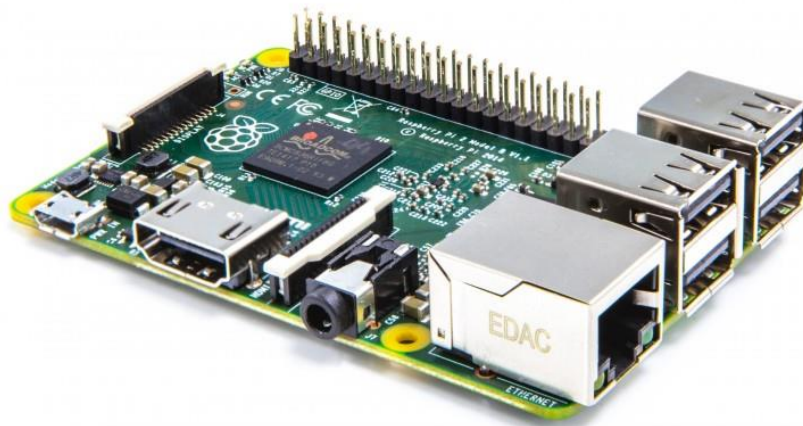


Figura 2.15 Raspberry Pi 2 B [42]

Características:

Chip: Broadcom BCM2836 ARMv7 Quad-Core a 900 MHz

RAM: 1GB SDRAM @ 450 MHz

Armazenamento: MicroSD

Portas USB: 4 x USB 2.0

Porta LAN: 1 x 10/100Mbps

HDMI: 1 x HDMI 1.4 (full size)

Áudio: 1 x Áudio In/Out

Consumo de energia / Voltagem: 1.8A @ 5V

GPIO: 40 pinos

Custo: 40€

Capítulo 3

Desenvolvimento

Este capítulo aborda o trabalho desenvolvido ao longo do projeto. Começa por apresentar os procedimentos de calibração dos sensores de pressão embutidos na Takkstrip e da calibração da PMD CamBoard nano. Posteriormente são abordadas, através de um esquema a ligação entre os dispositivos e a descrição do *software* desenvolvido para a abordagem de diferenciação em tempo real de um material deformável de um material rígido, e para a abordagem onde é efetuada uma reconstrução 3D do objeto durante a sua deformação e o cálculo dos parâmetros de elasticidade do objeto em estudo.

3.1 Calibração da PMD CamBoard Nano

O sensor de imagem contém uma pequena lente *fish-eye* (lente de pequena distância focal que fornece um grande ângulo de visão. Esta produz uma grande distorção visual em que a imagem aparece curva, com abaulamento do centro para as extremidades da imagem [29]) o que causa distorção e faz com que seja necessária uma calibração de forma a remover a distorção e a obter um mapa de profundidades preciso. A calibração permite a conversão da distância em coordenadas 3D.

Devido à produção em massa da CamBoard nano, os dados de calibração de origem poderão não ser os mais corretos, sendo então necessário uma recalibração para cada câmara de forma a aumentar a precisão. O método de calibração usado foi através do quadro de xadrez impresso como demonstra a figura 3.1, e o *software* de calibração *MetriCalibrate Intrinsic 1.5.0.0*, *software* que está especializado para calibrar vários tipos de câmara incluindo a PMD CamBoard nano. Foi usada uma versão *demo* deste *software* e, após calibração só foi possível aceder aos valores de cx e cy , sendo estes parte dos parâmetros intrínsecos da câmara como as coordenadas do ponto principal, sendo

usualmente o centro da imagem. Para alterar o ficheiro de calibração de origem, foi usado um *software* denominado de *Lens Tool 0.9*.

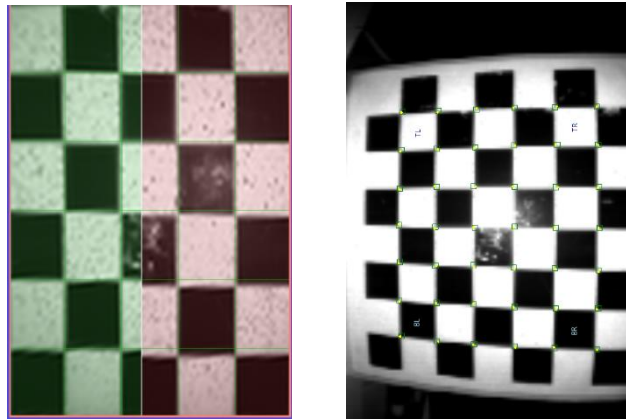


Figura 3.1 Imagens fornecidas pelo *MetriCalibrate Intrínscic 1.5.0.0* do xadrez. Comparação entre a imagem distorcida (vermelho) e a imagem calibrada (verde) (esquerda) e o xadrez usado para a calibração (direita)

3.2 Calibração dos sensores de pressão

Os sensores de pressão estão integrados nos sensores barométricos embutidos na Takkstrip descrita na secção 2.2. A Takkstrip está conectada ao RPi 2 B através do protocolo de ligação I²C. Esta ligação será posteriormente analisada na secção 3.3. No RPi 2B foi usado um *software* em Python que faz a receção dos dados da Takkstrip e os envia para o terminal, onde podemos observar em tempo real as leituras da pressão e temperatura em cada um dos cinco sensores barométricos. Nesta dissertação optamos por fazer a calibração de apenas um dos sensores, pois as abordagens supõem apenas um sensor. O primeiro sensor da Takkstrip na vista do *microchip* foi o escolhido.

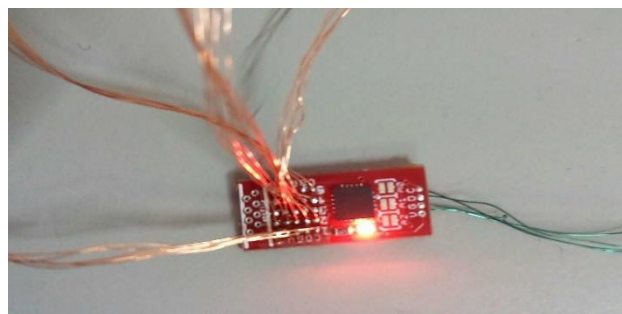


Figura 3.2 Takkstrip após corte e solda dos sensores

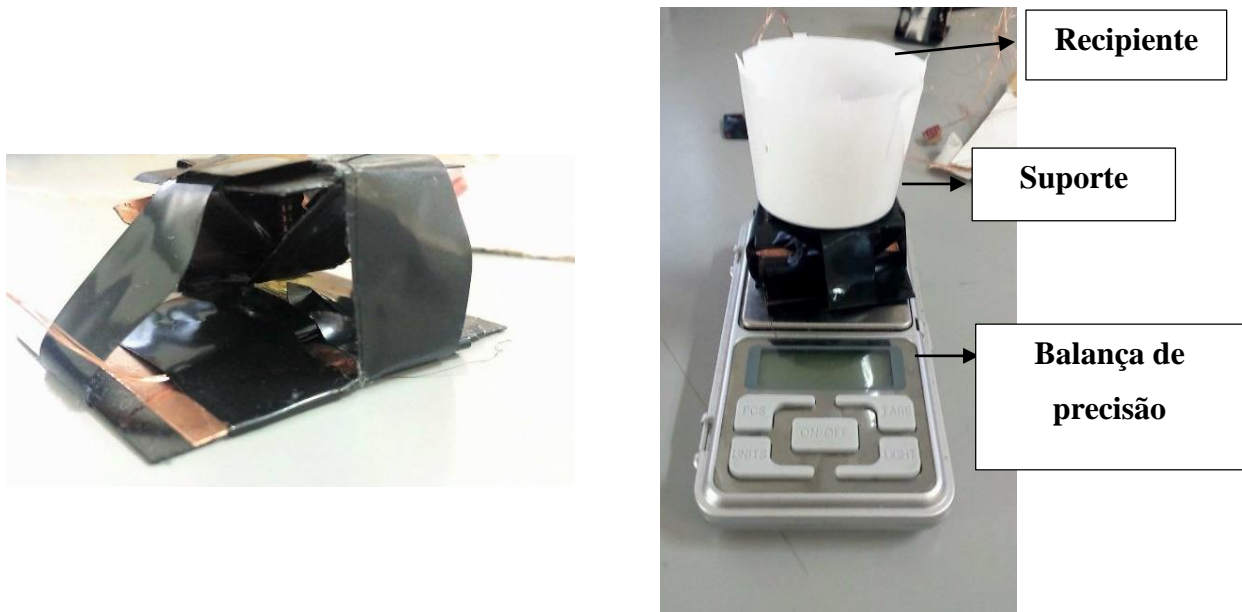


Figura 3.3 Ligação I²C entre o RPi e a Takkstrip (topo) e a ilustração do circuito (base)

Antes da calibração foram feitos os cortes de cada um dos sensores da Takkstrip e posteriormente soldados aos orifícios destinados ao efeito na mesma, como pode ser visto na figura 3.2.

Para a realização da calibração foi contruído um suporte, como é possível visualizar na figura 3.3, que permite centralizar o peso num só ponto evitando assim a necessidade de calibrar o sensor em cada utilização. Na parte superior do suporte foram colocados objetos de pesos diferentes, incluindo um recipiente com água de forma a conseguir uma variação de peso controlada, e na parte inferior do suporte foi colocada uma balança onde era confirmado o valor do peso. Na tabela 3.1 podem-se visualizar os valores dos pesos utilizados e o respetivo valor apresentado pelo sensor, sendo os valores recebidos do sensor uma média realizada de 19 medições para cada peso usado e o RSME correspondente a cada um. O RSME ou *root-mean-square error* representa o desvio padrão das diferenças entre o valor de referência e os valores medidos.

Na figura A.2 está representado o diagrama de caixa (vulgarmente conhecido por gráfico de bigodes ou *boxplot*) das medições realizadas pelo sensor de pressão. Este diagrama tem como objetivo localizar e analisar a variação de uma variável num grupo de dados. Neste gráfico podemos verificar que existem poucos *outliers* (pontos que estão fora da caixa e dos *whisker* ou bigodes), sendo presentes somente em cinco dos pesos. Quanto ao valor da mediana (representada por um linha no interior da caixa), é possível observar que a maioria está no meio da caixa o que indica uma distribuição dos dados

simétrica, sendo que nas amostras de 3.7, 17, 36.6 e 50.9 g, é apresentada uma assimetria positiva, e nas amostras 10.9, 30.3, 57.5 e 74.2 g uma assimetria negativa.

Pesos (g)	Medidas do Sensor	RSME
0	254	6,23164
3,7	234	1,748015
8,9	219	0,971825
10,9	213	3,439961
11,9	208	1,452966
17	182	2,645751
22,4	178	1,490712
24,4	170	2,538591
25,7	162	3,937004
29,4	154	2,603417
30,3	136	6,63325
36,6	120	13,49691
45,2	91	8,615232
50,9	72	14,91457
57,5	56	8,93495
70,7	18	1,972027
74,2	5	10,12697
81	-6	4,898979
83	-9	9,043107
87	-14	0,816497

Tabela 3.1 Média dos valores recebidos pela Takkstrip em função dos pesos e o RSME correspondente

Na figura A.1 podemos observar a reta das médias das 19 medidas efetuadas para cada um dos pesos e o seu *spline*, e a equação de regressão polinomial de 3º grau que foi usada para a leitura do sensor no *software* desenvolvido.

A equação da regressão polinomial graficamente representada na figura A.1 é a seguinte:

$$y = -0.00002380954x^3 + 0.0011665250188x^2 - 0.4591773209x + 78.48950509$$

(3.1)

O cálculo desta regressão deu origem a um RSS (*Residual Sum of Squares*) de 36.22763668, sendo este o desvio previsto da estimação dos valores dos dados empíricos. Pode-se considerar um valor ainda significativo tornando este modelo pouco robusto, podendo-se justificar com o uso de um suporte um tanto rudimentar e da grande variação

que o sensor tem consoante o local de pressão aplicada na borracha embutida sobre o mesmo. Apesar de ser possível aumentar o grau polinomial da regressão tornava o tempo de computação maior, prejudicando assim as propostas de solução desenvolvidas para os objetivos definidos. Podemos verificar que a gama de pesos que o sensor de pressão suporta com esta calibração é das 0 às 87g.

3.3 Ligação entre o RPi e a Takkstrip

A Takkstrip tem como protocolo de comunicação o I²C, tornando-se um dos fatores de seleção para a escolha do RPi, pois suporta este protocolo com a vantagem de ter um SO integrado que permite ao desenvolvimento de *software* necessário para conseguir aproveitar da melhor forma as características da Takkstrip.

Na figura 3.4 é possível ver o circuito necessário para a obtenção de dados da Takkstrip, onde foram utilizadas duas resistências *pull-up* de 4.7 k Ω , indispensáveis neste protocolo de ligação.

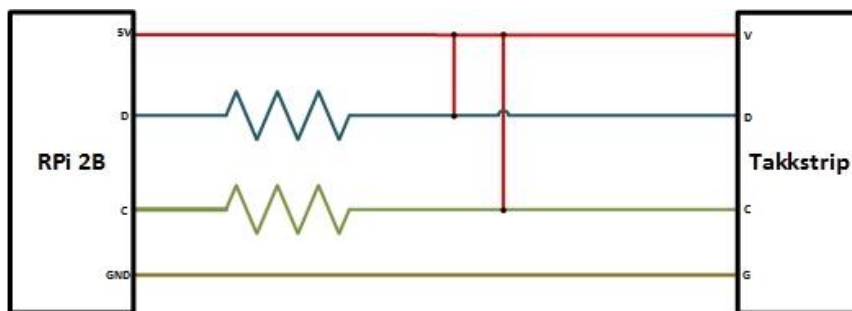
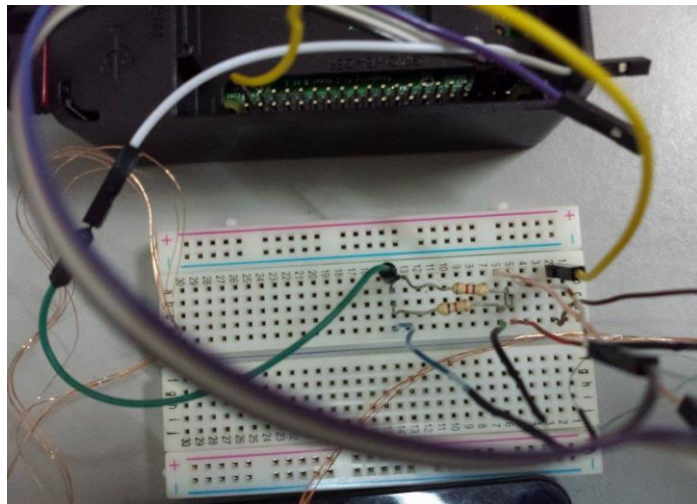


Figura 3.4 Suporte desenvolvido para a calibração e uso do sensor barométrico (esquerda) e método de calibração usando uma balança de precisão (direita)

3.4 Cálculo dos Parâmetros de Elasticidade de Objetos

3.4.1 Pipeline do Sistema

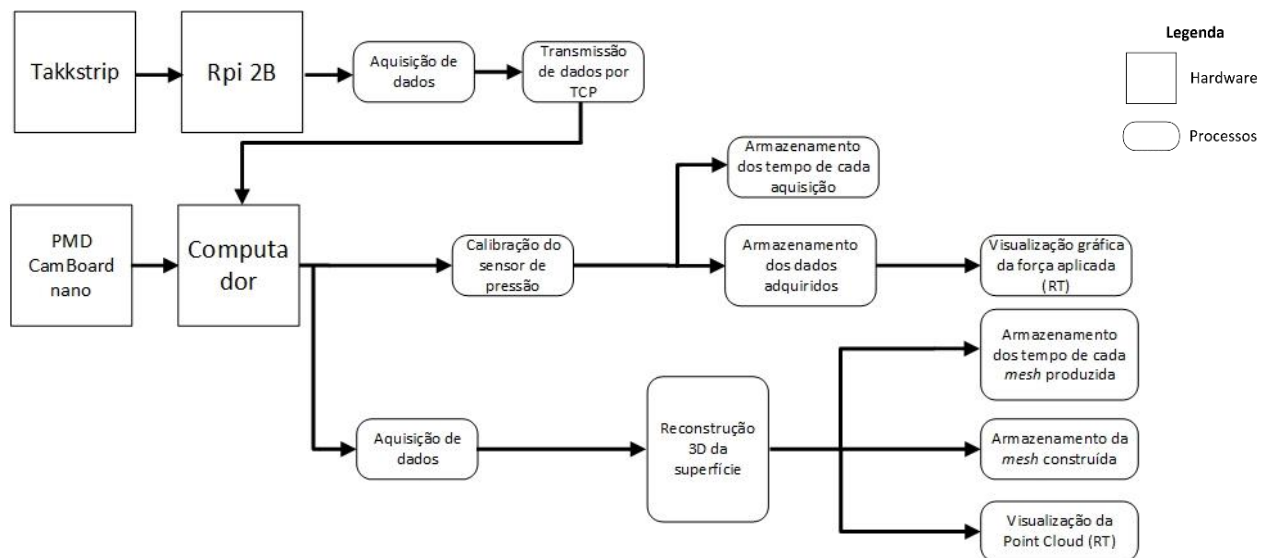


Figura 3.5 Pipeline do sistema desenvolvido para o cálculo dos parâmetros de elasticidade

3.4.2 Aquisição e transmissão de dados da Takkstrip

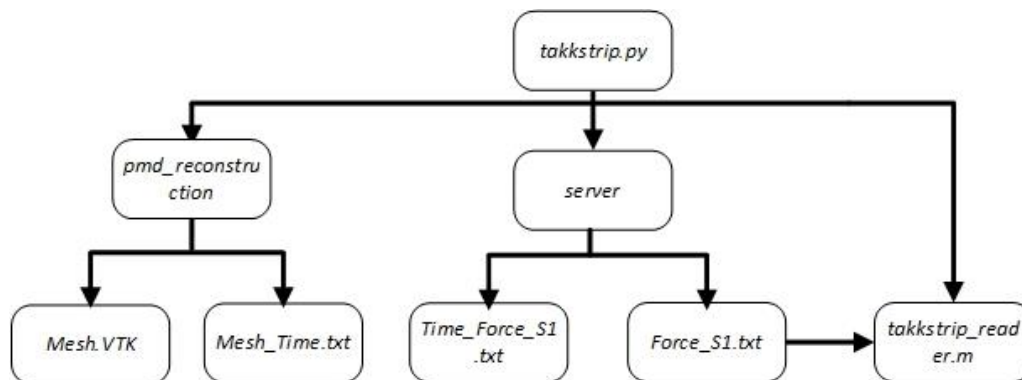


Figura 3.6 Ilustração hierárquica dos programas desenvolvidos para o cálculo dos parâmetros de elasticidade e as suas dependências

Como descrito na secção 3.4.1, a aquisição de dados da Takkstrip é realizada através do RPi 2B, e é neste dispositivo que foi adaptado um *script* desenvolvido em Python [30] denominado de *takkstrip.py* que faz a leitura dos cinco sensores barométricos presentes na Takkstrip, dando informação da pressão em cada um deles. A este *script* foram adicionados dois portos de comunicação e um IP que, através do protocolo de comunicação TCP, envia os dados da pressão dos sensores são enviados. Este ficheiro é

o que inicia todo o sistema, ou seja todos os outros programas só iniciam quando este for executado. A figura 3.6 representa de forma hierárquica como os ficheiros estão organizados.

As dependências estão organizadas desta forma para permitir uma sincronia entre os sensores e a câmara ToF. Foi realizado um teste de forma a perceber se havia alguma diferença entre os contadores do *server*, *pmd_reconstruction* e *takkstrip_reader.m*. Como se pode verificar pela figura 3.7, a maior diferença pode ser observada entre o contador do *pmd_reconstruction* e o contador do *server*, com uma diferença aproximada de 0.4 segundos. Confirma-se ainda que o contador do *takkstrip_reader.m* tem um valor mais próximo do contador do *pmd_reconstruction* tendo uma diferença de apenas de 0.1 segundos.

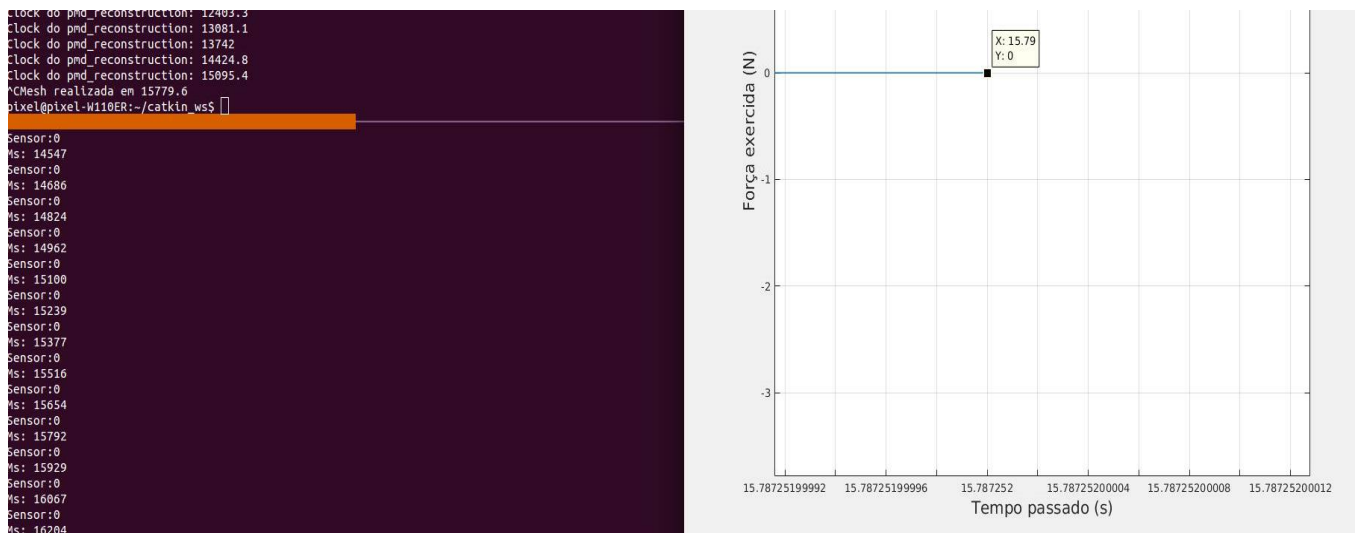


Figura 3.7 Demonstração das diferenças entre os contadores de "server", "pmd_reconstruction" e "takkstrip_reader.m"

Este teste foi conseguido através da interrupção do *pmd_reconstruction*, que consequentemente irá interromper o *server* devido à sua dependência com o *takkstrip.py*, que é interrompido caso o *server* ou o *pmd_reconstruction* também sejam interrompidos, devido ao protocolo TCP que estes partilham. O *takkstrip_reader.m*, como depende do ficheiro de texto *Force_S1.txt* para a visualização gráfica em tempo real da força aplicada pelo sensor, não é interrompido pois fica à espera que novos dados sejam escritos no ficheiro de texto provido pelo *server*, sendo possível visualizar qual o último valor e o tempo em que foi adquirido pelo sensor. Estas dependências podem justificar de certa forma estas discrepâncias entre os contadores, devido à ordem em que os programas são interrompidos.

A frequência de amostragem dos dados obtidos pela Takkstrip é de aproximadamente 7 Hz e do pacote ROS desenvolvido *pmd_reconstruction* é de 0.4 Hz.

3.4.3 Receção, calibração e armazenamento de dados provenientes do RPi 2 B

Este programa denominado de *server* foi desenvolvido em C++ e, após a execução, este só inicia a suas funções quando o RPi envia os dados, ou seja, pode ser iniciado antes da transmissão de dados por parte do RPi, mas ficará em espera até que tal aconteça. Este programa tem como um dos objetivos receber as leituras dos sensores através do protocolo TCP, onde este tem configurações de servidor, e quando este acusa a primeira receção, é iniciado um contador.

Nesta dissertação é apenas usado um dos cinco sensores de pressão, tendo sido realizada a calibração só para um deles e, quando a leitura dos sensores é recebida somente a primeira leitura do sensor de pressão do sensor barométrico da Takkstrip é ajustado com a equação de regressão polinomial de 3º grau calculada e referida na secção 3.2.

Após o ajuste do valor do sensor de pressão, este valor é guardado num ficheiro de texto *Force_S1.txt*. É também registado o valor do tempo, após o início do contador, de cada aquisição num outro ficheiro de texto denominado de *Time_Force_S1.txt*.

3.4.4 Aquisição da nuvem de pontos e a reconstrução 3D da superfície

A PMD CamBoard nano é conectada ao computador por uma ligação USB. Nesta abordagem a aquisição foi realizada através de um pacote de ROS [31], que permite usar em tempo real a nuvem de pontos 3D gerada pela câmara.

A PCL é uma ferramenta bastante poderosa e útil no tratamento de nuvem de pontos. Esta dispõe de uma numerosa biblioteca de algoritmos, incluindo algoritmos de filtragem, reconstrução de superfícies, registo, segmentação e modelos de ajustamento. Estes algoritmos podem ser usados para filtrar os *outliers* de dados com muito ruído, extração de *keypoints*, criação de superfícies de nuvem de pontos, entre muitas outras. Esta ferramenta é transversal a várias plataformas, podendo ser usada em ambientes operativos como Linux, Windows, MacOS e Android/iOS. Pode também pode ser

combinada com o *software* ROS, tornando-se essencial para o desenvolvimento desta abordagem [32]. Na figura 3.8 podemos observar como esta biblioteca está organizada

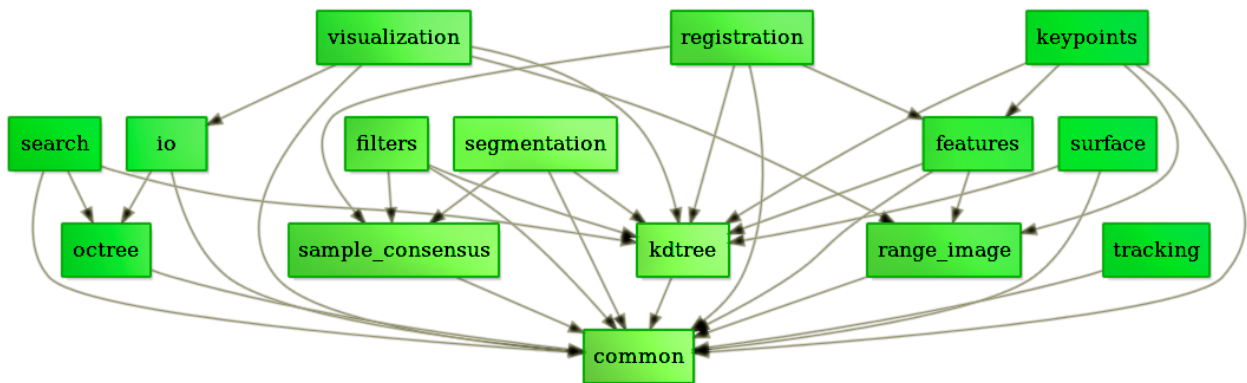


Figura 3.8 Esquema ilustrativo dos módulos e das suas dependências da biblioteca PCL [43]

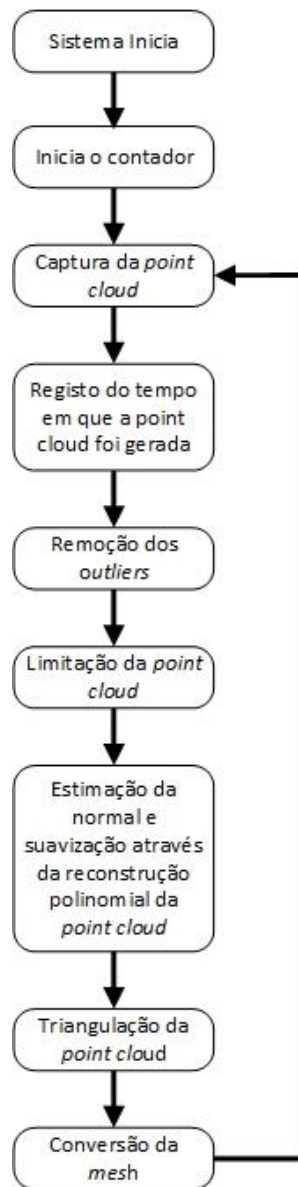


Figura 3.9 Esquema demonstrativo do funcionamento do pacote ROS "pmd_reconstruction"

Este pacote ROS denominado de *pmd_reconstruction*, foi desenvolvido em C++ e com o auxílio da PCL. Este tem o mesmo *modus operandi* do programa *server* descrito na secção 3.4.3, ou seja, pode ser executado, mas só iniciará a captura da nuvem de pontos proveniente da PDM CamBoard nano após o *takkstrip.py* ser executado, iniciando um contador na primeira iteração. Isto permite assim uma sincronização entre as *frames* capturadas pela câmara e as leituras dos sensores de pressão da Takkstrip.

Existem vários estudos sobre reconstrução de superfície 3D através dos módulos da PCL [33], [34], sendo a reconstrução proposta nesta dissertação baseada por estes métodos.

A reconstrução 3D da imagem capturada pela câmara realizou-se em quatro fases: remoção dos *outliers*, limitação, estimação da normal e suavização baseada em reconstrução polinomial e triangulação da nuvem de pontos.

Os *outliers* são pontos não desejados que estão espalhados pela nuvem de pontos, como mosquitos numa fotografia de família. Estes normalmente estão associados a imprecisões por parte do sensor de imagem, e são considerados como ruído indesejado porque introduzem erros nos cálculos, como por exemplo na estimação da normal. Ao retirar estes pontos indesejados o processamento da nuvem de pontos torna-se não só mais rápido como também mais preciso. Nesta dissertação usamos o filtro *RadiusOutlierRemoval* fornecido pela PCL, sendo os seus parâmetros de entrada a nuvem de pontos a que se quer retirar os *outliers*, o raio de procura e um número mínimo de pontos vizinhos que um ponto tem que ter para não ser considerado *outlier*.

Após a remoção dos *outliers* é efetuada a limitação da nuvem de pontos. Esta é obtida com o auxílio do filtro *PassThrough* da PCL, que permite remover os pontos que não estão nos limites definidos, e assim ajustar a nuvem de pontos em qualquer coordenada. Este filtro aceita parâmetros de limite máximo e mínimo ao longo das coordenadas cartesianas (x, y, z) , além da nuvem de pontos que se quer limitar.

A estimação da normal e suavização através da reconstrução polinomial foi obtida através da classe *MovingLeastSquares* da PCL. Este algoritmo tem como objetivo retirar irregularidades das nuvem de pontos que normalmente são muito difíceis de corrigir através da análise estatística. Este método reconstrói funções contínuas de um conjunto de pontos desorganizados através do cálculo das medidas dos mínimos quadrados.

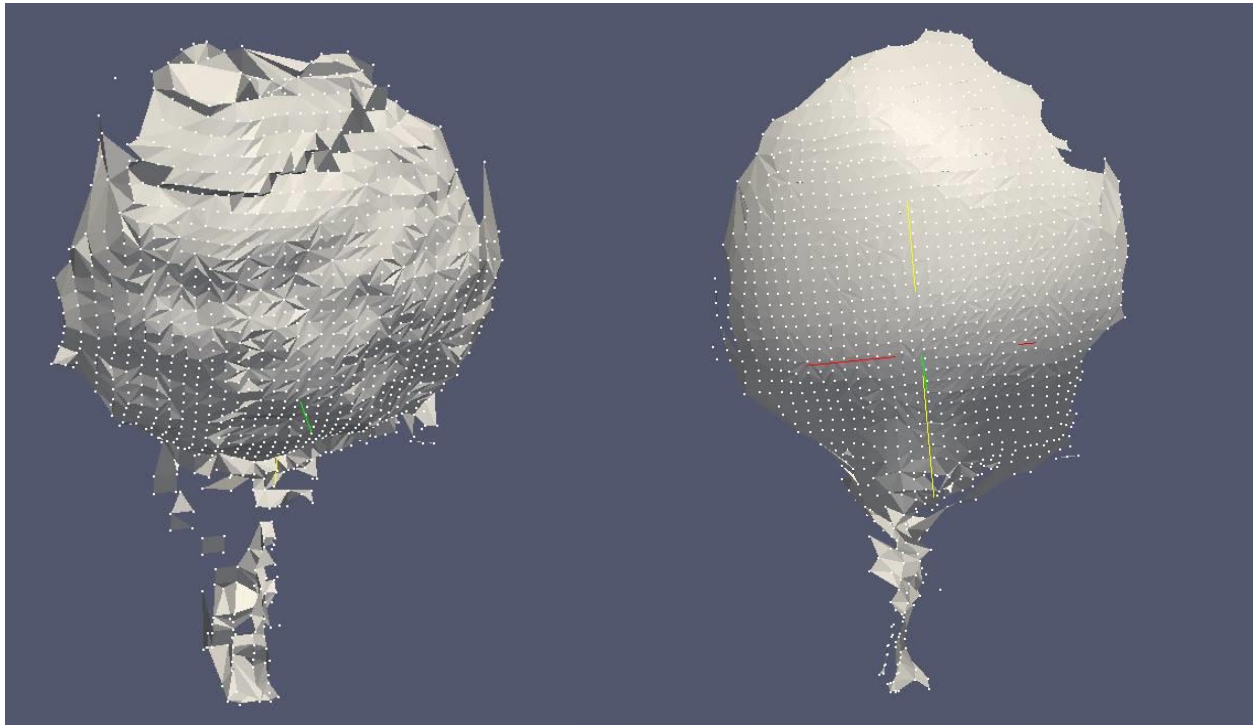


Figura 3.10 Triangulação com (direita) e sem (esquerda) a aplicação do filtro *MovingLeastSquares*

Por fim é realizada a triangulação. Esta consiste na estimação de superfície capturada pela nuvem de pontos, conectando uns pontos aos outros, finalizando numa *mesh* de polígonos (triângulos). Esta triangulação é iniciada com a estimação das normais da nuvem de pontos, usando posteriormente o método *GreedyProjectionTriangulation* onde são inseridos parâmetros como o raio de procura, número de pontos vizinhos, distância relativa até ao ponto mais próximo e o ângulo mínimo e máximo de cada triângulo. Após a triangulação é realizada uma conversão da *mesh* em VTK e guardada nesse formato de forma a ser analisada posteriormente.

Quando o pacote é executado, cria automaticamente um ficheiro de texto denominado de *Mesh_Time.txt*, onde são armazenados os tempos em que cada *mesh* é gerada. Isto irá permitir no pós processamento dos dados, saber que força estava a ser aplicada no momento em que a *mesh* foi gerada e comparar com o contador sincronizado da leitura dos sensores de tato e relacionar assim o tempo em que a *mesh* foi gerada à força aplicada nesse instante em que a *mesh* foi gerada.

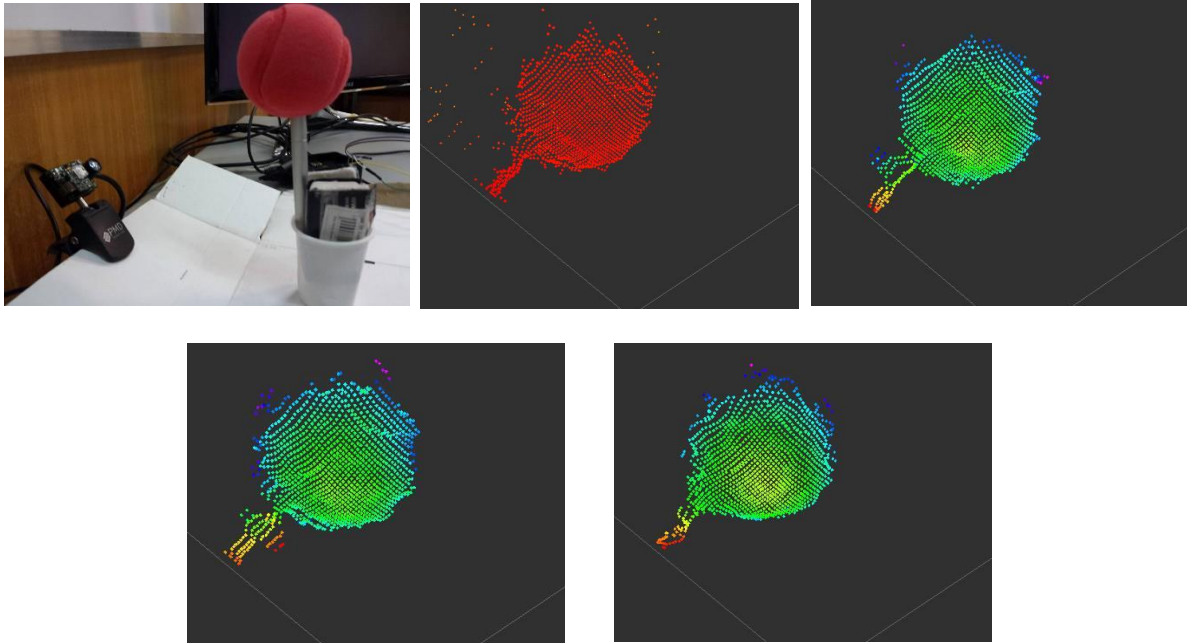


Figura 3.11 Imagem original (superior esquerda), nuvem de pontos sem filtros (superior central), nuvem de pontos após o filtro RadiusOutlierRemoval (superior direita), nuvem de pontos após o filtro PassThrough (inferior esquerda), nuvem de pontos após o filtro MovingLeastSquares (inferior direita).

3.4.5 Cálculo do erro de medida da PMD CamBoard nano após a reconstrução 3D

Após a reconstrução houve necessidade de calcular o erro associado à reconstrução de forma a perceber a fiabilidade das medidas após a análise das *meshs*.

Para isso realizou-se um teste durante 60 segundos, em que foram geradas 17 *meshs* e analisadas posteriormente. Durante o teste a câmara registou somente uma superfície plana, de forma a perceber qual a oscilação que esta iria produzir. Foi registado um ponto de referência e analisada a sua variação ao longo das 17 *meshs*. Após a análise verificou-se uma oscilação máxima de 1.3 mm em relação ao ponto de referência. Este valor não é um valor muito preciso pois seria necessário avaliar toda a mesh e registar todos os valores, considerando-se apenas um valor indicativo do valor do erro. Considerando o máximo 1.3 mm, obtemos um erro de ± 1.3 mm nas medidas obtidas.

3.4.6 Visualização em RT da força exercida e da nuvem de pontos

Para a visualização da força exercida em tempo real recorreu-se ao Matlab, onde foi criado um *script* denominado de *takkstrip_reader.m*. Este *script* inicia quando os dados começam a ser escritos no ficheiro de texto *Force_S1.txt*. O conjunto do tempo

com a leitura da força atual, fazem parte das variáveis do gráfico que descreve a força aplicada no momento em Newtons e o tempo em que ocorreu essa leitura em tempo real.

A visualização da nuvem de pontos em tempo real é obtida através do pacote descrito em 3.4.4 (*pmd_reconstruction*) e a ferramenta incorporada do ROS *Rviz*. Esta ferramenta permite a captura de um tópico de formato Nuvem de pontos, e a sua reprodução em tempo real. Este tópico é fornecido pelo *pmd_reconstruction* que envia um tópico da nuvem de pontos (este tópico é enviado após a aplicação dos algoritmos *RadiusOutlierRemoval*, *Passthrough* e *MovingLeastSquares* na nuvem de pontos).

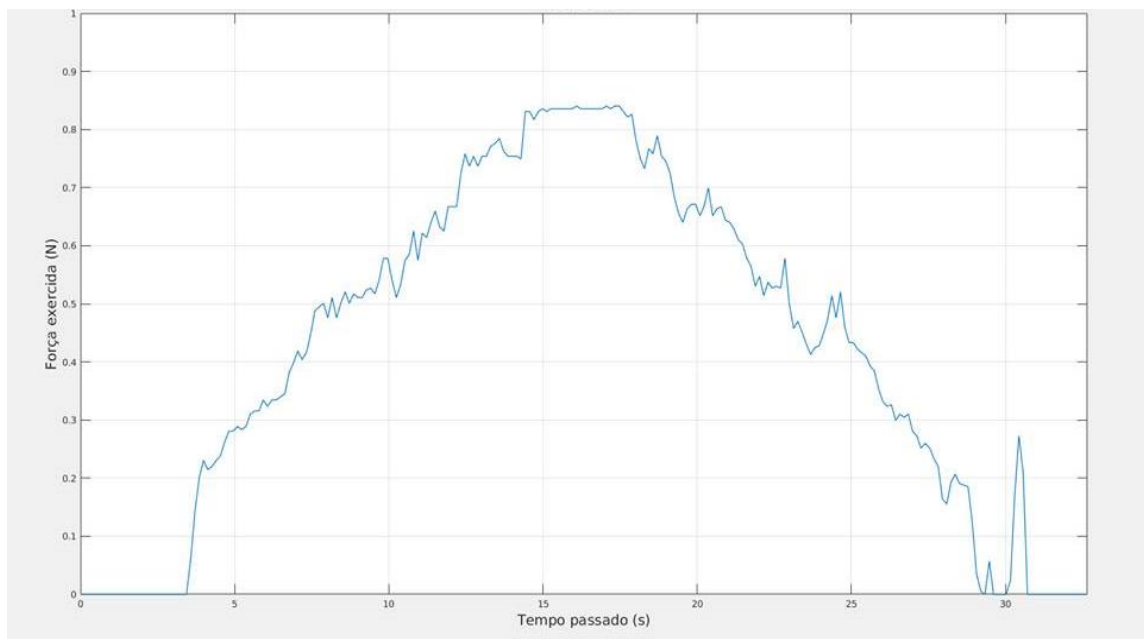


Figura 3.12 Gráfico em tempo real da força (N) pelo tempo decorrido até ao momento da interrupção do sistema (s)

3.5 Classificação do objeto entre rígido e deformável em tempo real

3.5.1 Pipeline do Sistema

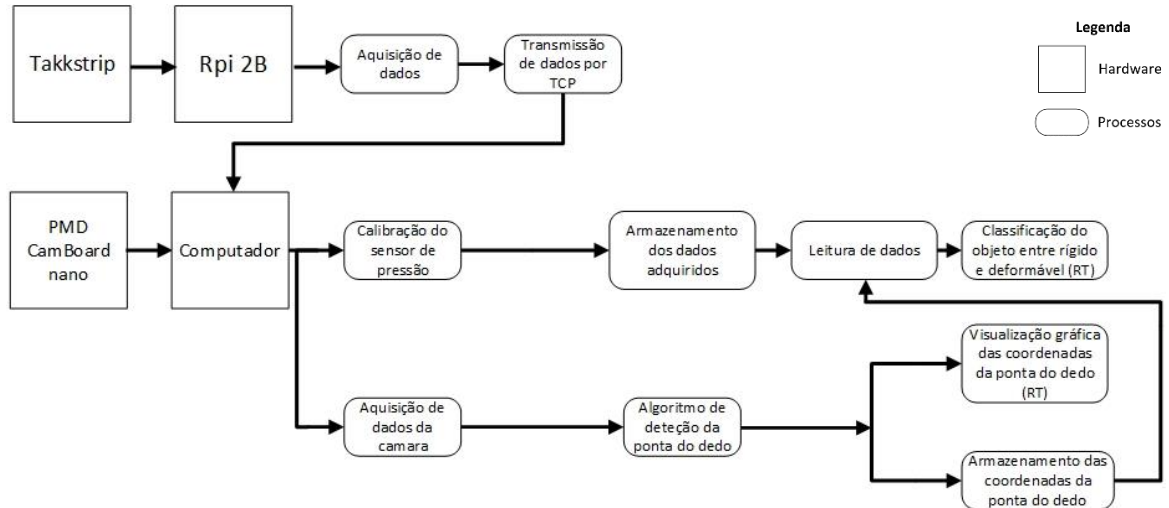


Figura 3.13 Pipeline do sistema desenvolvido para a classificação dos objetos

3.5.2 Aquisição e transmissão de dados da Takkstrip

Esta parte do sistema é igual à referida no sistema anterior na secção 3.4.2, apenas mudam os seus programas subordinados como se pode verificar na figura 3.14.

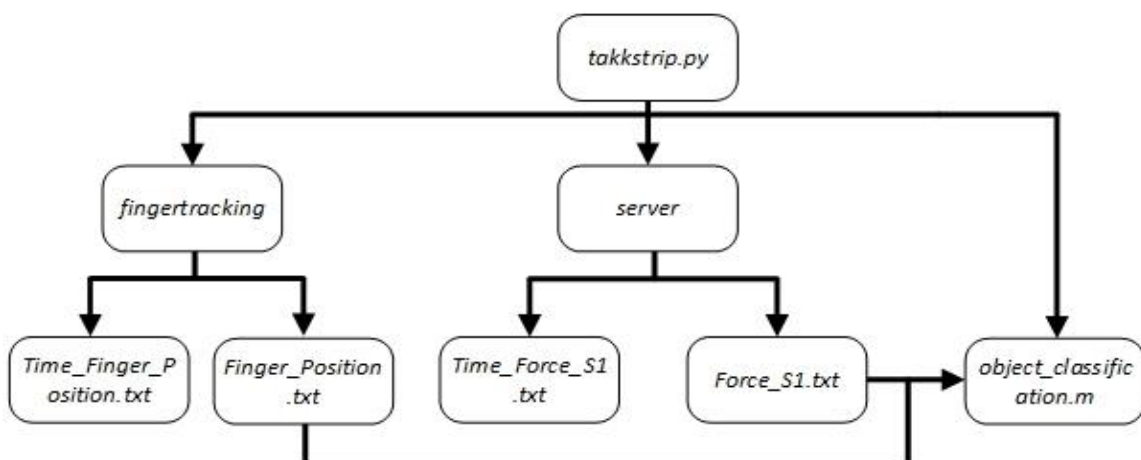


Figura 3.14 Ilustração hierárquica dos programas desenvolvidos para classificação dos materiais e as suas dependências

3.5.3 Aquisição da imagem em profundidade e aplicação do algoritmo de deteção da ponta do dedo

Este sistema tem como objetivo perceber em tempo real se o material que está em contacto com o sensor de pressão é ou não deformável. Para isso coloca-se a PMD CamBoard nano acoplada ao braço humano, de forma a que a imagem captada seja a parte posterior da mão e a ponta do dedo indicador, onde está acoplado o suporte com o sensor barométrico. Na figura 3.9 é possível visualizar como está organizado o sistema.

Esta abordagem só é possível com o auxílio dos algoritmos da OpenCV. A OpenCV é uma biblioteca de visão por computador que possui módulos de processamento de imagens e vídeo, estruturas de dados, álgebra linear entre outros, e o mais relevante é o facto de contar com mais de 350 algoritmos de visão por computador [35]. Para o tracking da ponta do dedo desenvolveu-se o programa *fingertracking* em C++ com o auxílio dos

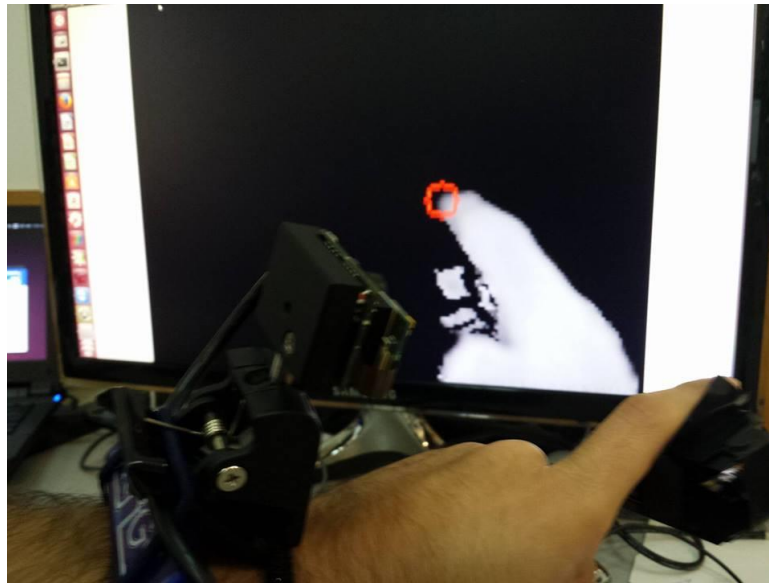


Figura 3.15 Sistema de classificação de objetos entre deformável

algoritmos fornecidos pela OpenCV. Na figura 3.16 está representado como este programa opera.

Este programa começa por iniciar um contador de forma a ser possível verificar se as leituras do sensor estão em sincronia com leituras da posição da ponta do dedo. Após a captura da imagem através das funções fornecidas pela PMD, é transportada para uma janela criada por uma função do OpenCV.

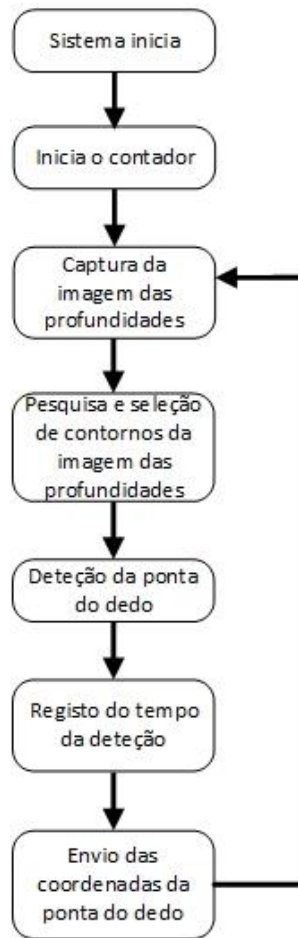


Figura 3.16 Esquema demonstrativo do funcionamento do programa "fingertracking"

De seguida é usada uma função que tem como parâmetro de entrada a *frame* capturada pela câmara, onde é efetuado um *threshold* à imagem, e seguidamente aplicado um algoritmo para encontrar contornos na imagem. Se encontrar o contorno, vai ser feita uma busca pelo *convexhull* nesse mesmo contorno. Após encontrar o *convexhull* é realizada uma procura dos defeitos presentes, ou seja, encontrar os vértices do *convexhull*. Depois de encontrar os defeitos é realizada uma filtragem que irá definir que o vértice com o valor da coordenada cartesiana *y* mais elevado, será o ponto selecionado, encontrando assim a ponta do dedo e desenhando um círculo vermelho. Quando encontrada a ponta do dedo, são escritas no ficheiro de texto *Finger_Position.txt* as coordenadas do centro desse círculo e noutro ficheiro de texto *Time_Finger_Position.txt* o tempo em que foram adquiridas as coordenadas da ponta do dedo.

3.5.4 Visualização em RT da posição da ponta do dedo em função do tempo

Para a visualização da variação da posição em tempo real da ponta do dedo recorreu-se ao Matlab, onde foi criado um *script* denominado de *object_classification.m*. Este *script* inicia quando os dados começam a ser escritos no ficheiro de texto *finger_position*, e usando as funções *tic* e *toc*, e os valor da coordenada *y* do centro do círculo da ponta do dedo, é possível visualizar um gráfico que descreve a variação da posição da ponta do dedo em tempo real.

3.5.5 Classificação do material entre “Rígido” e “Deformável” em RT

Esta classificação é realizada no mesmo *script* que a visualização gráfica da posição da ponta do dedo. Inicialmente o *script* faz a leitura, em simultâneo, dos dois ficheiros de texto *finger_position* e *Force_S1.txt*, enquanto nestes são escritos os dados correspondentes às forças aplicadas pela ponta do dedo no sensor, e a posição da mesma. Após a leitura dos dois ficheiros, os dados são comparados e é aplicado o *Algoritmo 1* para fazer a diferenciação. Este baseia-se na comparação entre a coordenada do *y* do ponto de referência com a coordenada do *y* da posição atual, e esta comparação só é feita de estiver a ser exercida força.

A coordenada *y* do ponto do centro do círculo detetado na ponta do dedo é muito importante pois é usada para a comparação com a coordenada dos *y* da posição de referência. A coordenada *y* foi a escolhida para o algoritmo pois é esta que apresenta uma maior variação quando a ponta do dedo exerce força sobre um objeto e, se variação for acima da tolerância considera-se que o objeto é deformável. Para a classificação de um objeto rígido, são necessárias duas condições, a primeira é que esteja dentro do limite da tolerância, e a segunda que esta seja confirmada dez vezes. Esta última condição surge porque, durante a aplicação de força por parte da ponta do dedo, mesmo que este seja deformável, irá criar diferenças entre uma leitura e outra que não passariam da tolerância, classificando logo o objeto como rígido, e criando esta confirmação retira-se esse erro de classificação.

A tolerância escolhida foi baseada na oscilação da coordenada dos y 's da ponta do dedo quando este está em repouso percebendo assim quais os limites que se poderiam aplicar à tolerância.

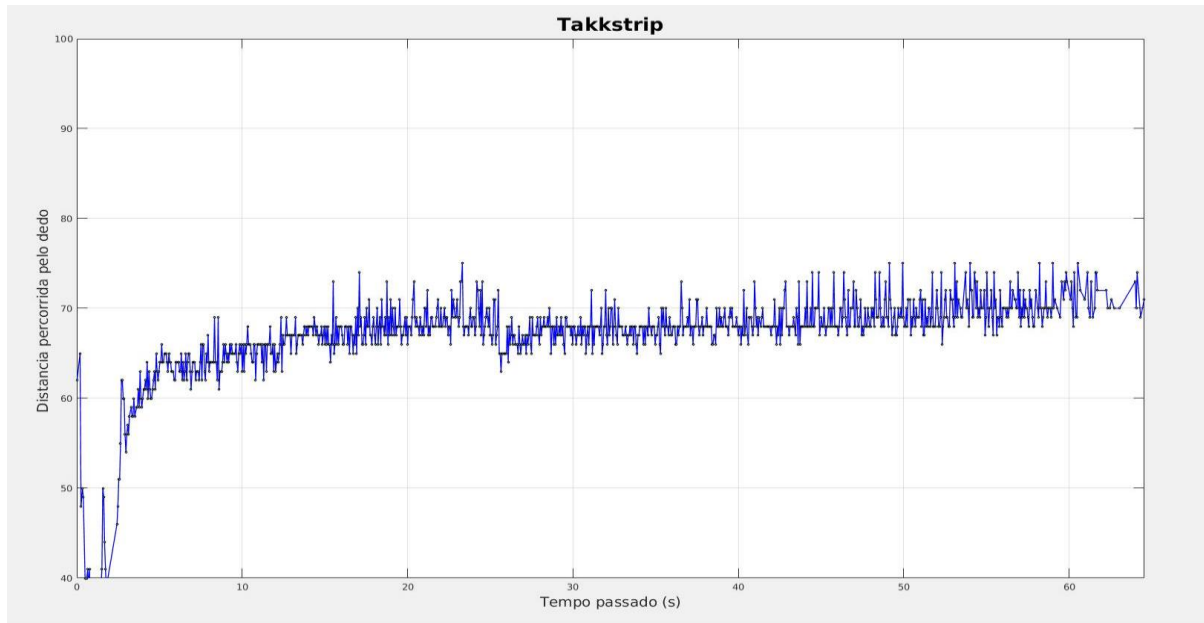


Figura 3.17 Gráfico de demonstração da oscilação da posição do centro da ponta do dedo quando esta se encontra em repouso

Uma das condições fundamentais para o funcionamento deste sistema é a posição da câmara em relação à mão. Como estamos a trabalhar com uma mão humana é difícil fazer com que a ponta do dedo apareça sempre no mesmo sítio, por isso é necessário atualizar o y de referência quando se deixa de detetar força pelo sensor. Na figura 3.15 é possível ver qual a pose mais indicada de forma a ter uma classificação mais correta do material.

Algoritmo 1: Algoritmo para determinar se um objeto é ou não deformável

Tolerância = 3;

Tolerância negativa = -3

if *Leitura de força na iteração atual* **then**

if *Força atual* < 5 **then**

 | *Starter* = 0;

end

if *Força atual* > 5 **then**

if *Starter* = 0 **then**

 | *y* de referência = coordenada *y* da posição atual da ponta do dedo;

 | *Starter* = 1;

end

if *Starter* > 1 **then**

 | Diferença de posição = *y* de referência - *y* da posição atual;

if *Diferença de posição* < *tolerância* ou *diferença de posição* > *tolerância negativa* **then**

 | Incremento no contador de material rígido;

if *Contador de material rígido* > 10 *contagens consecutivas* **then**

 | Display Objeto Rígido;

 | Contador de material rígido = 0;

end

end

if *Diferença de posição* > *tolerância* ou *diferença de posição* < *tolerância negativa* **then**

 | Display Objeto Deformável;

 | Contador de material rígido = 0;

end

end

end

end

Capítulo 4

Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados os testes e explicados os resultados obtidos, tanto para o cálculo dos parâmetros de elasticidade do objeto testado, como para a classificação entre deformável e rígido, em tempo real de vários objetos.

4.1 Cálculo dos parâmetros de elasticidade

Existem dois métodos de análise das propriedades elásticas dos materiais, o método estático e o método dinâmico. O método estático consiste em solicitar mecanicamente um corpo por meio de uma aplicação de tensão, podendo essa tensão ser de tração, compressão, flexão ou torção. Essa tensão é aplicada a baixas velocidades e partir disto é possível retirar a relação tensão-deformação. O método dinâmico consiste, basicamente, na determinação da frequência natural de um corpo através de ondas elásticas e da medição da velocidade de propagação das ondas através do corpo. Nesta dissertação é usado o método estático, sendo o mais usado nas indústrias de forma a obter o módulo de Young. É também calculado o coeficiente de Poisson de forma a conseguir posteriormente calcular os restantes módulos elásticos, nomeadamente o módulo de cisalhamento e o volumétrico.

A seleção do objeto baseou-se nos seguintes critérios: flexibilidade, isotropia e regularidade quanto à sua forma. O objeto tem que ser bastante flexível devido à pequena gama de força dos sensores de pressão (0-0.85N) e à resolução da PMD CamBoard nano, de forma a ser possível perceber, através das reconstruções realizadas pela câmara, as deslocamentos verticais e horizontais durante a deformação do objeto e saber a força exata nos momentos da reconstrução. A isotropia do objeto é um fator essencial para ser possível o cálculo dos parâmetros de elasticidade, pois o cálculo do módulo de Young e do coeficiente de Poisson através das equações 2.3 e 2.5 só faz sentido se o material for isotrópico. Por último, o objeto terá que ter uma forma regular, ou seja, por exemplo um

cubo em que todos os lados são iguais, o que permite que o objeto tenha um deslocamento horizontal (Δd) igual em todos os lados quando aplicada uma tensão no centro do lado superior do cubo.

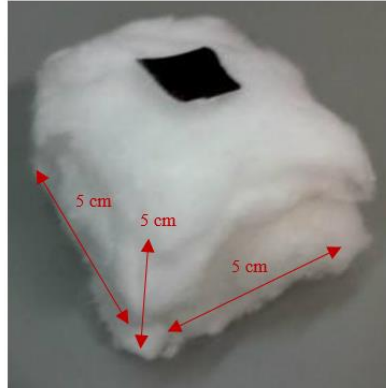


Figura 4.1 Cubo de algodão usado nos testes

Na figura 4.1 podemos observar que o objeto escolhido foi o algodão, pois cumpre todos os requisitos e ultrapassa todas as limitações impostas pelos dispositivos usados. Este, além de ser altamente flexível, é muito moldável e apresenta propriedades elásticas quando aplicadas pequenas tensões. O algodão foi moldado ao formato de um cubo com dimensões de aproximadamente 5 cm de altura, comprimento e largura, que nos garante uma uniformidade nos deslocamentos horizontais, permitindo um cálculo do coeficiente de Poisson mais preciso.



Figura 4.2 Imagem em amplitude (esquerda) e a posição da câmara em relação ao cubo de algodão (direita)

Após a escolha do material e do formato do mesmo, procederam-se aos testes. Na figura 4.2 é possível visualizar como a câmara e o objeto estão posicionados e também a imagem em amplitude captada pela câmara ToF. Como se pode verificar na figura 4.1 o

cubo está equipado com um quadrado de fita adesiva preta. Este quadrado tem como objetivo identificar o ponto onde é aplicada a força no cubo de algodão na *mesh*, pois sendo preta a luz infravermelha emitida pelo LED não é refletida e deste modo não surgem pontos na nuvem de pontos nessa zona identificando assim o local onde o quadrado se encontra.

Executou-se o sistema descrito na secção 3.4 e efetuaram-se 10 experiências com o cubo de algodão. Após a execução do sistema procedeu-se à análise das *meshs* geradas de forma a conseguir calcular os deslocamentos verticais e horizontais ao longo das 10 experiências. As *meshs* estão no formato VTK e para a sua visualização e análise foi usado o *software Paraview 4.0.1*, que permite a visualização das dezasseis *meshs* em simultâneo, e assim perceber as diferenças entre cada uma.

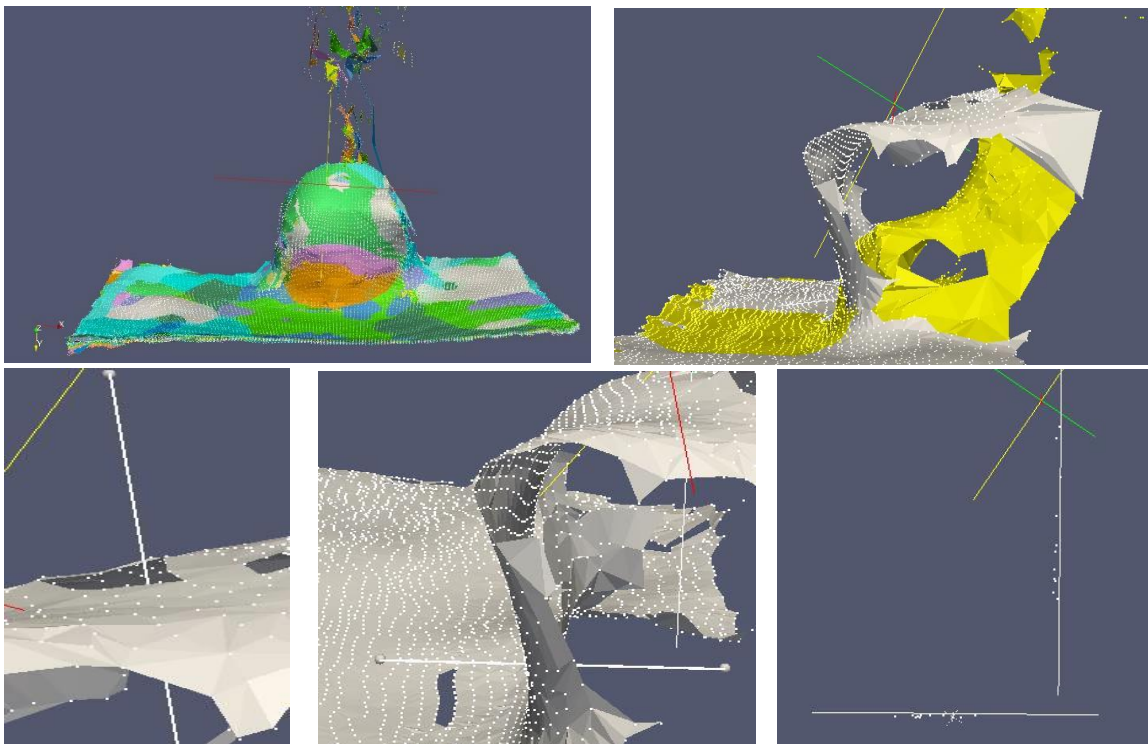


Figura 4.3 Conjunto das quinze meshs geradas (superior esquerdo), comparação da reconstrução do objeto em repouso e deformado (superior direita), segmento de reta guia do deslocamento vertical (inferior esquerdo), segmento de reta guia do deslocamento horizontal (inferior central) e os dois segmentos de reta guias e os pontos de referência dos deslocamentos (inferior direita).

Para descobrir os deslocamentos verticais e horizontais do objecto, ao longo da deformação através das *meshs* geradas, foram usados dois segmentos de recta como referência para a comparação entre *meshs*. O primeiro segmento de recta (figura 4.3 imagem inferior esquerda) diz respeito ao deslocamento vertical e localiza-se no ponto onde o quadrado preto de fita adesiva foi colocado para identificar o local onde foi

exercida a força. O segundo segmento de reta foi colocado de forma a detectar a maior variação de deslocamento horizontal possível do objecto, e assim obter um valor para o coeficiente de Poisson mais correcto.

Os valores do deslocamento vertical e horizontal obtiveram-se através do cálculo da distância euclidiana entre os pontos, obtidos após a análise das *meshs*, e foi calculada através da equação 4.1, onde n representa o número total de pontos obtidos em cada deslocamento.

Após o cálculo dos deslocamentos, procedeu-se ao cálculo dos parâmetros de elasticidade do cubo de algodão. Primeiramente foi calculado o módulo de Young do cubo, ao longo das dez experiências realizadas, através da equação 2.3. Em cada experiência foi realizado o cálculo para cada amostra, dando origem ao diagrama de caixa da figura 4.4 e ao valor médio obtido de todas as experiências ($433,4462 \text{ N/m}^2 = 4,334462329 \times 10^{-7} \text{ GPa}$).

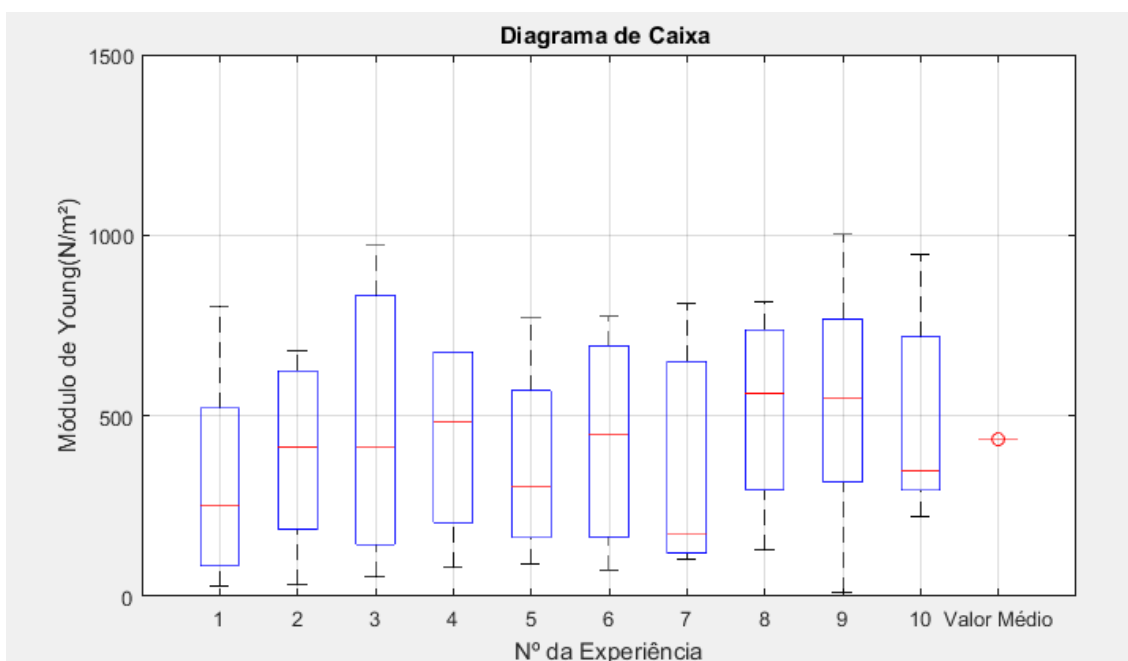


Figura 4.4 Diagrama de caixa referente aos valores do módulo de Young obtidos das dez experiências realizadas ao cubo de algodão

O módulo de Young dá uma indicação de rigidez dos materiais. Neste caso, em particular, estamos a usar algodão, um material muito pouco rígido, logo o seu módulo

de Young terá que ser bastante pequeno, o que comprova assim que o valor médio das experiências realizadas com o algodão é coerente quando comparado com os restantes materiais, como se pode visualizar pela tabela A.3. É possível visualizar em alguns testes uma grande amplitude de resultados. Os deslocamentos das deformações são medidas na ordem dos mm, e como referido na secção 3.4.5, a câmara tem um erro após a reconstrução de ± 1.3 mm, que conseqüentemente pode ter influência nas medidas dos deslocamentos, e afetar os resultados obtidos.

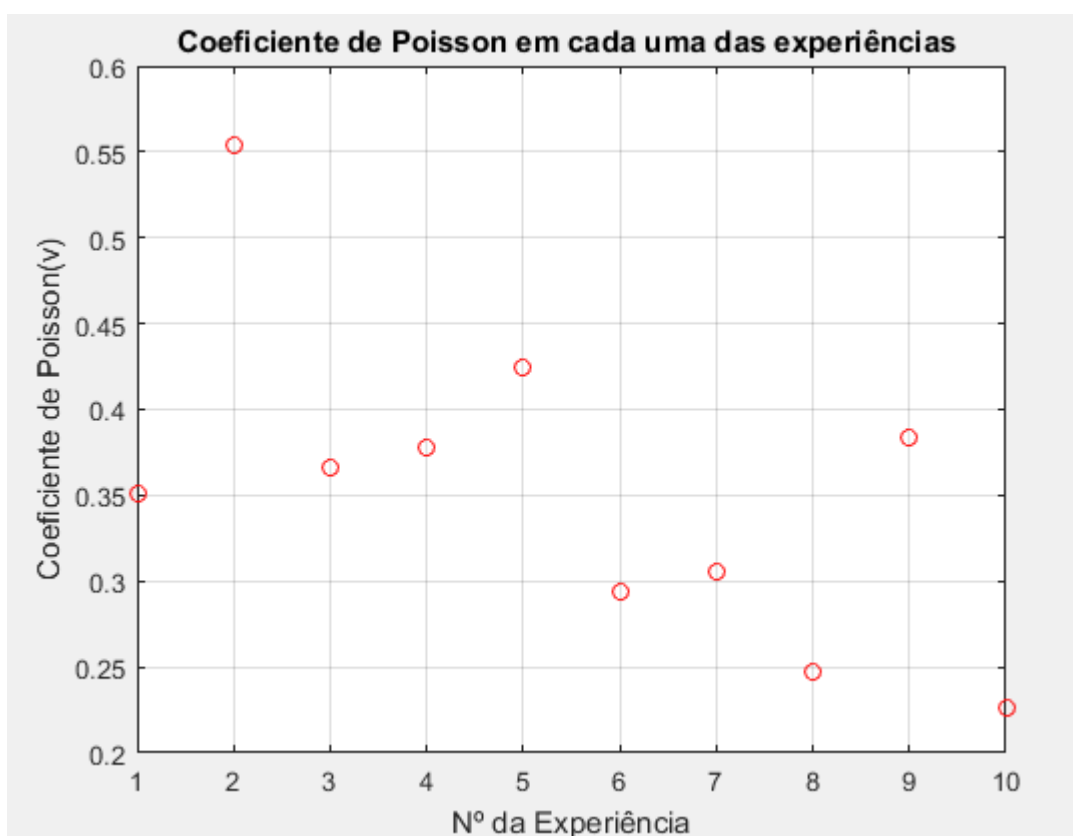


Figura 4.5 Gráfico ilustrativo das médias dos coeficientes de Poisson obtidas das amostras de cada uma das experiências realizadas

Posteriormente foi calculado o valor dos coeficientes de Poisson através da equação 2.5 de todas as amostras de cada uma das experiências. Após o cálculo efetuaram-se as médias de todas as amostras de cada experiência, as quais se podem observar através da figura 4.5, e a média de todas as experiências (0,352953).

Como referido na secção 2.1.5, a gama do coeficiente de Poisson para materiais isotrópicos está entre os 0.2 e os 0.5. A média do coeficiente de Poisson obtida após as 10 experiências é aproximadamente de 0.35, confirmando assim o pressuposto que o cubo

de algodão é isotrópico. É possível visualizar na experiência 2 um valor fora da gama aceitável para o coeficiente de Poisson, que tal como foi referido anteriormente, pode ser consequência do erro considerado para a medição da camara após a reconstrução.

Finalmente, foram efetuados os cálculos dos restantes módulos de elasticidade, nomeadamente do módulo de cisalhamento e do módulo volumétrico através das equações 2.6 e 2.7. Para este cálculo foram utilizados o valor da média das dez experiências do módulo de Young e do módulo de Poisson. O valor obtido foi de 160,19 N/m² para o módulo de cisalhamento e de 491,28 N/m² para o módulo volumétrico.

4.2 Classificação do objeto entre rígido e deformável em tempo real

Nesta secção vamos apresentar como foram realizados os testes ao algoritmo 1 e demonstrar quais os resultados obtidos, quanto à classificação de objetos entre deformável e rígido.

Foram efetuados testes com três objetos diferentes: um ovo, um tomate e o cubo de algodão usado na abordagem anterior. Os critérios de escolha destes objetos basearam-se na deformabilidade de cada um. Neste caso usamos o ovo, que é considerado um objeto rígido, mas bastante frágil. O tomate apesar de ser um objeto rígido é facilmente deformável se forem aplicadas forças de alguma intensidade, danificando assim o tomate. Por fim o cubo de algodão, considerado um material bastante deformável, conseguindo voltar à sua forma original quando aplicadas pequenas tensões.

Com estes três objetos testou-se o algoritmo de forma a perceber se era possível distinguir a rigidez e a deformabilidade de cada um e se não os danificava antes de os distinguir, de forma a provar a sua aplicabilidade com qualquer tipo de objeto, seja ele frágil ou robusto.



Figura 4.6 Objetos usados no teste de classificação

4.2.1 Teste de classificação com o ovo

Este teste decorreu durante 140 segundos, mas só a partir dos 70 segundos é que foi realizada força pela ponta do dedo sobre o ovo. Como se pode visualizar pela figura A.4 a posição da ponta do dedo a partir dos 70 segundos está mais estabilizada que é quando o teste sobre o ovo começa. Os picos negativos que se podem observar na figura 4.7 representam o momento em que a ponta do dedo deixa de exercer força sobre o ovo.

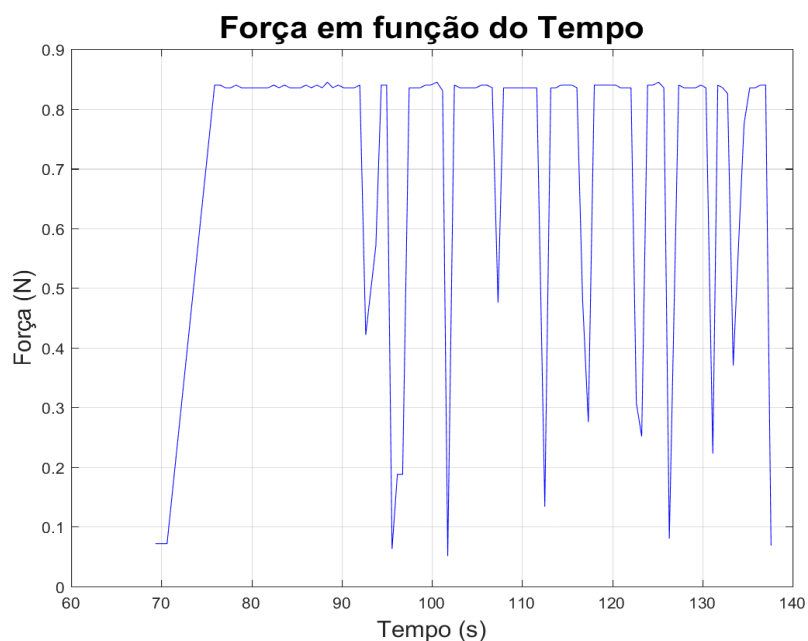


Figura 4.7 Força exercida pela ponta do dedo em função do tempo (teste do ovo)

Após a execução do sistema, foram executadas 103 amostras. O algoritmo classificou em todas as 103 amostras o ovo como um objeto rígido, conseguindo assim uma eficácia de 100%. Percebeu-se que este sistema de classificação pode ser usado em objetos muito frágeis, pois efetuou a classificação correta do ovo em todas amostras, sem danificar o mesmo.

4.2.2 Teste de classificação do tomate

Este teste decorreu em aproximadamente 110 segundos, mas só a partir aproximadamente dos 48 segundos é que foi realizada força pela ponta do dedo sobre o tomate. Como se pode visualizar pela figura A.5 a posição da ponta do dedo a partir dos 70 segundos está mais estabilizada que é quando o teste sobre o tomate realmente começa. Os picos negativos que se podem observar na figura 4.8 representam o momento em que a ponta do dedo deixa de exercer força sobre o tomate.



Figura 4.8 Força exercida pela ponta do dedo em função do tempo (teste do tomate)

Após a execução do sistema, foram executadas 98 amostras. O algoritmo classificou em todas as 98 amostras o tomate como um objeto rígido, conseguindo assim uma eficácia de 100%. Percebeu-se que este sistema de classificação pode ser usado em objetos delicados pois efetuou a classificação correta do tomate em todas amostras sem danificar o mesmo.

4.2.3 Teste de classificação do cubo de algodão

Este teste decorreu em aproximadamente 130 segundos, mas só a partir aproximadamente dos 58 segundos é que foi realizada força pela ponta do dedo sobre o cubo de algodão. Como se pode visualizar pela figura A.6 a posição da ponta do dedo a partir dos 58 segundos está mais estabilizada que é quando a classificação sobre o cubo de algodão realmente começa. Os picos negativos que se podem observar na figura 4.9 representam o momento em que a ponta do dedo deixa de exercer força sobre o tomate.

Após a execução do sistema, foram executadas 155 amostras. O algoritmo classificou em 152 amostras o cubo de algodão como um objeto deformável, conseguindo assim uma eficácia de 98%. Este erro de 2% indicia erros no teste, que podem ser explicados devido à posição da ponta do dedo em relação à câmara, pois o teste é realizado num ser humano tornando mais difícil conseguir que o dedo se mantenha na posição mais correta, ou seja, de forma que o algoritmo seja mais eficiente. Este problema pode ser resolvido usando um sistema robótico incorporado com uma mão robótica, que permita controlo de velocidade e da posição do dedo em relação à câmara.

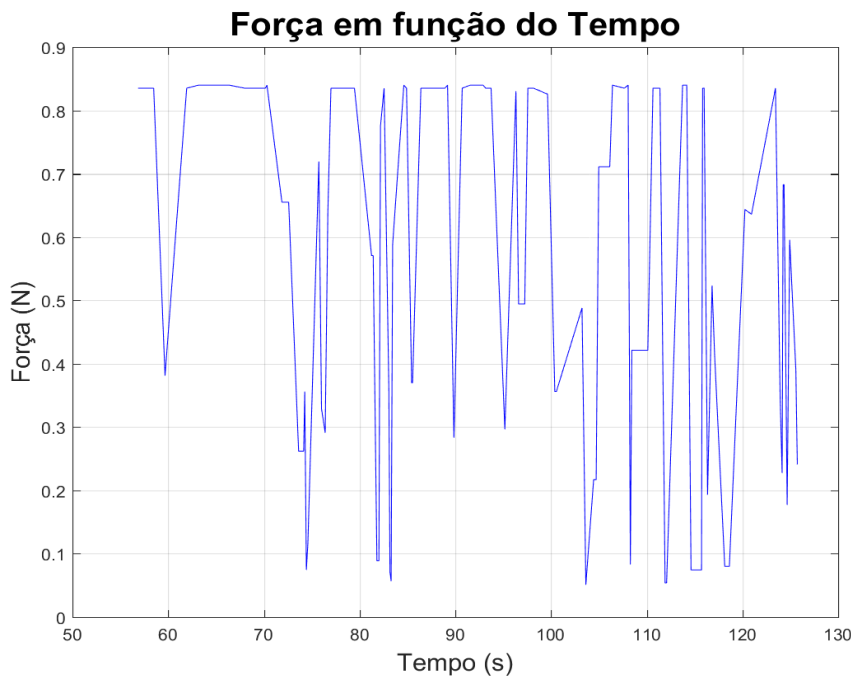


Figura 4.9 Força exercida pela ponta do dedo em função do tempo (teste do cubo de algodão)

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões acerca do trabalho desenvolvido, tendo em consideração os resultados obtidos. Por fim são apresentadas algumas propostas para trabalho futuro.

5.1 Conclusões

Nesta dissertação era proposto o desenvolvimento de um sistema capaz de calcular os parâmetros de elasticidade de materiais e também que conseguisse distinguir, em tempo real, um objeto deformável de um rígido.

Para o cálculo dos parâmetros de elasticidade dos materiais, apesar das limitações dos dispositivos usados, nomeadamente, a baixa resolução da PMD CamBoard nano e da gama limitada de força do sensor de pressão incorporado no sensor barométrico da Takkstrip, foi possível calcular de forma completa todos os módulos necessários para uma caracterização do cubo de algodão quanto às suas propriedades elásticas. Os métodos usados para a reconstrução 3D foram satisfatórios, permitindo desta forma uma análise na ordem dos milímetros da deslocação consequente da deformação aplicada ao cubo.

A calibração do sensor de pressão foi um dos grandes desafios. O sensor barométrico contém uma borracha embutida de dimensões 6 mm de largura por 6 mm de comprimento, de forma ao sensor de pressão detetar a pressão exercida. Ao longo da borracha as leituras do sensor são diferentes, dificultando assim a calibração. Foi necessário o desenvolvimento de um suporte que permitisse que não fosse necessário uma nova calibração a cada utilização do sensor.

Este projeto envolveu o desenvolvimento de *software* em diferentes linguagens de programação e uso de bibliotecas como a PCL e a OpenCV, que exigiram grande trabalho de pesquisa de forma a perceber como se poderia usufruir da melhor forma destas em simbiose com a PMD CamBoard nano. Foi também desenvolvido um pacote ROS, que

em conjunto com a PCL, permitiram a reconstrução 3D e a geração de *meshs* de forma a ser possível analisar as deformações.

O sistema de classificação em tempo real de objetos deformáveis e rígidos foi conseguido com grande sucesso. Este através dos testes efetuados conseguiu uma eficácia de 100% nos dois objetos rígidos analisados e de 98% no objeto deformável, em cerca de 100 amostras em cada um dos testes. Além de ter conseguido a identificação sem danificar nenhum dos objetos (um ovo e um tomate), foi conseguido através de uma abordagem de baixo custo. Para este sistema usou-se a OpenCV de forma a conseguir detetar a ponta do dedo e assim poder, de uma forma bastante simples, uma classificação bastante precisa dos objetos testados. Este sistema além de ter um grande potencial, tem também aplicabilidade em sistemas robóticos, pois consegue aliar a precisão, ao baixo custo à fácil integração neste tipo de sistemas.

5.2 Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido tem um grande potencial, e bastante aplicabilidade em sistemas robóticos. Existem algumas melhorias e pesquisas que poderão ser realizadas para levar estes sistemas a melhores desempenhos e maiores precisões.

Como referido na secção 2.3.2, existem melhores alternativas à câmara ToF usada, sendo a melhor a Leap Motion. A resolução desta é muito superior comparada com a resolução da PMD CamBoard nano, o que poderá tornar os sistemas bastante mais precisos, com a grande vantagem de manter o baixo custo do sistema (cerca de 78€ [36]).

A substituição da Takkstrip por uma alternativa igualmente barata e precisa, mas com uma gama de força maior, iria permitir o cálculo dos parâmetros de elasticidade de materiais mais rígidos e assim ter um sistema muito mais completo e preciso.

O algoritmo 1 poderá ser melhorado com a aplicação de filtros de forma a conseguir classificações mais corretas, e também a possibilidade de ser explorado para outras aplicações.

Bibliografia

- [1] “Modulus of Elasticity or Young’s Modulus - and Tensile Modulus for some common Materials.” [Online]. Available:
http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html.
- [2] J. Dargahi and S. Najarian, “Human tactile perception as a standard for artificial tactile sensing--a review.,” *Int. J. Med. Robot.*, vol. 1, no. 1, pp. 23–35, 2004.
- [3] G. Robles-de-la-torre, “The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments,” *Int. Soc. Haptics*, pp. 24–30, 2006.
- [4] L. M. Ross and E. D. Lamperti, *THE ME Atlas of Anatomy*. .
- [5] M. Zecca, G. Cappiello, F. Sebastiani, S. Roccella, F. Vecchi, and M. C. Carrozza, “15 Experimental Analysis of the Proprioceptive and Exteroceptive Sensors of an Underactuated Prosthetic Hand,” pp. 233–242, 2004.
- [6] B. Frank and C. Stachniss, “Learning Deformable Object Models for Mobile Robot Navigation using Depth Cameras and a Manipulation Robot.”
- [7] B. Frank and C. Stachniss, “Learning the Elasticity Parameters of Deformable Objects with a Manipulation Robot.”
- [8] J. Bimbo, L. D. Seneviratne, K. Althoefer, and H. Liu, “Combining touch and vision for the estimation of an object ’ s pose during manipulation Combining Touch and Vision for the,” no. January 2016, 2013.
- [9] “PMD[vision] CamBoard nano Reference Design - YouTube.” .
- [10] “TakkStrip - TakkTile.” [Online]. Available:
<http://www.takktile.com/product:takkstrip>.
- [11] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, “Extracting object properties through haptic exploration,” vol. 84, pp. 29–40, 1993.
- [12] B. Index, “OF INTERNET A report from The Economist Intelligence Unit.”
- [13] F. Edition, *Handbook of Modern Sensors*. .
- [14] L. Landau and E. Lipshitz, *Theory of Elasticity*. .

- [15] L. Treloar and R. George, *The Physics of Rubber Elasticity*. Oxford university press, 1975.
- [16] M. H. Sadd, *Elasticity: Theory, Applications, and Numerics Volume I: Fundamentals and Elasticity*. Oxford: Elsevier.
- [17] G. De With, *Microengineering of Metals and Ceramics Nanomaterials by Severe Plastic Deformation Handbook of Ceramic Hard Materials*. 2006.
- [18] T. M. Atanackovic, *Theory of Elasticity*. .
- [19] R. Morrell, “Measuring elastic properties of advanced technical ceramics: A review,” 1996.
- [20] P. H. Mott and C. M. Roland, “Limits to Poisson’s ratio in isotropic materials,” pp. 1–4, 2009.
- [21] N. X. P. Semiconductors, “UM10204 I2C-bus specification and user manual,” 2014.
- [22] Y. Tenzer, L. P. Jentoft, and R. D. Howe, “Inexpensive and Easily Customized Tactile Array Sensors using MEMS Barometers Chips,” no. c, 2012.
- [23] A. Iera, T. Corradi, P. Hall, and P. Iravani, “recognition : learning and recognising objects using a new inexpensive tactile sensor . In : IEEE Interational Conference on Opus : University of Bath Online Publication Store Please cite only the published version using the reference above . Please scroll down to view the document . Bayesian Tactile Object Recognition : learning and recognising objects using a new inexpensive tactile sensor *,” 2015.
- [24] L. Li, “Time-of-Flight Camera – An Introduction,” no. January, 2014.
- [25] “CamBoard Nano PROGRAMMING MANUAL.”
- [26] “Imaging in depth - TIME-OF-FLIGHT IMAGING - Imaging and Machine Vision Europe.” [Online]. Available: http://www.imveurope.com/features/feature.php?feature_id=227.
- [27] K. Khoshelham and S. O. Elberink, “Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications,” pp. 1437–1454, 2012.
- [28] “What is a Raspberry Pi_.” [Online]. Available:

<https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/>.

- [29] A. B. Manual, *Black & White Photography*. .
- [30] “GitHub - fsuarez6_takktile_ros_ ros drivers for the TakkTile tactile array.” [Online]. Available: https://github.com/fsuarez6/takktile_ros.
- [31] “GitHub - taketwo_pmd_camboard_nano_ ROS driver for PMD[vision]® CamBoard nano depth sensor.” .
- [32] R. B. Rusu and S. Cousins, “ICRA Communications 3D is here : Point Cloud Library (PCL),” pp. 1–4, 2011.
- [33] A. Ichim, “Pcl - surface reconstruction.”
- [34] V. Rabaud, “Surface Reconstruction,” 2011.
- [35] G. Bradski and A. Kaehler, *Learning OpenCV*. .
- [36] “Leap motion - Comparador de preços e guia de compras online.” [Online]. Available: <http://www.kuantokusta.pt/search?q=leap motion>.
- [37] Z. Jianzhong, “Review of Time-of-Flight cameras.”
- [38] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 4th ed. .
- [39] “Hooke’s Law – Computer Applications Assignment 1 _ georgerixon.” [Online]. Available: <https://georgerixon.wordpress.com/2013/11/19/hookes-law-computer-applications-assignment-1/>.
- [40] “MCAT Physics Flashcard - Young’s modulus illustration.” [Online]. Available: <http://www.wikipremed.com/01physicscards.php?card=308>.
- [41] “Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi.” .
- [42] “Raspberry Pi 2 Model B review_ Still the best microcomputer _ Alphr.” .
- [43] “About - Point Cloud Library (PCL).” [Online]. Available: <http://www.pointclouds.org/about/>.
- [44] J. Nikolic, “Studies on Mechatronics Force Sensing Technologies,” 2010.

Apêndice A

Anexos

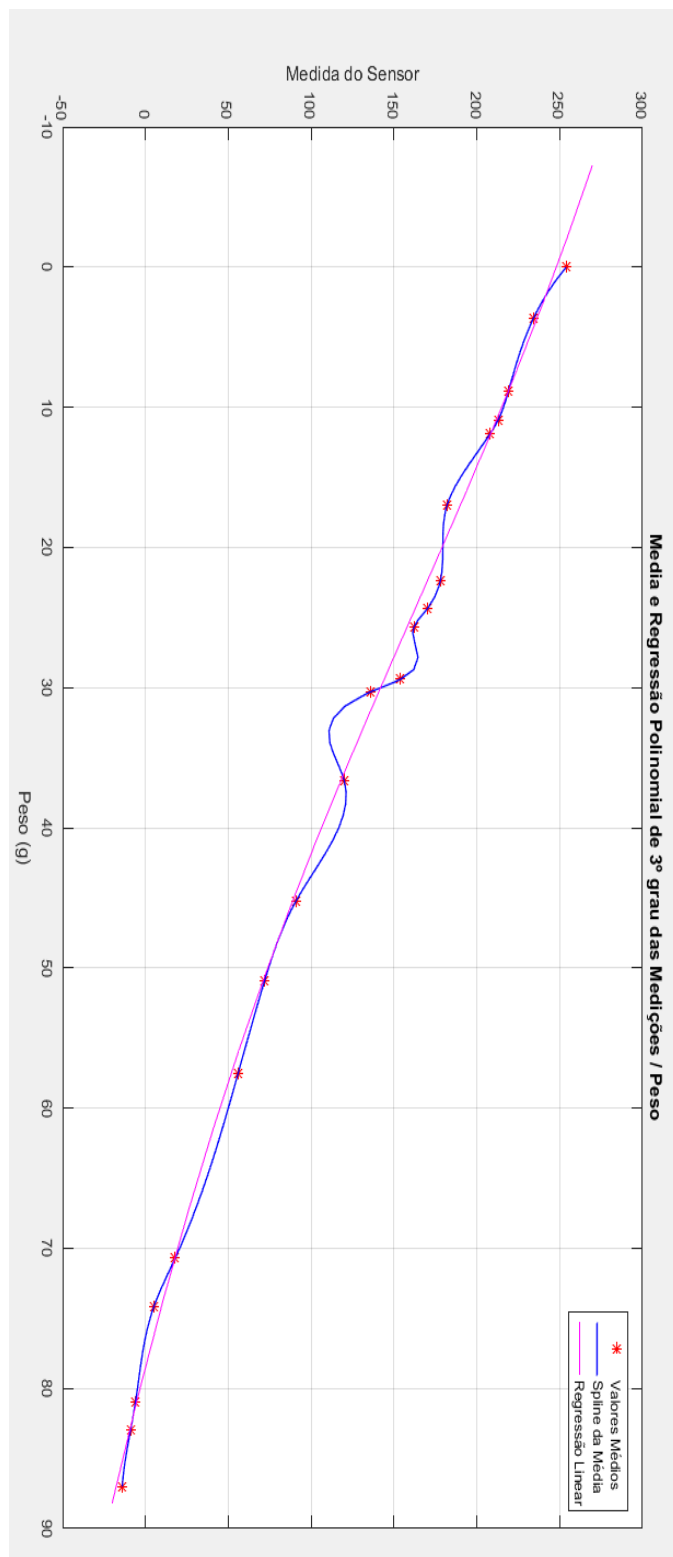


Figura A.1 Comparação do spline da média com a regressão polinomial de 3º grau

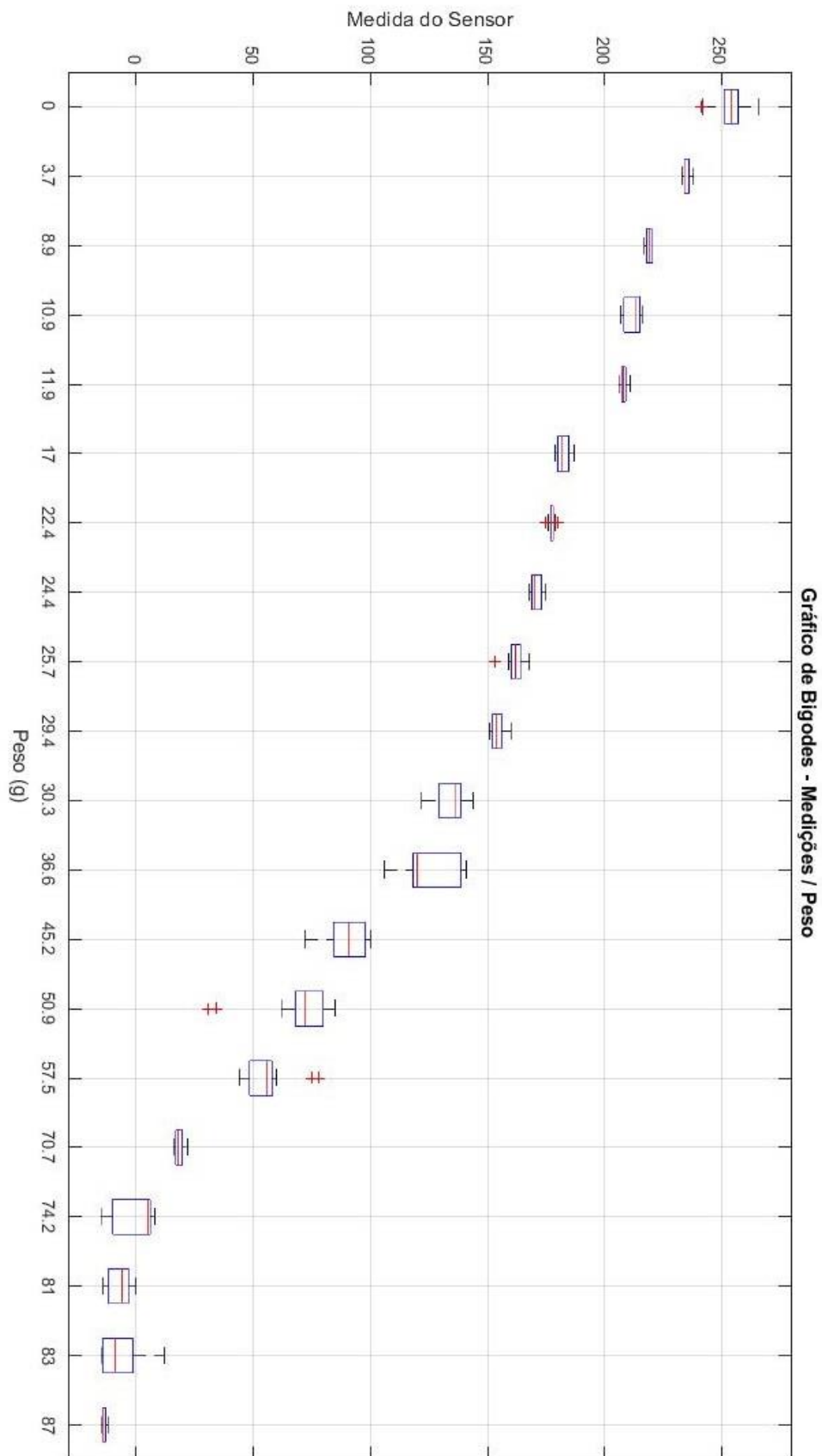


Figura A.2 Gráfico de bigodes das medidas efetuadas pelo sensor de pressão por peso

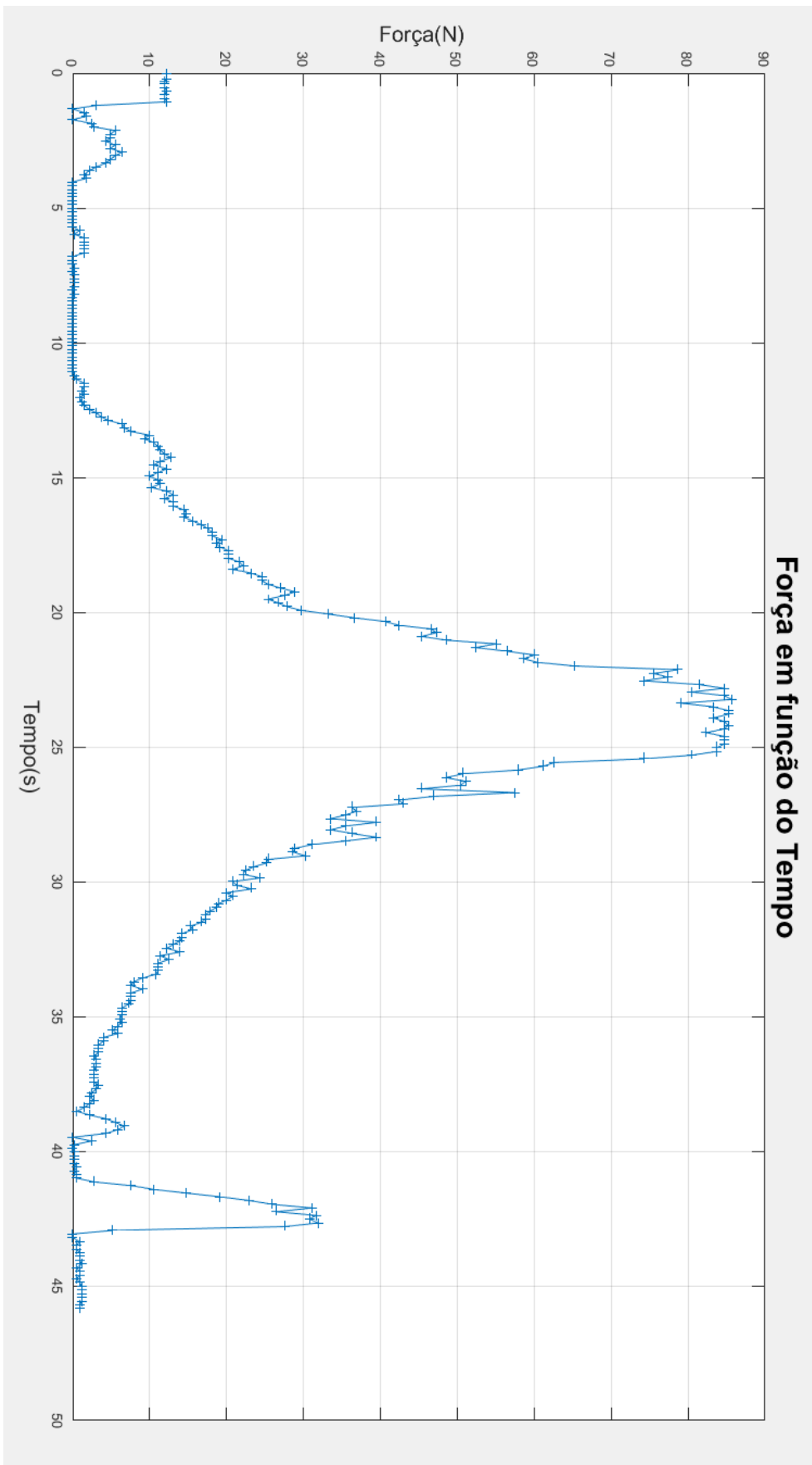


Figura A.3 Gráfico da força aplicada durante o teste descrito na secção 4.1 em função do tempo

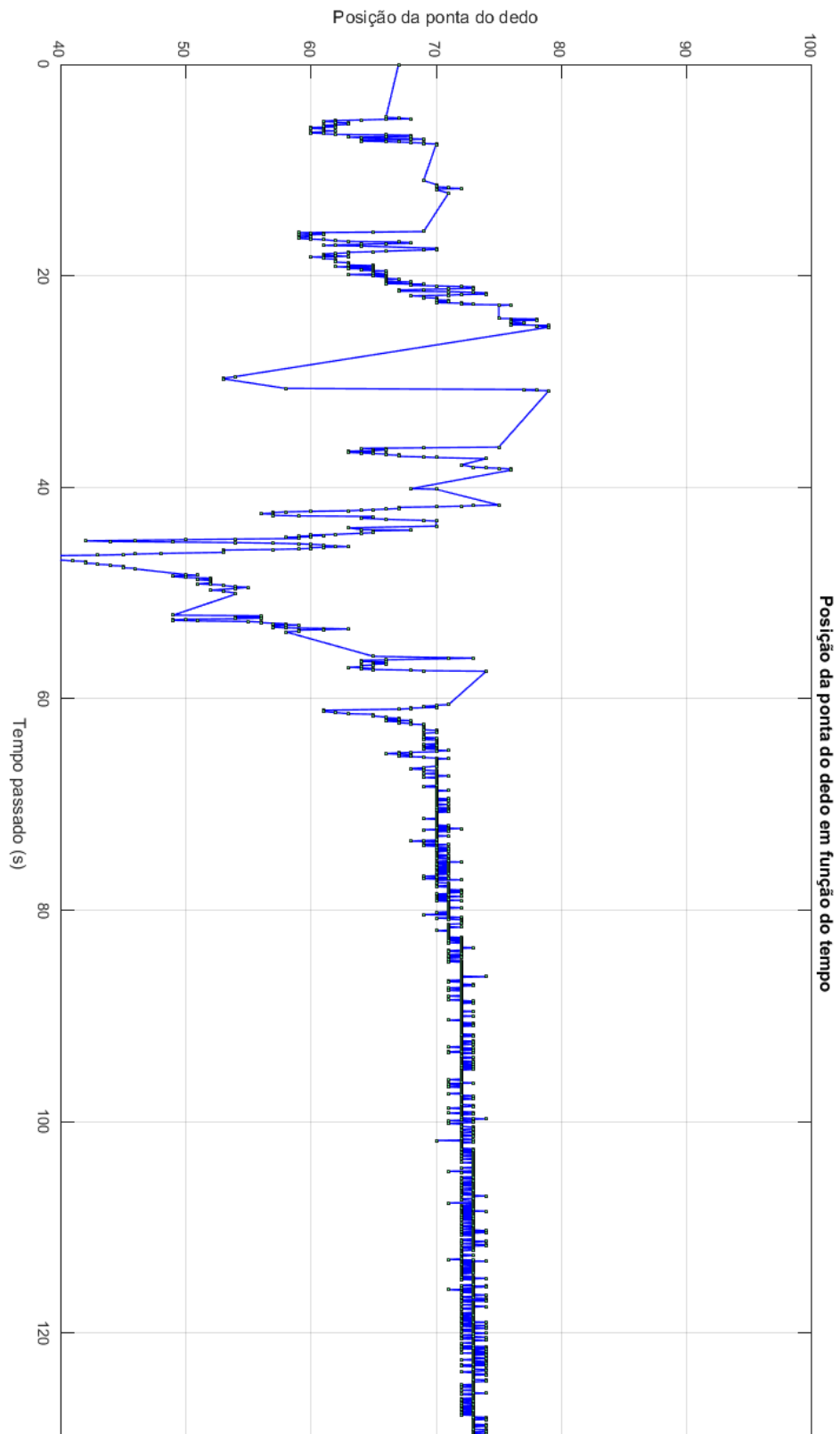


Figura A.4 Posição da ponta do dedo ao longo do tempo (teste do ovo)

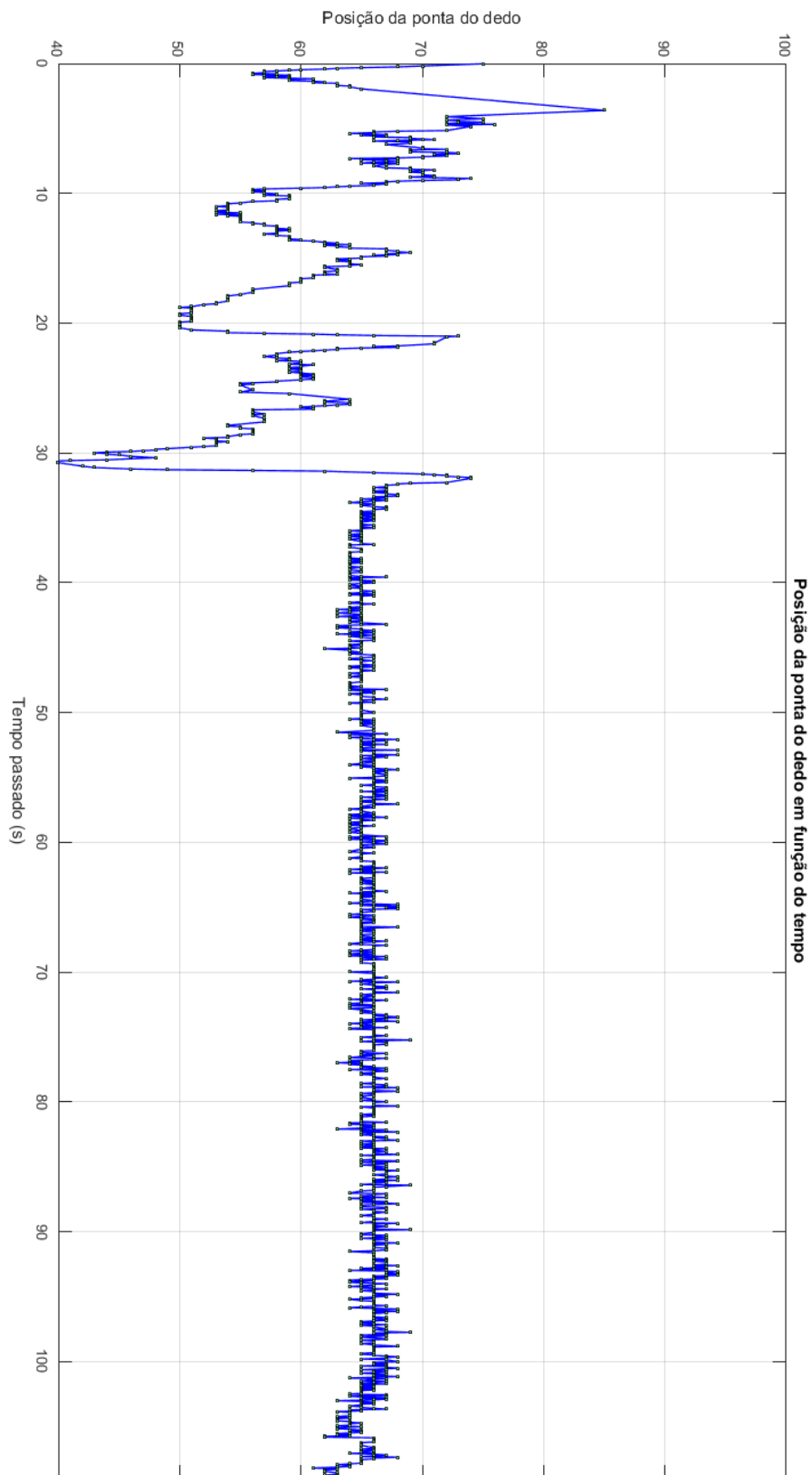


Figura A.5 Posição da ponta do dedo ao longo do tempo (teste do tomate)

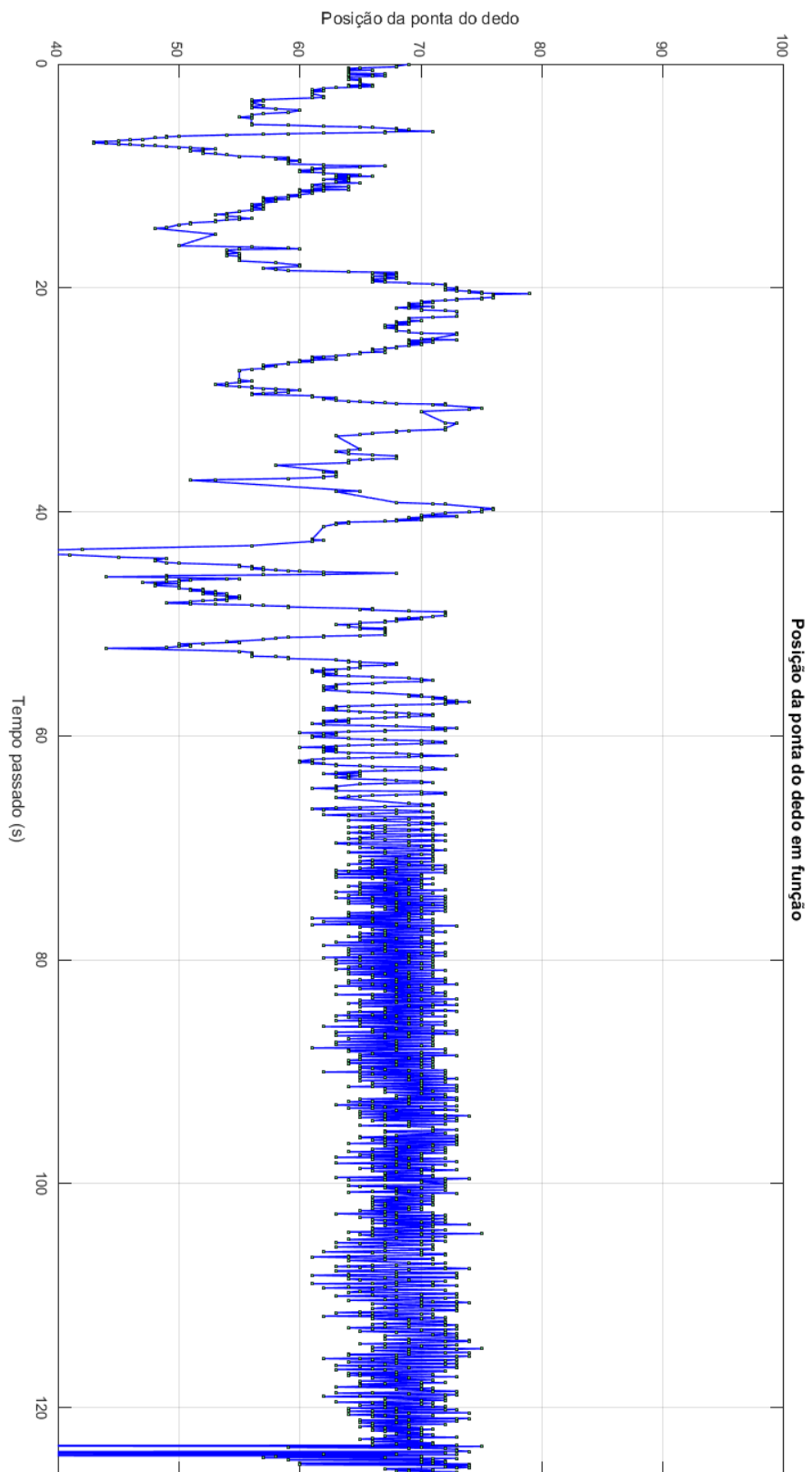


Figura A.6 Posição da ponta do dedo ao longo do tempo (teste do cubo de algodão)

Technology	Low Weight	Small Size	Robust	Simple Construction	Signal Processing
Whisker / Antenna	-	--	++	+	++
Mechanical displacement	+	+	++	++	++
Pneumatic touch sensor / Foil switches	+	+	++	++	++
Digital tactile sensor array	+	+	-	+	++
Capacitive	+	-	+	-	+
Metal Strain Gauges	++	++	-	+	+
Semiconductor strain gauge	++	++	-	+	+
Conductive elastomers	+	+	-	-	+
Carbon felt and Carbon fibers	+	-	++	+	+
Piezoelectric	+	+	+	-	-
Pyroelectric	+	+	+	-	-
Frustrated internal reflection	-	-	-	--	-
Opto-mechanical	-	+	--	-	-
Fiber-optic	-	--	-	--	-
Photoelasticity	-	--	--	--	--
Tracking of optical markers	-	-	-	--	--
Hall effect	+	+	+	-	-
Magnetoelastic	+	+	+	--	--
Ultrasonic	+	+	+	+	+
Electrochemical	-	-	-	--	-

Tabela A.1 Vários tipos de tecnologias de sensores de força e a suas propriedades [44]

Empresa	Produtos	Especificações
PMD technologies	PMD CamCube 3.0	Pixel Array Size: 200 (h)×200 (v) Field of View: 40×40° Operating Range: 0.3-7 m Absolute Accuracy: 3mm Frame Rate: 40- fps (typ) Dimensions: 60×60×60 mm Illumination type: laser (850nm)
PMD technologies	CamBoard pico	Pixel Array Size: 160 (h)×120 (v) Field of View: 82×66° Operating Range: 0.2-1 m Absolute Accuracy: 3mm Frame Rate: 45 fps Dimensions: 89×17×6 mm Illumination type: LED (850nm)
Mesa Imaging AG	SR4000	Pixel Array Size: 176 (h)×144 (v) Field of View: 69×55° Operating Range: 5 m or 10 m Absolute Accuracy: ±1cm or 1% Frame Rate: 10-30- fps (typ) Dimensions: 65×65×67 mm Illumination type: LED (850nm)
Microsoft & PrimeSense	Kinect	Pixel Array Size: 320 (h)×240 (v) Field of View: 57×43° Operating Range: 1.2-3.5 m Frame Rate: 30- fps (typ) Illumination type: laser (830nm)
SoftKinetic	DS525	Pixel Array Size: 320 (h)×240 (v) Field of View: 74×58 ° Operating Range: 0.15-1.0 m Frame Rate: 25-30- fps (typ) Dimensions: 100×26×20 mm Illumination type: Diffused laser
Panasonic	D-Imager EKL 3104	Pixel Array Size: 160 (h)×120 (v) Field of View: 60×44 ° Operating Range: 1.2-9.0 m Absolute Accuracy: 3 cm Frame Rate: 30- fps (typ) Dimensions: 54×170×49 mm Illumination type: LED (850nm)
3 DV Systems	ZCam	Pixel Array Size: 320 (h)×240 (v) Field of View: 60×60 ° Operating Range: 0.5-2.5m Absolute Accuracy: 2 cm Frame Rate: 30- fps (typ) Dimensions: 85×90×60 mm Illumination type: laser (800nm)
Canesta	Cobra	Pixel Array Size: 320 (h)×200 (v) Absolute Accuracy: 1 mm Frame Rate: 30-100- fps (typ) Illumination type: LEDFrame
DINAST	IPA-1110	Pixel Array Size: 320 (h)×240 (v) Field of View: 78×78 ° Operating Range: 10-80 cm Absolute Accuracy: ±5 mm Frame Rate: 25- fps (typ) Dimensions: 80×50×38 mm Illumination type: LED (850nm)
FOTONIC	C-Series	Pixel Array Size: 160 (h)×120 (v) Field of View: 70×53 °

		Operating Range: 0.1-10 m Absolute Accuracy: ±40 mm Frame Rate: 10- fps (typ) Dimensions: 80×160×86.3 mm Illumination type: LED (850nm)
Asus	Xtion PRO	Pixel Array Size: 320 (h)×240 (v) Field of View: 58×45° Operating Range: 0.8-3.5 m Frame Rate: 30- fps (typ) Dimensions: 180×35×50 mm Illumination type: LED (850nm)
Leap Motion	Leap Motion	Pixel Array Size: 640 (h)×240 (v) Field of View: 150×120° Operating Range: 0-60 cm Frame Rate: 200 fps Dimensions: 79×30×12.7 mm Illumination type: LED
University Siegen ZESS	2D/3D Multi CAM	Pixel Array Size: 160 (h)×120 (v) Field of View: 46×34.4° Operating Range: 5 m Absolute Accuracy: ±1.2cm Frame Rate: 12- fps (typ) Dimensions: 80×85×120 mm Illumination type: LED (860nm)

Tabela A.2 Câmaras ToF disponíveis no mercado e as suas características [37]

Material	Tensile Modulus (Young's Modulus, Modulus of Elasticity) <i>E (GPa)</i>
ABS plastics	1.4 - 3.1
Acetals	2.8
Acrylic	3.2
Aluminum Bronze	120
Aluminum	69
Aramid	70 - 112
Beryllium (Be)	287
Bone, compact	18

Bone, spongy	76
Brass	102 - 125
Brass, Naval	100
Bronze	96 - 120
CAB	0.8
Carbon Fiber Reinforced Plastic	150
Carbon nanotube, single-walled	1000+
Cellulose nitrate, celluloid	
Chlorinated polyether	1.1
Chlorinated PVC (CPVC)	2.9
Concrete	17
Concrete, High Strength (compression)	30
Copper	117
Diamond (C)	1220
Douglas fir Wood	13
Epoxy resins	3-2
Fiberboard, Medium Density	4
Flax fiber	58
Glass	50 - 90

Glass reinforced polyester matrix	17
Gold	74
Granite	52
Graphene	1000
Grey Cast Iron	130
Hemp fiber	35
Iron	210
Magnesium metal (Mg)	45
MDF - Medium-density fiberboard	4
Molybdenum (Mo)	329
Nickel	170
Nylon-6	2 - 4
Oak Wood (along grain)	11
Osmium (Os)	550
Phosphor Bronze	116
Pine Wood (along grain)	9
Plutonium	97
Polybenzoxazole	3.5
Polycarbonates	2.6

Polyethylene HDPE (high density)	0.8
Polyethylene Terephthalate, PET	2 - 2.7
Polyamide	2.5
Polymethylmethacrylate (PMMA)	2.4 - 3.4
Polyimide aromatics	3.1
Polypropylene, PP	1.5 - 2
Polystyrene, PS	3 - 3.5
Polyethylene, LDPE (low density)	0.11 - 0.45
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.4
Polyvinylchloride (PVC)	2.4 - 4.1
Rubber, small strain	0.01 - 0.1
Sapphire	435
Silicon	130 - 185
Silicon Carbide	450
Steel, High Strength Alloy ASTM A-514	
Steel, stainless AISI 302	180
Steel, Structural ASTM-A36	200
Tin	47
Titanium Alloy	105 - 120

Tooth enamel	83
Tungsten (W)	400 - 410
Tungsten Carbide (WC)	450 - 650
Uranium	170
Wrought Iron	190 - 210

Tabela A.3 Módulo de Young para diferentes materiais [1]