

**IDENTIFICAÇÃO INTERATIVA DA
ELASTICIDADE DE MATERIAIS POR MEIO DA
EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS VISUAIS E
GEOMÉTRICAS**

ROBERTO ALMEIDA GONTIJO

IDENTIFICAÇÃO INTERATIVA DA
ELASTICIDADE DE MATERIAIS POR MEIO DA
EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS VISUAIS E
GEOMÉTRICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

ORIENTADOR: MÁRIO FERNANDO MONTENEGRO CAMPOS

COORIENTADOR: ERICKSON RANGEL DO NASCIMENTO

Belo Horizonte

Setembro de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG

Gontijo, Roberto Almeida.

G641i Identificação interativa da elasticidade de materiais por meio da extração de características visuais e geométricas./ Roberto Almeida Gontijo. – Belo Horizonte, 2017. xxvi, 146 f.: il.; 29 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Ciência da Computação.

Orientador: Mario Fernando Montenegro Campos.
Coorientador: Erickson Rangel do Nascimento

1. Computação - Teses. 2. Métodos de identificação de materiais por deslocamentos. 3. Robôs – Percepção de materiais. 4. Interação háptica I. Orientador. II. Coorientador. III. Título.

CDU 519.6*82.10(043)



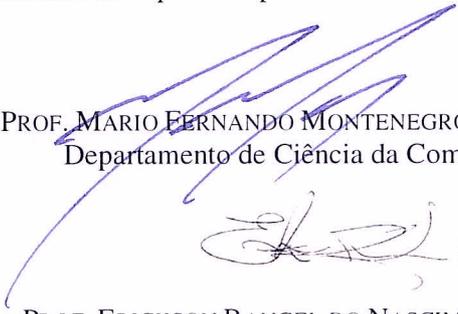
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Identificação interativa da elasticidade de materiais por meio da extração de características visuais e geométricas

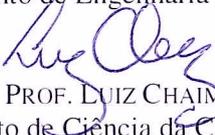
ROBERTO ALMEIDA GONTIJO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


PROF. MARIO FERNANDO MONTENEGRO CAMPOS - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG


PROF. ERICKSON RANGEL DO NASCIMENTO - Coorientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG


PROF. EDUARDO JOSÉ LIMA II
Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG


PROF. LUIZ CHAIMOWICZ
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

Belo Horizonte, 14 de setembro de 2017.

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha namorada e às minhas irmãs.

Agradecimentos

Desafio tão grande quanto a escrita da dissertação e o desenvolvimento do trabalho de mestrado consiste em expressar a gratidão que sinto pelos meus pais, Leonite Almeida Gontijo e Julio Maria Gontijo. Além de agradecê-los pelo auxílio em todos momentos, pela paciência e pelo tratamento de carinho, amor, respeito e apoio, devo agradecê-los pela oportunidade de desenvolver estudos de qualidade desde o primário até o presente momento, sem cobranças, com muita tolerância e otimismo. Além disso, gostaria de agradecê-los por todo auxílio durante o mestrado, pelas inúmeras conversas e ajuda nas diversas montagens dos experimentos. Para mim, vocês foram verdadeiros coautores desse trabalho. Obrigado!

À minha namorada, Mariana Silva Nunes, pelo amor, dedicação e carinho. Por ser minha companheira há sete anos e buscar o meu melhor a cada dia. Agradeço por todo incentivo, por sempre acreditar que eu poderia encontrar as soluções para os diversos problemas, mesmo quando eu mesmo não acreditava. Obrigado pela disponibilidade e boa vontade em me ajudar.

Agradeço às minhas irmãs Juliana, Fabiana, Poliana, Tatiana e Luciana, e seus respectivos companheiros, por todo afeto, carinho e respeito. Agradeço às quatro primeiras, que já são mães, e seus filhos, hoje pequenos, por tornarem o meu dia-a-dia mais suave e os meus finais de semana mais alegres.

Agradeço aos meus amigos Átila Vinícios, Felipe Martins, Flávio Bastos Haueisen, Flávio Martins, Leonardo Serra, Nilton Jansenn, Robert Moura e Wenderson Maia por todo incentivo e amizade. Agradeço em especial aos companheiros de disciplina Leonardo Serra e Wenderson Maia com os quais iniciei trabalhos, nas disciplinas de Sistemas de Tempo Real e Visão Computacional, os quais continuamos desenvolvendo até o presente momento.

Agradeço ao professor Mário Fernando Montenegro Campos pelos diálogos que permitiram um maior entendimento e direcionamento no mestrado.

Agradeço ao professor Erickson Rangel do Nascimento pela sugestão do uso do Kinect para medição de pequenos deslocamentos, logo após a submissão do projeto de dissertação, e pela solicitação dos ensaios mecânicos ao CDTN.

Ao professor Eduardo José Lima II pelas explicações referentes a mecanismos, robótica de manipuladores e pela constante boa vontade em compartilhar conhecimentos.

Ao Marcelo Henrique Souza Bomfim pela grande disposição em ajudar e por ser um grande incentivador dos estudos na área de robótica e eletrônica.

A todos do Laboratório de Visão Computacional e Robótica por compartilharem comigo conhecimentos.

Agradeço ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e seus respectivos membros pela grande boa vontade e disponibilidade para a realização dos Ensaios Mecânicos de Compressão Uniaxial que foram necessários para o presente trabalho.

Agradeço à CAPES/CNPQ pelo fornecimento da bolsa de fomento com a qual pude me manter no mestrado.

“Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela como único objetivo, obtém, ao fim e ao cabo, a capacidade de fazer qualquer coisa.”
(Mahatma Gandhi)

Resumo

O presente trabalho apresenta como principal objetivo a implementação de dois novos métodos para identificação de materiais: *Método de Análise Local de Deslocamentos por Curvas de Nível (MALD-CN)* e *Método de Análise Local de Deslocamentos de Pontos Característicos (MALD-PC)*, superando os principais problemas dos métodos de identificação de materiais baseados na análise de deslocamentos adotados na atualidade. Ambos apresentam como conceito fundamental, de forma simplificada, que a deformação local de um material é dependente do esforço aplicado, da área do efetuidor e da curvatura local, mas é independente da espessura (a partir de certos limites) e da geometria global de objetos (a partir de certos limites).

Existem diferentes técnicas para a identificação de materiais como a determinação da frequência natural, de propriedades elétricas, a análise de deslocamentos. Em termos de análise de deslocamentos, o método de medição de dureza e o Método de Elementos Finitos Inverso (MEFI) correspondem às técnicas adotadas no estado da arte. De forma geral, os métodos de medição de dureza apresentam a desvantagem de necessitar de ambientes controlados. Já o MEFI requer grande tempo de execução, inviabilizando sua utilização em sistemas de tempo real crítico ou suave como sistemas robóticos.

Como principais contribuições, pode-se citar a criação dos métodos MALD-CN e MALD-PC para a identificação de materiais; o fato de ambos os métodos não necessitarem de ambientes controlados para a identificação de materiais, ao contrário dos métodos baseados em análise de dureza, e poderem ser executados em tempo real ao contrário do Método de Elementos Finitos Inverso. O MALD-CN apresentou 100% de acerto na identificação de espumas, para os objetos testados, em experimentos realizados em ambiente controlado e em experimentos realizados por robô. Já o MALD-PC apresentou taxas de acerto, na identificação de espumas, de 94% para experimentos realizados em ambientes controlados e 100% em experimentos realizados por robôs.

Palavras-chave: métodos de identificação de materiais por deslocamentos, análise local de deslocamentos, interação háptica, robôs aplicados a identificação de materiais, percepção em tempo real.

Abstract

This work presents as the main objective the development of two new methods for material identification: *Local Displacement Analysis Method by Level Curves (LDAM-LC)* and *Local Displacement Analysis Method by Characteristic Points (LDAM-CP)*, overcoming the main problems of the material identification methods based on displacement analysis adopted at state-of-the-art. Both methods present as fundamental concept, in a simplified manner, that the local deformation of a material is dependent of the applied force, the effector area and the local curvature, but it is independent of the thickness (from certain limits) and the global geometry of objects (from certain limits).

There are different techniques for material identification such as the determination of natural frequency, electrical properties, techniques based on reflection and refraction, displacement analysis, to name a few. In terms of displacement analysis, state-of-the-art methods are based on hardness measurement and Inverse Finite Element Method. In general, the hardness measurement methods have the disadvantage of requiring tests in controlled environments and the Inverse Finite Element Method presents as the main disadvantage the fact that it requires a big execution time, making it impossible to apply in hard or soft real time systems.

As main contributions, one can mention the creation of the LDAM-LC and LDAM-CP for material identification; the fact that both methods do not require controlled environments for the material identification, unlike methods based on hardness analysis, and can be executed in real time unlike the Inverse Finite Element Method. MALD-CN presented 100% accuracy in the foam identification, for the tested objects, in experiments performed in a controlled environment and in experiments performed by robot. The MALD-PC had 94% accuracy, in foam identification, for experiments in controlled environments and 100% in experiments performed by robots.

Keywords: methods to material identification by displacements, local displacement analysis, haptics, robots applied to material identification, real time perception.

Lista de Figuras

1.1	Classes de materiais.	3
3.1	Metodologia geral - Sequência de atividades.	22
3.2	Fluxograma do Método de Elementos Finitos.	23
3.3	Exemplo de modelo para representação de uma parte de um objeto.	24
3.4	Curvaturas de superfície.	25
3.5	Nomenclatura geral - Compressão de um objeto de geometria genérica - Vista em corte.	27
3.6	Objeto de geometria genérica - Determinação do Raio de Deformação e do Raio do Cilindro.	28
3.7	Fluxograma para alinhamento de nuvens de pontos.	36
3.8	MALD-CN - Vista em corte de um objeto antes e após a deformação - Conceito Central.	38
3.9	Fluxograma referente ao MALD-CN utilizando câmera e sem o alinhamento de nuvens de pontos.	39
3.10	MALD-CN - Comparação entre curvaturas antes e após deformação - Pro- blema da projeção perspectiva.	40
3.11	Robô e atuador linear - Visão frontal.	42
3.12	MALD-PC - Vista em corte de um objeto antes e após a deformação - Conceito central: Rastreamento de pontos.	44
3.13	MALD-PC - Fluxograma.	45
4.1	Ensaio manual de compressão uniaxial.	50
4.2	Corpos de prova.	51
4.3	Todas espumas - Curvas tensão×deformação, ensaios de compressão unia- xial a 0.01/s.	52
4.4	Todas espumas - Curvas tensão×deformação, ensaios de compressão unia- xial a 0.03/s.	52

4.5	Todas espumas - Curvas tensão×deformação, ensaios de compressão uniaxial a 0.083/s.	53
4.6	Espuma Rosa - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.	54
4.7	Espuma Cinza - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.	54
4.8	Espuma Laranja - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.	55
4.9	Espuma Verde - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.	55
4.10	Todas Espumas - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação distintas.	57
4.11	Espumas Cinzas - Diferentes espessuras - Curvas tensão×deformação obtidas a taxa de deformação 0.01/s.	58
4.12	Espuma Cinza - Teste de isotropia - Compressão de três faces distintas C-102, OL e OL2.	58
4.13	Curvaturas de superfície sobre um cilindro de diâmetro 120 mm.	59
4.14	Curvaturas de superfície.	60
4.15	Efeito da normalização do erro no ajuste de curva para curva tensão-deformação da espuma verde - 0.083/s.	61
4.16	Influência do maior número de pontos no ajuste de curva - Espuma Verde - 0.083/s.	62
4.17	Modelos de Blatz-Ko ajustados a dados experimentais - 0.01/s - Sem erro normalizado.	63
4.18	Modelos de Ogden-Foam de primeira, segunda e terceira ordem ajustados a dados experimentais referentes a Espuma Rosa - 0.083/s - Sem erro normalizado.	63
4.19	Valor mínimo para o Raio do Cilindro - Deslocamentos locais da espuma rosa na direção Z.	65
4.20	Limite de espessura - Deslocamentos locais da espuma rosa na direção Z.	65
4.21	Espuma Rosa - Deslocamentos na vertical (Eixo Z) (mm).	67
4.22	Espuma Rosa - Deslocamentos na direção X (mm).	68
4.23	Espuma Rosa - Deslocamentos na direção Y (mm).	69
4.24	Espuma Cinza - Deslocamentos na vertical (Eixo Z) (mm).	70
4.25	Espuma Cinza - Deslocamentos na direção X (mm).	71
4.26	Espuma Cinza - Deslocamentos na direção Y (mm).	72

4.27	Simulação de deformação de espuma cinza - Objetos com dimensões superiores a raio mínimo do cilindro e mínima espessura, quando sofrem deformações locais, apresentam tensões desprezíveis próximo a borda do objeto.	73
4.28	Deformações locais resultam em tensões desprezíveis próximo a regiões de borda - Seleção de nós.	73
4.29	Deformações locais resultam em tensões desprezíveis próximo a regiões de borda - Tensões máximas em relação a nodos selecionados na Figura 4.28.	74
4.30	Espuma Verde - Simulação - Deslocamentos esperados (mm).	75
5.1	Materiais adquiridos.	78
5.2	Objetos com capas e bolas.	79
5.3	Máquina universal para ensaios mecânicos Instron 5882.	80
5.4	Robô móvel <i>TurtleBot</i>	81
5.5	Espumas Rosa de diferentes geometrias e com alfinetes posicionados - Antes da deformação.	83
5.6	Experimentos reais - Prova conceitual - Espumas Rosa com geometrias de tronco de pirâmide, prismas hexagonal e retangular.	84
5.7	Máquina de Ensaios - Calibração de parâmetros extrínsecos do Kinect 1.0 em relação à bandeja.	86
5.8	Alinhamento de nuvens de pontos referente à espuma cinza quase-homogênea.	90
5.9	Objetos Quase-Homogêneos - Diferentes capas.	90
5.10	Objetos Quase-Homogêneos - Capa escolhida - Correspondência entre pontos característicos antes e após deformação.	91
5.11	MALD-CN - Legenda de cores, conforme a variação de profundidade Z. . .	92
5.12	Ensaio Controlados - Objetos utilizados - Deslocamentos máximos de objetos quase-homogêneos ou heterogêneos.	94
5.13	MALD-CN - Espuma Rosa - Determinação de curvas de nível.	96
5.14	MALD-CN - Espuma Cinza - Determinação de curvas de nível.	96
5.15	MALD-CN - Espuma Verde - Determinação de curvas de nível.	97
5.16	Calibração de parâmetros extrínsecos - Kinect do robô.	101
5.17	Testes com robô - Diferenciação de materiais - Visão de conjunto.	102
5.18	MALD-CN - Identificação de espumas.	103
A.1	Tipos de esforços. (Fonte: HIBBELER [2007])	117
A.2	Deformações normal e por cisalhamento.	118
B.1	Método Rockwell para medição de dureza. (Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch [2007])	123

B.2	Método Brinell para medição de dureza. (Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch [2007])	123
B.3	Método Shore para medição de dureza.	124
C.1	Ensaio de compressão uniaxial - Corpo de prova de uma espuma laranja em uma máquina de ensaios universal Instron 5882.	125
E.1	Kinect 1.0 ou Kinect do XBOX 360.	129
H.1	Máquina de Ensaio - Projeto preliminar.	136
H.2	Máquina de Ensaio Construída - Detalhamento.	137
H.3	Acoplamento de Alta - Projeto preliminar e construção	139
H.4	Atuador Linear - Projeto preliminar e construção.	139
H.5	Atuador Linear Desmontado - Diversos componentes e ferramentas.	140
H.6	Atuador Linear - Mecanismo pinhão-cremalheira para a transmissão de esforços.	140
H.7	Atuador Linear - Experimento para medição da força transmitida (2 kgf nesse caso, <i>Zoom</i> na balança).	141
H.8	Motor Dynamixel AX-12+ - Curva força de transmissão em função da velocidade de rotação.	142

Lista de Tabelas

2.1	Quadro comparativo dos métodos de identificação de materiais.	19
2.1	Continuação - Quadro comparativo dos métodos de identificação de materiais.	20
5.1	Experimentos Reais - Prova conceitual - Espumas Rosa - Tronco de pirâmide, prismas retangular e hexagonal - Aplicação de esforço (2 kgf) e deslocamentos de pontos característicos (mm).	85
5.2	Ensaio Controlado - Efeitos da velocidade de carregamento e de tensões residuais - Carregamentos Lento e Rápido - Deslocamentos máximos (mm).	87
5.3	Ensaio Controlado - Testes de repetição - Deslocamentos máximos (mm).	89
5.4	Ensaio Controlado - Testes de repetição para diferentes forças - Carregamento lento - Deslocamentos máximos (mm).	93
5.5	Ensaio Controlado - Testes de repetição - Força aplicada de 2 kgf - Carregamento rápido - Deslocamentos máximos (mm).	95
5.6	MALD-CN - Identificação de espumas - Deslocamentos máximos (mm) - Legenda: Figura 5.12.	100
5.7	MALD-CN - Diferenciação de objetos heterogêneos - Legenda: Figura 5.18.	104
5.8	Experimentos reais e por simulação - Deslocamentos esperados (mm). . . .	106
5.9	MALD-PC - Diferenciação de materiais em ambiente controlado - Legenda refere-se a Figura 5.12 - Todas medidas estão em mm.	107
5.10	MALD-PC - Diferenciação de materiais por robô.	108
5.11	Diferentes Espumas - Comparação entre tempos de execução.	109

Sumário

Agradecimentos	ix
Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Classificação de Materiais - Composição	2
1.2 Classificação de Materiais - Elasticidade	4
1.3 Motivação	7
1.4 Definição do Problema	9
1.5 Contribuições	10
1.6 Estrutura da Dissertação	11
2 Identificação de Materiais	13
3 Metodologia	21
3.1 Ensaio Laboratoriais	22
3.1.1 Simulações por Elementos Finitos	23
3.1.2 Ensaio de Compressão Uniaxial	25
3.2 ANSYS	26
3.3 Conceitos e Validação da Hipótese do Trabalho	27
3.3.1 Conceitos - Raio de Deformação e Raio do Cilindro	27
3.3.2 Validação da hipótese do trabalho	29
3.4 Métodos de Análise Local de Deslocamentos	31
3.4.1 Ensaio em Ambiente Controlado	32

3.4.2	Alinhamento de Nuvens de Pontos	34
3.4.3	Objetos Homogêneos, Heterogêneos e Quase-Homogêneos	36
3.4.4	Método de Análise Local de Deslocamentos Por Curvas de Nível (MALD-CN)	37
3.4.5	Método de Análise Local de Deslocamentos Por Pontos Característicos (MALD-PC)	43
4	Ensaaios Laboratoriais	49
4.1	Ensaaios de Compressão Uniaxial	49
4.1.1	Ensaio Manual	50
4.1.2	Ensaaios - Corpos de Prova	50
4.1.3	Ensaaios - Curvas Tensão×Deformação	51
4.2	Simulação	59
4.2.1	Ajuste de Modelos de Materiais	61
4.2.2	Número de Pontos	62
4.2.3	Melhores Modelos	62
4.3	Simulação - Validação da Hipótese do Trabalho	64
4.3.1	Determinação dos Valores Mínimos de Raio do Cilindro e Espessura	64
4.3.2	Deslocamentos Locais	66
4.3.3	Identificação de Materiais - Uma explicação para a deformação local como propriedade	72
4.3.4	Deslocamentos Locais de Referência	74
5	Experimentos Reais	77
5.1	Projeto e Construção de Dispositivos	77
5.2	Materiais	78
5.2.1	Objetos Utilizados	78
5.2.2	Objetos com Capas e Bolas	79
5.2.3	Ensaaios Mecânicos Padrão	79
5.2.4	Materiais Diversos	79
5.2.5	Robô <i>TurtleBot</i>	81
5.3	<i>Softwares</i>	81
5.4	Experimentos Reais - Validação da hipótese do trabalho	83
5.4.1	Descrição	83
5.4.2	Deslocamentos de pontos característicos - Geometrias distintas	84
5.5	Ensaaios em Ambiente Controlado	85
5.5.1	Calibração de Câmera	85

5.5.2	Testes com medição precisa - Objetos Homogêneos - Deslocamentos Máximos	86
5.6	Alinhamento de Nuvens de Pontos	89
5.7	Objetos Homogêneos, Heterogêneos e Quase-Homogêneos	89
5.8	Método de Análise Local de Deslocamentos Por Curvas de Nível (MALD-CN)	92
5.8.1	Legenda de cores	92
5.8.2	Ensaio em Ambiente Controlado - Testes de Repetição - Deslocamentos Máximos	92
5.8.3	Experimentos com o robô	101
5.9	Método de Análise Local de Deslocamentos Por Pontos Característicos (MALD-PC)	105
5.9.1	Prova Conceitual do MALD-PC	105
5.9.2	Deslocamentos de referência para o MALD-PC	105
5.9.3	Diferenciação de Materiais	106
5.10	Identificação de Materiais - Comparação entre Tempos de Execução . .	108
5.11	Discussão sobre a validade dos métodos propostos	110
6	Conclusões	113
6.1	Conclusão	113
6.2	Trabalhos Futuros	115
	Apêndice A Resistência dos Materiais - Conceitos Fundamentais	117
A.1	Esforços	117
A.2	Tensões (σ)	118
A.3	Deformações	118
A.4	Deslocamentos	119
A.5	Tipos de Carregamentos	119
	Apêndice B Medição de Dureza	121
B.1	Medição de Dureza - Rockwell	122
B.2	Medição de Dureza - Brinell	123
B.3	Medição de Dureza - Shore	123
	Apêndice C Ensaio de compressão uniaxial	125
	Apêndice D Método de Elementos Finitos	127
	Apêndice E Kinect 1.0	129

Apêndice F	Detector STAR	131
Apêndice G	Descritor BRAND	133
Apêndice H	Projeto e Construção de Dispositivos	135
H.1	Máquina para Ensaios em Ambientes Controlados	135
H.1.1	Descrição	135
H.1.2	Projeto Preliminar e Máquina Construída	136
H.2	Atuador Linear	136
H.2.1	Descrição	136
H.2.2	Projeto Preliminar e Atuador Linear Construído	138
H.2.3	Dynamixel AX-12+ - Controle e Medição da Força de Transmis- são Resultante	141
Referências Bibliográficas		143

Capítulo 1

Introdução

A percepção do ser humano em relação ao ambiente ocorre pela interpretação de informações sensoriais adquiridas pelo sistema nervoso periférico. Essas informações são percebidas por meio dos sentidos de audição, paladar, olfato, visão e tato. Cada um dos sentidos apresenta características específicas e trabalha com diferentes informações. A audição é induzida a partir da vibração ocasionada por um conjunto de ondas mecânicas. O paladar e o olfato são determinados pela percepção de reações químicas. A visão ocorre por meio da percepção do sistema óptico em relação a um conjunto de ondas eletromagnéticas cujo comprimento de onda se enquadra no espectro visível. O tato é o resultado da percepção de força por um conjunto de células. Analogamente, em termos de robótica, um robô percebe o mundo por meio da interpretação de dados obtidos por sensores os quais podem ser sonoros, baseados na percepção de elementos químicos, simulando os sentidos do olfato e paladar, ópticos ou na detecção de esforços aplicados.

Um material é um conglomerado de matéria que apresenta um conjunto de propriedades mecânica, elétrica, óptica, térmica e magnética.¹ A *identificação de material* consiste em rotular o material (Em termos de categoria e.g., polímero, cerâmica, composto, metal, ou mais especificamente em (sub)subcategorias e.g., espuma, borracha, fibra de silicone, fibra de acrílico) e determinar por meio de experimentos uma ou mais propriedades que estão associadas a esse material como rigidez, densidade, dureza, atenuação acústica, coeficientes de reflexão, frequências de ressonância, curvas tensão-deformação.

Deseja-se que o robô seja capaz de realizar ações inteligentes ao longo de um ambiente. Para que essas ações sejam executadas, muitas vezes, é importante que o robô identifique os materiais que constituem os objetos do ambiente. A identificação

¹Conceito de material: <https://conceito.de/material>

de materiais permite encontrar superfícies ideais para a manipulação e o posicionamento dos objetos. Ou seja, permite que superfícies com propriedades desejadas de amortecimento, rigidez, condutividade elétrica, dentre outras, sejam encontradas.

Conhecendo-se o material e a geometria de um objeto, é possível estimar as cargas suportadas. Também é possível selecionar o melhor processo para manipular um dado objeto. Por exemplo, caso um robô móvel e um manipulador devam retirar uma amostra de um objeto constituído por espuma de baixa densidade, praticamente qualquer material cortante poderia ser utilizado, entretanto para um material de grande dureza como materiais cerâmicos, o diamante sintético poderia ser recomendado.

Em termos de realidade virtual, a identificação de materiais é importante na construção de ambientes realísticos, melhorando as experiências de telepresença. De forma geral, é esperado que os modelos simulados reproduzam ambientes reais com o maior foto-realismo possível além de permitir interações hápticas adequadas com os diversos objetos de um ambiente. A interação háptica com um objeto depende do tipo de material que o constitui.

De forma sucinta, para a área de robótica, a identificação de materiais é importante para a simulação, reprodução ou detecção de propriedades de materiais como: reflexão, refração, rugosidade, vibração, atenuação sonora, simulação de falha por tração, compressão, flexão, flambagem, cisalhamento, determinação de esforços máximos suportados por um objeto, cálculo de pesos, simulação de fratura frágil ou dúctil, estimativas de deformações, escolha de operações para manipular objetos, interação humano e ambiente de realidade virtual, sistemas hápticos.

1.1 Classificação de Materiais - Composição

Os materiais podem ser classificados em quatro categorias: metais, cerâmicas, polímeros e compósitos. Os metais caracterizam-se por serem compostos por materiais metálicos em grande quantidade e pouca quantidade de materiais não-metálicos. O grupo de cerâmicas é caracterizado por apresentar materiais metálicos e não-metálicos. Algumas das cerâmicas comuns são óxido de alumínio e dióxido de silício. Cerâmicas, em termos de propriedades mecânicas, geralmente são rígidas e muito duras, embora sejam extremamente frágeis devido a sua baixa ductilidade. Além disso, as cerâmicas, geralmente, resistem a temperaturas mais altas que metais e polímeros. Os polímeros, muitas vezes, são compostos orgânicos de cadeia longa. Ou seja, apresentam em sua composição carbono, hidrogênio e alguns materiais não-metálicos. A categoria de polímeros inclui a família de plásticos e materiais emborrachados. O compósito é com-

posto por duas ou mais categorias de materiais de forma a obterem-se propriedades desejadas, um exemplo é a fibra de carbono. (Callister & Rethwisch [2007])

As diferentes classes de materiais incluindo algumas subclasses em termos de rigidez e densidade são apresentadas na Figura 1.1. A rigidez de um material diz respeito ao esforço necessário para deformar um material, quanto maior a rigidez, maior será o esforço necessário para provocar uma deformação. A classe de metais, nessa figura, é indicada pelos termos metais e ligas, apresentando grandes valores de rigidez e densidade. A classe de cerâmica é representada pelas subclasses cerâmica e cerâmica porosa, apresentando alta rigidez e, no geral, uma densidade inferior aos metais. A classe compósitos é representada pelas subclasses compósitos e madeira e produtos de madeira. Por último, a classe polímeros é representada pelas subclasses polímeros, borrachas e espumas; contendo materiais de baixa rigidez e densidades baixas a intermediárias.

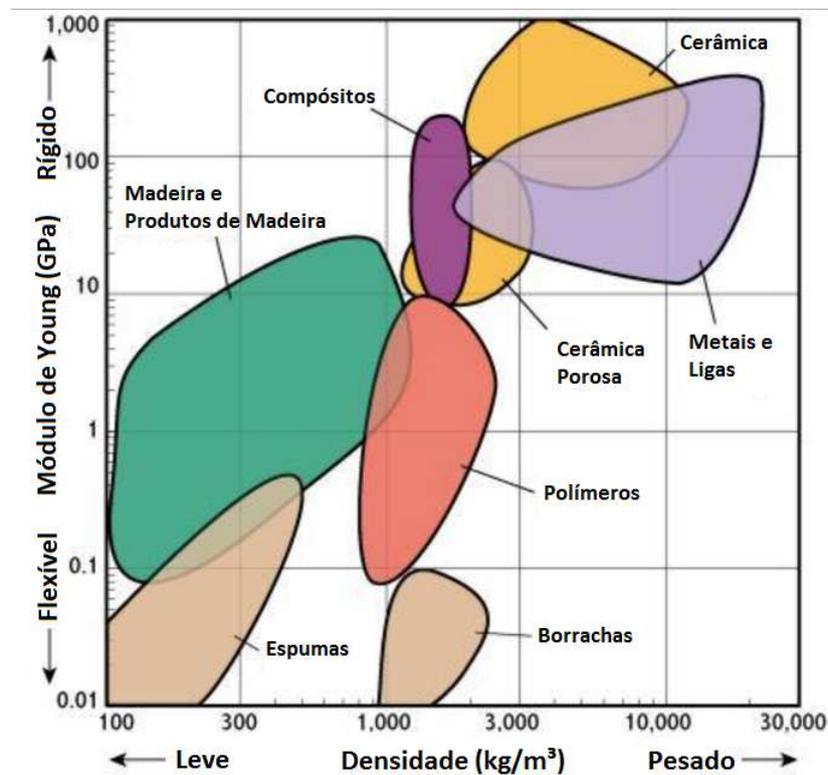


Figura 1.1: Classes de materiais.
(Fonte: Adaptado de UkMaterials ²)

Os métodos de identificação de materiais apresentados neste trabalho são recomendados principalmente para materiais que apresentam grandes deformações com

²UkMaterials: http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/stiffness-density/NS6Chart.html

pequenos esforços. De forma geral, materiais com essas características pertencem ao grupo de compósitos ou polímeros.

Tipos de Polímeros

Os polímeros são aplicados para revestimento de materiais com o objetivo de protegê-los de corrosão ou prover isolamento elétrico. São também utilizados em filmes e para a união de materiais. Além disso, uma aplicação importante de se mencionar é a fabricação de espumas. Espumas são materiais plásticos que apresentam uma grande quantidade de bolhas de ar em seu interior. Os polímeros são divididos em três categorias principais: plásticos, elastômeros e fibras. (Callister & Rethwisch [2007])

Plásticos

São materiais que apresentam alguma rigidez quando submetido a cargas. Existem plásticos que são rígidos, frágeis e alguns que apresentam alguma elasticidade. Alguns exemplos de plásticos são acrílico, poliamidas, policarbonatos, polietileno, polipropileno e poliésteres. (Callister & Rethwisch [2007])

Elastômeros

São materiais que podem sofrer grandes deformações e que retornam ao tamanho inicial após a remoção da aplicação de uma carga. Além disso, esses materiais são elásticos e apresentam uma relação linear entre a deformação sofrida e a força aplicada. Há um conjunto de características que devem ser satisfeitas em termos de propriedades microestruturais para que um polímero seja considerado elastomérico, além das características já citadas. (Callister & Rethwisch [2007])

Fibras

Fibras são polímeros que podem ser divididos em longos fios. São amplamente empregadas na indústria têxtil. Fibras de acrílico são um exemplo dessa subclasse. (Callister & Rethwisch [2007])

1.2 Classificação de Materiais - Elasticidade

Quanto a elasticidade, os materiais podem ser classificados em elásticos, não-elásticos e elastoplásticos. Materiais elásticos são aqueles que retornam às dimensões originais quando um esforço deixa de ser aplicado. Materiais classificados como plásticos, em

termos de elasticidade, são aqueles que não recuperam as dimensões originais quando um esforço deixa de ser aplicado. Já os materiais elastoplásticos apresentam durante uma parte significativa da curva tensão×deformação um comportamento elástico e a partir de um momento, um comportamento plástico. Dentre as categorias de materiais elásticos estão os materiais elásticos, hiperelásticos e viscoelásticos. Na categoria dos materiais não-elásticos, estão os materiais que sofrem quase que somente deformação plástica.³

Materiais não-elásticos

Os materiais não-elásticos são aqueles que quando um esforço deixa de ser aplicado, o material não recupera o formato original. Materiais que sofrem quase que somente deformação plástica, são membros desta categoria. Um exemplo dessa categoria são as sacolas plásticas de supermercado.

Materiais elastoplásticos

Materiais elastoplásticos apresentam um comportamento elástico até determinados valores de tensão e um comportamento plástico caso tensões acima desse limite sejam aplicadas. Um exemplo é o aço.

Materiais elásticos

Os materiais elásticos apresentam a capacidade de recuperar as dimensões originais, quando um esforço deixa de ser aplicado. Os materiais elásticos podem ser divididos em três grupos principais: materiais elásticos, hiperelásticos e viscoelásticos.

Materiais viscoelásticos

Materiais viscoelásticos apresentam simultaneamente um comportamento elástico, retornando ao tamanho original quando um esforço deixa de ser aplicado, e um comportamento viscoso, ou seja, dependente de um atrito interno do material.

³**Nota:** Os materiais que sofrem deformação plástica, em termos de elasticidade, não correspondem somente aos materiais plásticos da categoria de polímeros. Por exemplo, o aço é capaz de sofrer deformações plásticas, dependendo dos esforços aplicados sobre uma área.

Materiais hiperelásticos

Materiais hiperelásticos apresentam deformação não-linearmente relacionada ao esforço aplicado. Esses materiais retornam a dimensão original quando o esforço deixa de ser aplicado, entretanto podem apresentar tensões residuais assim como as outras categorias de materiais. As tensões residuais dizem respeito a esforços que permanecem em um objeto mesmo quando um esforço externo deixa de ser aplicado. Materiais hiperelásticos são Cauchy-elásticos, ou seja, a tensão é determinada pelo estado corrente da deformação (Jakel [2010]). De forma distinta a materiais elásticos, o relacionamento da curva tensão×deformação para materiais hiperelásticos é derivado da função de densidade de energia e não um valor constante (Jakel [2010]).

Muitos dos materiais que sofrem grandes deformações com pequenos esforços são pertencentes a categoria de materiais hiperelásticos. Exemplos de materiais hiperelásticos são: espumas, fibras de silicone, fibras de acrílico, diversos tecidos biológicos.

Modelos de materiais hiperelásticos

Os modelos de materiais hiperelásticos permitem a associação entre tensão e deformação de cada material por meio da modelagem da energia potencial de deformação. Esses modelos podem ser divididos em dois grupos principais. Modelos que representam materiais hiperelásticos compressíveis e modelos que representam materiais hiperelásticos incompressíveis (Shahzad et al. [2015]). A compressibilidade de um material diz respeito a mudança de volume de um material quando esse é submetido a compressão. Materiais incompressíveis conservam o volume ao longo de uma compressão enquanto que materiais compressíveis não conservam o volume. Um conceito importante é a respeito de materiais completamente compressíveis. Esses materiais não expandem em outras direções a medida que são comprimidos.

Exemplos de modelos de materiais incompressíveis são os modelos Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Yeoh e Ogden (Shahzad et al. [2015]). Para materiais compressíveis, os modelos de Blatz-Ko e Ogden-Foam podem ser utilizados. O mesmo comportamento do modelo de Blatz-Ko, apresentado no trabalho Blatz & Ko [1962], pode ser obtido selecionando um conjunto de parâmetros específicos no modelo de Ogden-Foam, conforme exemplificado na referência de materiais do *software* de elementos finitos ANSYS⁴.

No *software* de elementos finitos ANSYS, o índice de compressibilidade de um material pode ser variado, para o modelo de Ogden-Foam, alterando-se os valores de deformação lateral. Existem diferentes graus de polinômios para o modelo de Ogden-Foam, de primeira a nona ordem, permitindo um ajuste melhor a um conjunto de

⁴AnsyzMaterial: <http://148.204.81.206/Ansys/150/APDL%20Material%20Reference.pdf>

dados. Entretanto, a ferramenta de *Curve-Fitting* do *software* de elementos finitos ANSYS, para a versão de estudante, apresenta limitação de três, para o grau máximo do polinômio de Ogden-Foam. A utilização de polinômios de maior grau, algumas vezes, podem resultar em instabilidade numérica.

1.3 Motivação

Existem diversas técnicas para identificação de materiais como determinação de coeficientes de atenuação acústica, análise de imagens hiperespectrais, determinação de frequência natural, propriedades elétricas, técnicas baseadas em reflexão e refração, ensaios mecânicos destrutivos, análise de deslocamentos, dentre outras. Do ponto de vista humano, sem o auxílio de equipamentos, provavelmente, identificar materiais que sofram grandes deslocamentos locais com a aplicação de pequenos esforços por meio da análise de deslocamentos seja a abordagem mais intuitiva. Isso porque as propriedades ópticas apresentam grande variação devido ao grau de polimento e pintura de superfícies e as propriedades acústicas podem ser difíceis de serem diferenciadas pelo ouvido humano. Entretanto a identificação de materiais por meio da análise de deslocamentos não é uma tarefa trivial.

Os deslocamentos de pontos de um material variam, principalmente, conforme a força aplicada, a área que sofre o esforço, velocidade de avanço, temperatura, presença de tensões residuais, dureza, rigidez de um material, curvatura local de uma superfície e restrição de movimentos de um objeto. Para a identificação de materiais por *Análise Local de Deslocamentos*⁵, podem ser realizadas algumas considerações iniciais. A força aplicada e a área de aplicação de esforços podem apresentar valor constante. A velocidade de avanço é um fator que pode influenciar, dependendo das curvas de tensão×deformação de um dado material. Medindo-se, por exemplo, os deslocamentos locais em temperaturas próximas a temperatura ambiente, os efeitos da temperatura podem ser tratados como erros aleatórios. As tensões residuais podem ser tratadas como erros sistemáticos na maioria das vezes. Os valores de dureza de um dado material podem ser constantes dependendo da homogeneidade. Considerando-se um objeto totalmente ou quase-homogêneo, a rigidez pode ser considerada constante. Caso o objeto seja heterogêneo, entretanto constituído por um interior homogêneo e uma capa de outro material de maior rigidez, o efeito da variação de rigidez sobre a deformação local poderá ser tratado como um erro sistemático. As restrições de movimentos de um objeto podem influenciar ou não, dependendo da extensão da área deformada

⁵*Análise Local de Deslocamentos*: Consiste em verificar quais foram os deslocamentos de um conjunto de pontos em uma região específica, região deformada, após a aplicação de esforço.

e da compressibilidade do material. Por último, a curvatura local de uma superfície na região de aplicação de esforços e nas proximidades influencia na deformação local obtida. Os deslocamentos globais de pontos, além de depender de todos os fatores dos deslocamentos locais, também dependem da geometria global do objeto.

Em termos de análise de deslocamentos, a literatura apresenta duas estratégias principais. Uma é baseada na medição de durezas, a outra é baseada no Método de Elementos Finitos (MEF). De forma geral, para medir a dureza de um material, aplica-se uma força constante em uma área pequena por meio de um endentador. Esse dispositivo apresenta uma geometria conhecida e é constituído por um material de grande dureza (no caso da dureza Rockwell, utiliza-se o diamante sintético). Existem diversos métodos como Rockwell, Brinell, Meyer, Vickers, Knoop e Shore. Como exemplos, geralmente, a dureza Rockwell é utilizada para medição de dureza de metais e a dureza Shore é utilizada para polímeros, cerâmicas e borrachas. Por meio das medições das dimensões de uma região deformada, cada método calcula por equações distintas um valor de dureza, identificando o material. Entretanto esses métodos requerem normalmente ensaios muito controlados, em laboratório, e uso de equipamentos com grande precisão.

A Lei de Hooke é definida pela equação $K = F/X$ na qual a rigidez K de um material é calculada diretamente pela razão entre a força aplicada F e o deslocamento X . O exemplo mais simples para o uso do MEF consiste na utilização da equação análoga a Lei de Hooke para materiais elásticos $E = \sigma/\varepsilon$ (E : módulo de elasticidade; σ : tensão aplicada; ε : deformação de engenharia) desde que o objeto seja homogêneo e apresente somente deformação elástica, área superficial igual ou menor do que a área do efetador, as duas áreas sejam paralelas nos instantes de aplicação de força e a geometria global do objeto seja conhecida.

Uma equação semelhante é aplicada no cálculo de deslocamentos de pontos em materiais de geometria complexa e com diferentes comportamentos em termos de elasticidade (e.g., materiais elásticos, viscoelásticos, dentre outros). Entretanto, o procedimento difere. Primeiramente, cria-se um modelo que represente um objeto real em um ambiente simulado. Divide-se o modelo em pequenas partes (elementos) e só uma fração da força total é aplicada sobre cada elemento selecionado. Cada elemento é composto por um conjunto de pontos (nós). Cada nó apresenta coordenadas específicas e é conectado a outros nós por meio de ligações que são representadas por molas. Aplicam-se outras condições de contorno além da força (e.g., deslocamento e velocidade), sobre alguns nós do objeto. Em seguida, um sistema de equações do tipo ($\{K\} = \{F\}/\{X\}$) é resolvido. Esse é o MEF. Ele permite o cálculo dos deslocamentos de cada nó por meio de um conjunto de esforços de entrada e rigidez do material.

No estado da arte, alguns autores utilizam o Método de Elementos Finitos Inverso (MEFI) para identificar materiais. Isso significa que eles encontram a matriz de rigidez tendo apenas como parâmetros de entrada as forças iniciais e os deslocamentos de alguns nós. De modo geral, para encontrar a matriz de rigidez, deve-se solucionar um sistema de equações diversas vezes até que, para o material selecionado, o objeto deformado na simulação seja semelhante ao objeto deformado na realidade. Esse método requer a criação de um modelo que represente o objeto no computador, a criação de malhas ao redor do modelo e o cálculo do grau de semelhança entre duas superfícies deformadas (simulada e real). Como consequência, esse método é muito lento, não permitindo a identificação de materiais em tempo real como na exploração de ambientes e objetos por robôs móveis.

1.4 Definição do Problema

A questão fundamental que motiva o trabalho é “É possível identificar qual o tipo de material que constitui um objeto conhecendo-se apenas a curvatura local inicial e os deslocamentos de pontos após a aplicação de um esforço de módulo desconhecido?”. Com o objetivo de responder a esse questionamento, são realizados um conjunto de simulações e experimentos reais.

Para resolver o problema da identificação de materiais em tempo real por meio da análise de deslocamentos, o presente trabalho propõe uma hipótese. Essa hipótese serve de base para os dois novos métodos de identificação de materiais. A seguir, a hipótese do trabalho e os dois novos métodos são apresentados.

Hipótese do trabalho

A hipótese deste trabalho constitui ao trecho em itálico da afirmação

A deformação local de um objeto homogêneo é dependente de propriedades intrínsecas do material (dureza, rigidez de um material, presença de tensões residuais, propriedades térmicas), de propriedades extrínsecas (esforço aplicado, área do efetuator) e de propriedades do objeto analisado (curvatura local de uma superfície e restrição de movimentos de um objeto). Entretanto é independente em relação a espessura do objeto (a partir de certos limites) e da geometria global de objetos (a partir de determinados valores de raio do cilindro o qual representa uma região maciça de um objeto).

As propriedades intrínsecas de um material dizem respeito a propriedades físicas inerentes a cada material, as propriedades extrínsecas podem ser arbitratadas. Já as propriedades do objeto analisado variam para os diferentes objetos. Entretanto, devido a independência em relação a espessura e a geometria global do objeto, a partir de certos limites, a deformação local permanece constante para cada curvatura local de superfície e para cada conjunto de propriedades intrínsecas e extrínsecas. Podendo-se identificar o material por essa característica. O termo *conceito fundamental do trabalho* será utilizado para se referir a *hipótese do trabalho comprovada* por meio de experimentos.

Novos Métodos para Identificação de Materiais

Este trabalho apresenta dois novos métodos para identificação de materiais: *Método de Análise Local de Deslocamentos por Curvas de Nível (MALD-CN)* e *Método de Análise Local de Deslocamentos de Pontos Característicos (MALD-PC)*. Em ambos os métodos, o conceito fundamental do trabalho é a ideia principal. Ambos utilizam a análise local de deslocamentos de pontos, de forma semelhante aos métodos de medição de dureza, e tabelas de referência de deslocamentos locais para a identificação de materiais. Essas tabelas são obtidas de forma experimental ou por meio do MEF.

A identificação de materiais por ambos os métodos (MALD-CN e MALD-PC) permite rotular corretamente, para materiais que sofrem grandes deformações com pequenos esforços, a categoria e/ou (sub)subcategoria do material além de determinar as curvas tensão×deformação associadas ao material, permitindo a determinação de propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, limite de resistência a compressão, tensão de platô, dentre outras.

1.5 Contribuições

Por meio dos métodos de análise local de deslocamentos, as contribuições listadas abaixo foram obtidas para identificação de materiais que constituem objetos homogêneos ou heterogêneos de duas camadas (capa + material homogêneo).

- Um novo método para identificação de materiais baseado em análise de curvas de nível denominado *Método de Análise Local de Deslocamentos por Curvas de Nível (MALD-CN)*.

- Um novo método para identificação de materiais baseado em deslocamentos de pontos característicos denominado *Método de Análise Local de Deslocamentos de Pontos Característicos (MALD-PC)*.

1.6 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é estruturada em seis capítulos e apêndices. O primeiro capítulo apresenta a importância da identificação de materiais, alguns problemas associados a métodos de medição de dureza e ao MEFI, o problema a ser resolvido (identificação de materiais por análise local de deslocamentos), a hipótese do trabalho que serve de base para os métodos de identificação de materiais propostos MALD-CN e MALD-PC. O segundo capítulo contém trabalhos relacionados ou que apresentam como tema a identificação de materiais. O terceiro capítulo apresenta as metodologias referentes aos ensaios laboratoriais, a comprovação da hipótese do trabalho e aos métodos MALD-CN e MALD-PC. O quarto capítulo apresenta os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e simulação. O capítulo cinco apresenta os experimentos reais, testes em ambiente controlado e por meio de robô para a identificação de materiais. O último capítulo apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Os Apêndices A, B, C, D e E apresentam uma revisão de conceitos fundamentais de Resistência dos Materiais, medição de dureza, ensaio de compressão uniaxial, MEF e Kinect 1.0, respectivamente. Os Apêndices F e G apresentam, respectivamente, explicações a respeito do detector STAR e do descritor BRAND os quais foram utilizados para determinar pontos característicos correspondentes antes e após a deformação local de um objeto, permitindo o alinhamento de nuvens de pontos. O Apêndice H apresenta os projetos preliminares, a máquina de ensaios em ambiente controlado e o atuador linear construídos.

Capítulo 2

Identificação de Materiais

Os materiais podem ser identificados por meio da realização de um conjunto de ensaios mecânicos, verificando-se as tensões de escoamento, limite de resistência dos materiais, curvas referentes a deformação em função da tensão. Os ensaios mecânicos podem ser, por exemplo, ensaios de tração, flexão, torção, flambagem, cisalhamento, dentre outros.

Outra forma de identificação de materiais consiste na análise do espectro eletromagnético emitido/refletido por um material, assim como funções que relacionam a irradiância com a radiância de um dado material (por exemplo, BRDFs). Materiais podem ser identificados por meio da aplicação de radiação, de forma a verificar a atenuação de sinais. As regiões de absorção podem distinguir os tipos de tecidos de forma análoga a aplicação de raio-X sobre o ser humano, no qual regiões de tecido mole absorvem menor quantidade de radiação. Entretanto, técnicas que utilizam radiação para identificação de materiais podem ser problemáticas; já que, a emissão de radiação por um robô em um ambiente pode afetar seres vivos e, aparentemente, o acúmulo dos efeitos provocados pela radiação no organismo pode levar a doenças futuras.

Por outro lado, imagens hiperespectrais, as quais não inserem nenhum tipo de radiação no ambiente, são boas alternativas no que diz respeito a identificação de materiais. Câmeras hiperespectrais permitem a formação do cubo de imagem. Esse cubo consiste em um conjunto de imagens em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Essa diferença de faixas permite que uma análise em diferentes frequências seja feita, melhorando o índice de acertos na identificação de materiais.

Em termos de análise de deslocamentos, o Método de Elementos Finitos Inverso (MEFI) e os métodos de medição de dureza são utilizados. Ambas as estratégias baseiam-se no deslocamento de pontos para identificar o material, entretanto na técnica de análise inversa de elementos finitos, a análise é feita levando-se em consideração toda a geometria de um objeto enquanto que os métodos de medição de dureza fazem uma

análise de deslocamentos local.

Outra técnica utilizada para identificar materiais baseia-se na utilização do espectro sonoro, como por exemplo a técnica de ultrassom, no qual a atenuação do sinal e a intensidade do sinal retornado são avaliados. Isso permite a identificação de um material baseada na propriedade de atenuação sonora. Técnicas que identificam materiais por meio da frequência de ressonância também são utilizadas. Em geral, em técnicas de análise de vibração, realiza-se um impacto sobre objetos e, em seguida, analisa-se a vibração ao longo do tempo. Como a vibração de um objeto é descrita por uma função matemática contínua, esse sinal pode ser decomposto em um somatório de sinais de diferentes frequências e amplitudes. Decompondo-se o sinal, pode-se verificar qual a frequência que o material está vibrando com maior intensidade. Como o material vibra com maior prevalência nos modos de vibração que são múltiplos da frequência de ressonância, obtêm-se a frequência de ressonância do material. Outra forma de obtenção da frequência de ressonância de um material pode ser feita por meio da análise de imagens adquiridas por câmeras de alta-frequência ao invés de realizar a medição direta da oscilação de um objeto.

Métodos para Identificação de Materiais

Propriedades Ópticas

A identificação de materiais realizada por humanos por meio de imagens é feita de forma aproximada, uma vez que o ser humano não é capaz de inferir propriedades dos materiais com precisão. Além disso, os materiais apresentam diferentes propriedades ópticas e as imagens adquiridas apresentam ruído. Entretanto, o ser humano apresenta bons índices de acerto, conforme comprovado por meio de pesquisas como Sharan et al. [2008]. Essa pesquisa mostrou que as pessoas conseguem diferenciar as imagens que apresentam materiais falsos e as imagens correspondentes a fotografias reais até sequências de quadros de 40 ms. Em Fleming [2014], mostrou-se que as pessoas são capazes de inferir diversas propriedades dos materiais por meio de imagens, principalmente em relação a rugosidade. Entretanto, em muitos casos, houve dificuldade para inferir propriedades dos materiais como densidade, temperatura, condutividade térmica, parâmetros que não estão associados diretamente com a imagem formada no espectro visível.

Alguns trabalhos tentam estimar as propriedades físicas de um dado material. Por exemplo, a disparidade de *highlights* sobre superfícies de reflexão especular difere da disparidade dos pontos de superfície. Devido a esse fato, Kirschmann [1895] propôs

que a disparidade de *highlights* pode ser usada como um palpite binocular para percepção de brilho. Em Blake & Bülhoff [1990] é mostrada que a aparência tridimensional de um *highlight* é influenciada pela percepção de curvatura da superfície. Esse trabalho concluiu também que o cérebro humano aparenta utilizar um modelo físico da interação da luz com superfícies curvas de forma a identificar imagens com caráter mais realístico. Conforme destacado por Fleming [2014], a percepção de um material com base na refletância de uma superfície assim como as propriedades de *highlights* são influenciadas pela disparidade binocular em relação a uma cena (Beck & Prazdny [1981]; Kim et al. [2011]; Marlow et al. [2012]).

Em Ho et al. [2006] é mostrado que a iluminação influencia grandemente na percepção de rugosidade de uma dada superfície, mostrando como o visual é enganado devido a iluminações distintas. Por outro lado, Baumgartner et al. [2013] realizaram um conjunto de experimentos com dois grupos de pessoas. Nesses experimentos, solicitou-se que as pessoas inferissem as propriedades do material baseadas no tato (um grupo inicialmente) e no visual (outro grupo inicialmente). Mostrou-se que o uso somente da sensação de tato para identificação de um material pode não ser suficiente para identificar o material.

Imagens em Infravermelho

O estudo Van Den Broek et al. [1998] propõe uma metodologia para identificação de materiais plásticos por meio de espectroscopia de imagens de infravermelho próximo. Essa abordagem utilizou uma estratégia baseada na classificação de imagens seguida por treinamento e teste. Apesar de identificar plásticos com grande precisão (100%), essa abordagem teve problemas com identificação de materiais não-plásticos, aproximadamente 83% de acerto, e com materiais de *background*. O autor desse artigo destaca os problemas na diferenciação entre materiais não-plásticos e *background*.

A respeito da análise de sinais, em Hepburn & Kemp [1998] é proposto a aplicação da transformada de Fourier em um sinal de infravermelho associado a técnicas de análise térmica para identificação de materiais. Segundo A. Lee Smith, citado nesse artigo, o espectro de absorção de infravermelho de um componente provavelmente é a propriedade mais única de um dado material.

Imagens Hiperespectrais

Outros estudos propõem a utilização de imagens hiperespectrais para identificação de materiais. Em Slater & Healey [1999] são enumerados alguns dos problemas de se utili-

zar imagens hiperespectrais como a influência das condições atmosféricas e da geometria da cena sobre o espectro de radiância obtido. Esse trabalho propõe a classificação de materiais por meio de imagens hiperespectrais, utilizando primeiramente um algoritmo de rotulagem para calcular a probabilidade de cada material em cada região da imagem. Observou-se que a modelagem da variação espectral do material de cobertura não pode ser feita com precisão por um dimensionamento espectral variante a iluminação. Utilizando-se o método invariante a iluminação desenvolvido nesse trabalho, uma rotulagem correta é feita das regiões de telhado. Concluiu-se que um classificador de materiais invariante a iluminação é necessário para a correta interpretação de amostras de material tridimensional em imagens hiperespectrais.

Na pesquisa realizada por Gorman et al. [1995], criou-se um algoritmo de identificação de materiais por meio de dados obtidos por um sensor hiperespectral de banda 211. É apontado alguns problemas na classificação dos dados. Esses problemas correspondem ao *endmember selection* e *abundance selection*. O primeiro problema diz respeito a determinação dos diferentes materiais constituintes de um pixel e o segundo problema consiste na estimativa da quantidade correspondente a cada material em um dado pixel. Esses problemas ocorrem porque diferentes materiais do ambiente projetam sobre o mesmo pixel. Como resultado, foi implementada uma abordagem min-max para a discriminação do material (Gorman et al. [1995]).

No artigo de Healey & Slater [1999] é apresentado um algoritmo para identificação automatizada de materiais por meio de imagens hiperespectrais, que é invariante a iluminação, geometria da cena e condições atmosféricas. O desempenho do algoritmo invariante a iluminação para materiais sombreados e ocultos é similar ao desempenho para materiais iluminados pela luz do sol. Por outro lado, o algoritmo apresenta dificuldades para identificar materiais devido a sombras e árvores.

Determinação de Rigidez e Densidade por Vídeos

Em Bouman et al. [2013] é proposto analisar vídeos de tecidos sobre ação do vento. Esse estudo tem o objetivo de identificar, por meio de um modelo de regressão discriminativamente treinado, as propriedades de rigidez e densidade. Obteve-se 80% de taxa de acerto da rigidez do material e densidade por meio do método proposto. Esse índice de acerto é comparável a capacidade do olho humano, conforme estudos de psicofísica realizados no trabalho. Além disso, verificou-se que o ser humano apresenta maior facilidade em identificar materiais por meio da análise de vídeos ao invés da análise de fotos.

No trabalho Davis et al. [2015], determina-se a frequência de ressonância de um

material por meio da análise de imagens obtidas por uma câmera de alta frequência. Para materiais que são facilmente deformáveis, utilizou-se a própria corrente do ar para deformar o material, para os outros materiais, utilizou-se indução sonora. Esse trabalho realizou a medição de rigidez com aproximadamente 17% de erro e a área ponderada com 13.8%, mostrando ser possível a identificação de materiais por essa estratégia.

Propriedades Acústicas

Em Gunarathne & Christidis [2002], determinam-se as propriedades acústicas do material por meio da interpretação de sinais de ultrassom corrigidos. A correção é aplicada por causa da distorção do sinal provocado por superfícies não-planas. Segundo esse artigo, a impedância acústica de um dado material é uma propriedade que caracteriza o material. A etapa final do método proposto consiste no cálculo da probabilidade de um dado material ser pertencente a uma categoria.

Propriedades Elétricas

Em outros trabalhos, tenta-se realizar a identificação de materiais por meio de propriedades elétricas. Em Kimoto et al. [2007] é proposto a identificação de materiais sem a necessidade de contato, apenas por meio do efeito capacitivo. Em Kimoto et al. [2010], por meio de sensores e tensões induzidas pelo efeito eletrostático, medem-se propriedades elétricas do material como capacitância, identificando-se o material.

Análise de Deslocamentos

Medição de Dureza

Em Gubicza et al. [1996], relaciona-se a medição de dureza Vickers ao módulo de elasticidade do material, permitindo a sua identificação.

Ensaio de Compressão Uniaxial de Espumas de Poliuretano

Em Dupuis & Aubry [2008], considerando-se corpos de prova de diferentes espessuras cujo material é espuma de densidade 28 kg/m^3 , demonstrou-se que para mesmas velocidades de deslocamento (mm/s), as curvas tensão×deformação obtidas seriam diferentes para cada corpo de prova de espessura distinta. Além disso, mostrou-se que a região de platô da curva obtida para uma espuma, região quase paralela ao eixo de deformação de engenharia, é diretamente proporcional a espessura dos corpos de prova. Como consequência, para traçar as curvas tensão×deformação para espumas de

poliuretano, deve-se utilizar taxas de deformação constantes, cuja unidade é (1.0/s), para os diferentes corpos de prova, ao invés de uma velocidade de deslocamento constante. A taxa de deformação multiplicada pela espessura de um objeto resulta na velocidade de deslocamento. Para finalizar o trabalho, compararam-se os modelos de materiais incompressíveis ou aproximadamente incompressíveis¹: Neo-Hookean, Yeoh, Arruda-Boyce, Mooney-Rivlin, Van der Waals, Ogden 1 e Ogden 2, determinando que o modelo de Ogden de segunda ordem apresentou o melhor ajuste para os dados experimentais.

No trabalho de Alzoubi et al. [2011] determinaram-se as curvas tensão×deformação, a diferentes taxas de deformação, para espumas de poliuretano com densidades igual ou superior a $78 \text{ kg}/\text{m}^3$. Mostrou-se que quanto maior a taxa de deformação aplicada sobre um corpo de prova, mais a curva tensão×deformação associada a essa taxa de deformação será dominante em relação às outras curvas. Constatou-se que quanto maior a densidade de uma espuma, para uma mesma taxa de deformação, maior será a dominância dessa curva tensão×deformação. Além disso, demonstrou-se que as espumas estudadas apresentaram curvas tensão×deformação diferentes, no ciclo de carga e no ciclo de descarga, isso porque parte da energia de deformação aplicada no ciclo de carga era liberada em forma de calor, esse efeito é denominado histerese.

Método de Elementos Finitos Inverso

Os trabalhos de Fazzini et al. [2011], Syllebranque & Boivin [2008] e Rojicek [2010] são exemplos da aplicação do MEFI. Em todos eles, altera-se o material de entrada e suas respectivas propriedades de forma sucessiva (e.g., curva tensão×deformação do material referente a compressão) até que o objeto deformado apresente uma grande similaridade com um modelo de referência. Determina-se então o tipo de material que constitui um objeto.

Quadro Comparativo

A Tabela 2.1 apresenta uma síntese dos diferentes métodos para a identificação de materiais, métodos que analisam imagens em infravermelho, imagens hiperespectrais, determinam a rigidez e densidade do material, propriedades acústicas, elétricas, ou métodos baseados na análise de deslocamentos. Os métodos baseados na análise de deslocamentos consistem nos métodos de medição de dureza, Método de Elementos

¹Materiais Hiperelásticos: http://ansys.net/ansys/papers/nonlinear/conflong_hyperel.pdf

Finitos Inverso e os Métodos de Análise Local de Deslocamentos propostos por este trabalho (MALD-CN e MALD-PC). Além disso, essa tabela apresenta um trabalho que exemplifica cada método de identificação de material citado, a metodologia abordada pelo trabalho, as vantagens e desvantagens do método, além de apresentar as observações que tornam viáveis ou inviáveis a aplicação dos métodos de identificação de materiais a sistemas de tempo real (e.g., Robótica) para a determinação de propriedades mecânicas.

Tabela 2.1: Quadro comparativo dos métodos de identificação de materiais.

Métodos para identificação de materiais	Trabalho	Metodologia	Vantagens	Problemas do método	Observações	Aplicação em sistemas de tempo real crítico ou suave (e.g., Robótica)
Imagens em Infravermelho	Van Den Broek et al. [1998]	Classificação de Imagens + Treinamento + Teste ----- Identificação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Identificou plásticos com grande precisão (100%). 	<ul style="list-style-type: none"> Identificação de materiais não-plásticos apresentou aproximadamente 83% de acerto. 	<ul style="list-style-type: none"> Inviável caso seja necessário conhecer propriedades mecânicas do material. Não há uma correlação direta entre a propriedade de absorção do infravermelho e propriedades mecânicas. 	Inviável
Imagens Hiperespectrais	Slater & Healey [1999]	Classificação de materiais por meio de imagens hiperespectrais + Algoritmo de Rotulagem + Método Invariante a iluminação ----- Rotulagem correta de telhados	<ul style="list-style-type: none"> Identifica o material considerando imagens adquiridas em múltiplas faixas do espectro eletromagnético 	<ul style="list-style-type: none"> <i>abundance selection</i>: determinação dos diferentes materiais que se projetam sobre um mesmo pixel. <i>endmember selection</i>: Estimar a quantidade correspondente a cada material projetado sobre um pixel. 	<ul style="list-style-type: none"> Não identifica propriedades mecânicas do material. Requer grande tempo de processamento. 	Inviável
Determinação de Rigidez e Densidade	Davis et al. [2015]	Câmera de alta frequência + Aplicação de esforços + Análise de imagens ----- Identificação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Permite identificar a rigidez e densidade do material de forma aproximada. 	<ul style="list-style-type: none"> Medição de rigidez com aproximadamente 17% de erro. 	<ul style="list-style-type: none"> Requer grande tempo de processamento para o conjunto de imagens adquirido pela câmera de alta frequência. 	Inviável
Propriedades Acústicas	Gunarathne & Christidis [2002]	Sinais de ultrassom + Correção do sinal + Cálculo de probabilidades para determinar a categoria do material ----- Identificação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Sensores podem ser obtidos a baixo custo. 	<ul style="list-style-type: none"> Corrigir o sinal de ultrassom pode ser uma tarefa difícil. 	<ul style="list-style-type: none"> Propriedades acústicas podem ser relacionadas a propriedades mecânicas. 	Viável

Tabela 2.1: Continuação - Quadro comparativo dos métodos de identificação de materiais.

Métodos para identificação de materiais	Trabalho	Metodologia	Vantagens	Problemas do método	Observações	Aplicação em sistemas de tempo real crítico ou suave (e.g., Robótica)
Propriedades Elétricas	Kimoto et al. [2007]	Efeito Capacitivo ----- Identificação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Identifica materiais sem contato. 	<ul style="list-style-type: none"> Depende da sensibilidade do material ao efeito capacitivo. 	<ul style="list-style-type: none"> Materiais com pouca sensibilidade ao efeito capacitivo não serão identificados corretamente. 	Viável
Medição de Dureza	Gubicza, J. et al. [1996]	Teste de dureza Vickers + Correlação entre indentação e módulo de elasticidade ----- Identificação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Permite a identificação de propriedades mecânicas do material. 	<ul style="list-style-type: none"> Requer ensaios em ambientes controlados. 	<ul style="list-style-type: none"> De forma geral, não podem ser executados fora de laboratório. 	Inviável
Método de Elementos Finitos Inverso	Syllebranque & Boivin [2008]	Vídeo de um objeto sendo deformado + Simulação no MEF para mesma geometria + Iteração ----- Identificação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Estima o coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Geometria do objeto a ser deformado tem de ser completamente conhecida para a realização da simulação. Grande tempo de processamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Requerem conhecimento da geometria do objeto e grande tempo de processamento, não podendo ser aplicados em sistemas de tempo real. 	Inviável
MALD-CN e MALD-PC	Propostos por este trabalho.	Aplicação de esforços + Medição de deslocamentos reais + <i>Lookup Table</i> ----- Identificação de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Não requerem ambientes controlados. Não requerem conhecer a geometria global do objeto. Podem ser executados em tempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> Requerem objetos com textura e capa de baixa resistência que não absorva o sinal infravermelho. (Exceção: A implementação do MALD-CN sem alinhamento de nuvens de pontos) Somente podem ser aplicados a objetos homogêneos, quase-homogêneos (homogêneo + cobertura de baixa resistência mecânica) ou heterogêneos de duas camadas. Somente podem ser aplicados a objetos que respeitem as dimensões mínimas de espessura e raio maciço na região de aplicação do esforço. 	<ul style="list-style-type: none"> Supera os problemas enfrentados pelos métodos de medição de dureza e Método de Elementos Finitos Inverso. 	Viável

Capítulo 3

Metodologia

A sequência de atividades realizada neste trabalho é apresentada na Figura 3.1. A primeira etapa do trabalho consiste na obtenção de materiais que apresentam grandes deformações, deformações perceptíveis visualmente, por meio da aplicação de pequenos esforços (até 4 kgf para os testes realizados) em uma área circular de raio 16 mm. Em seguida, objetos com os materiais adquiridos são construídos e englobados com diferentes capas. Posteriormente, o projeto preliminar e a construção de uma máquina para ensaios em ambiente controlados são realizados (Apêndice H). Essa máquina permite a aplicação de esforços constantes sem a necessidade de realizar alguma operação de controle. Além disso, ela permite as medições de deslocamento por meio de instrumentos de medição com precisão milimétrica como réguas ou por meio do processamento de imagens adquiridas por câmeras.

A realização dos ensaios de compressão uniaxial permite que curvas tensão×deformação de diferentes materiais sejam obtidas. Como consequência, é possível simular a deformação por compressão resultante da aplicação de esforços sobre objetos para cada um desses materiais em *softwares* de elementos finitos, obtendo-se um conjunto de tabelas com os deslocamentos dos pontos da superfície. Em seguida, valida-se a hipótese desse trabalho e estabelece-se o conceito fundamental do trabalho, por meio de simulações e de experimentos reais. Na etapa seguinte, executa-se o alinhamento de nuvens de pontos, são propostos e validados dois novos métodos para identificação de materiais denominados *Método de Análise Local de Deslocamentos por Curvas de Nível (MALD-CN)* e *Método de Análise Local de Deslocamentos de Pontos Característicos (MALD-PC)*.

As seções deste capítulo apresentam as metodologias adotadas para ensaios laboratoriais, os quais englobam os experimentos referentes aos ensaios de compressão uniaxial e a simulação, para a validação da hipótese do trabalho tanto em ambiente

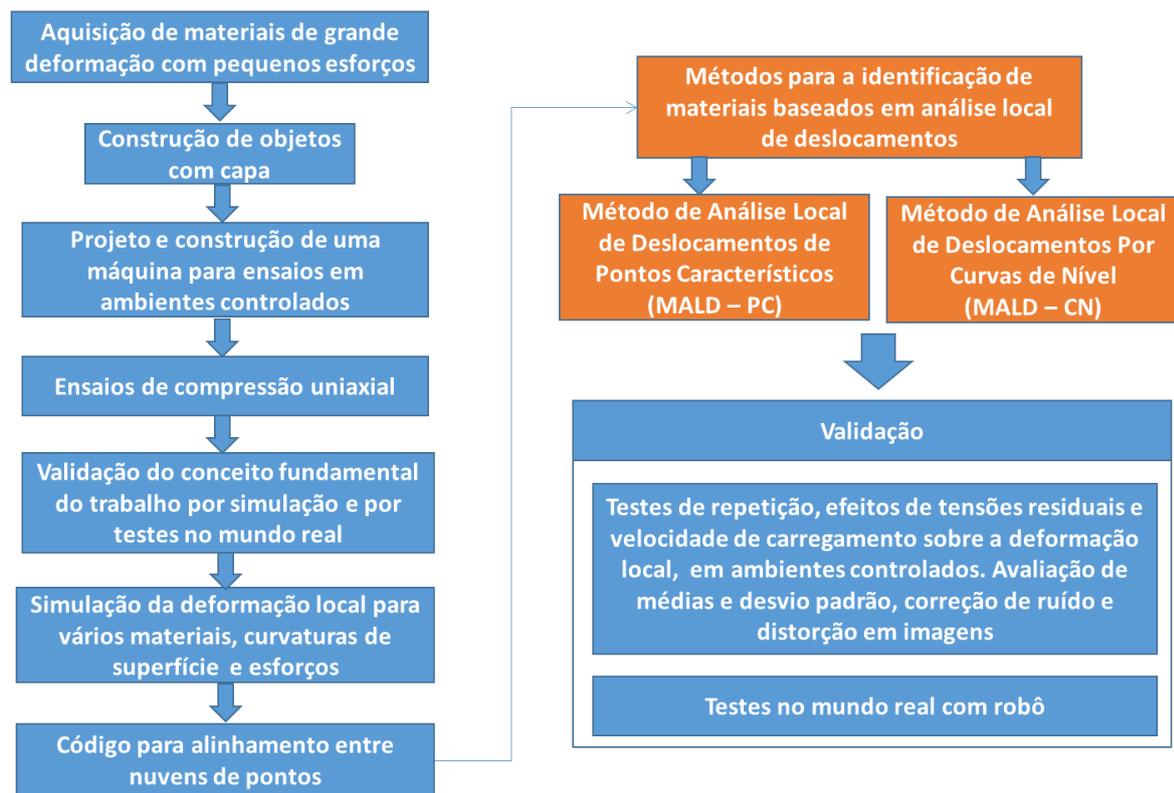


Figura 3.1: Metodologia geral - Sequência de atividades.

real quanto por simulação, para experimentos reais e, principalmente, para os métodos MALD-CN e MALD-PC.

3.1 Ensaaios Laboratoriais

A simulação da aplicação de esforços sobre objetos, em *softwares* de elementos finitos, apresenta como principal vantagem a obtenção de deformações e deslocamentos de pontos sem a necessidade de objetos reais. Isso ocorre porque esse tipo de *software* busca reproduzir deformações, em simulação, de forma fiel ou muito próxima a realidade. Como consequência, simular a aplicação de esforços sobre materiais, por meio de *softwares* de elementos finitos, permite a redução de custos com a realização de experimentos reais além da obtenção de deslocamentos para diferentes geometrias globais de objetos.

A presente seção apresenta a sequência de passos adotada para a simulação da deformação por compressão, de forma mais próxima a realidade, por meio do *software* de elementos finitos ANSYS. Essa simulação foi utilizada para a validação da hipótese do trabalho.

3.1.1 Simulações por Elementos Finitos

Para simular a deformação de um material em um *software* de elementos finitos, deve-se realizar a sequência de passos apresentada na Figura 3.2. Primeiramente, cria-se um modelo que representa o objeto. Em seguida, seleciona-se o(s) tipo(s) de elemento(s) que irá(ão) constituir o objeto. A terceira etapa consiste na seleção do modelo que representa o comportamento do material. O modelo do material está diretamente associado a acurácia da simulação assim como o grau de refinamento de uma malha. A quarta etapa consiste em criar uma malha sobre o objeto a qual é constituída por um ou mais elementos. Aplicam-se as condições de contorno (esforços e restrições) sobre os nós constituintes dos diversos elementos de uma malha. A próxima etapa consiste em especificar o tipo de análise, se será estática, transiente, para grandes deformações ou pequenas. Após a simulação, obtêm-se a superfície deformada final e uma lista com as posições antes e após a deformação para os nós constituintes do modelo do objeto. Utilizou-se o *software ANSYS MECHANICAL APDL* para a simulação por meio do Método de Elementos Finitos. Uma explicação sobre esse método é apresentada no Apêndice D.

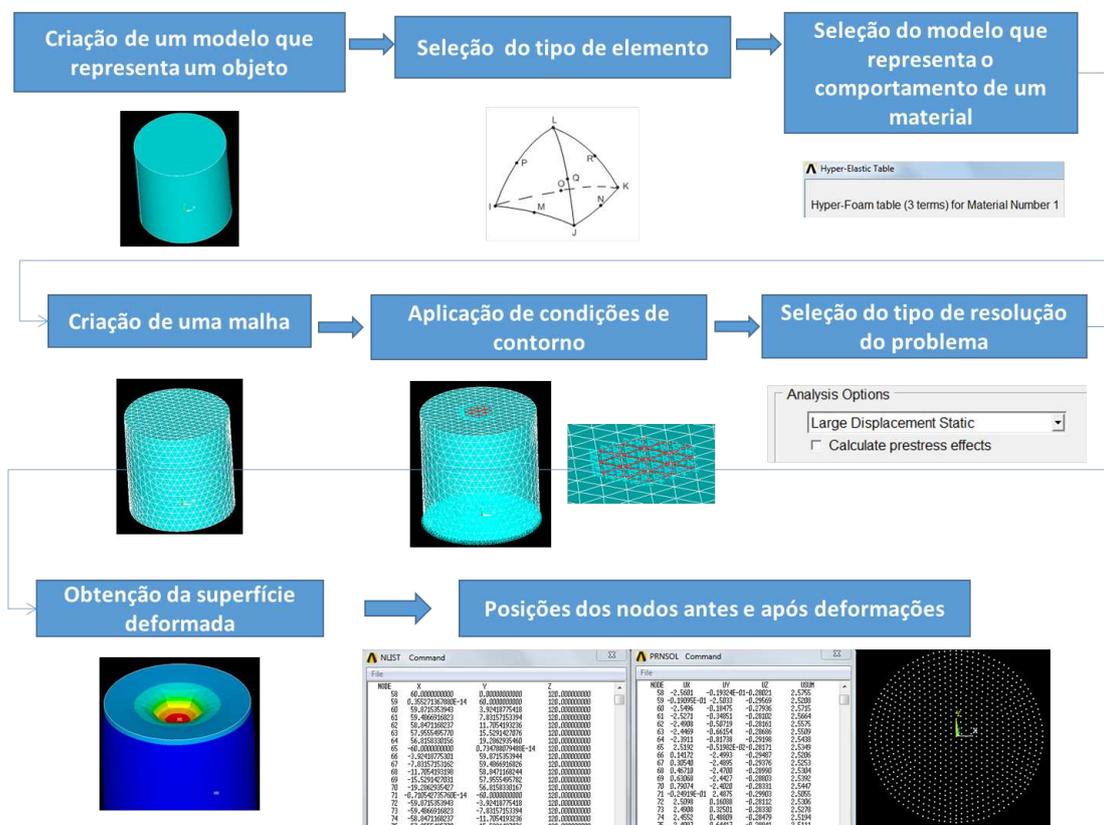


Figura 3.2: Fluxograma do Método de Elementos Finitos.

Modelos de Objetos

Para a simulação da deformação local de diferentes objetos representou-se a região local do objeto pela combinação de um cilindro de raio e espessura específicos com diferentes calotas de esferas. Essas calotas são definidas pela interseção da parte superior do cilindro com esferas de raios distintos. A Figura 3.3 apresenta um dos modelos gerados por meio da combinação entre cilindro e calota esférica.

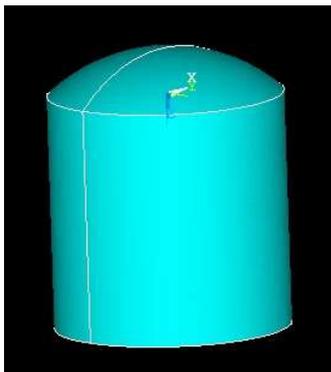


Figura 3.3: Exemplo de modelo para representação de uma parte de um objeto.

Curvaturas de Superfície

Para representar diferentes curvaturas locais de superfície, combinou-se um cilindro com diferentes calotas esféricas. Cada calota é produzida por meio da interseção de uma das faces do cilindro de diâmetro D com um círculo perpendicular de raio R . A Figura 3.4 (a) apresenta duas retas paralelas na vertical que delimitam uma distância equivalente ao diâmetro D 120 mm de um cilindro. Por meio da observação dessa figura, pode-se verificar que diferentes curvaturas podem ser obtidas variando-se o raio do círculo que tem interseção com o diâmetro do cilindro. Quanto menor o raio do círculo, maior é a curvatura que será de no máximo 180 graus. Um círculo de raio infinito produz uma curvatura de 0 grau.

A Figura 3.4 (b) apresenta as indicações do raio do cilindro ($D/2$), o raio R do círculo que contém o arco de interseção, as variáveis a e k . O arco de menor comprimento do círculo de raio R , delimitado pelo diâmetro do cilindro D , quando rotacionado em 180 graus sobre o seguimento de comprimento k gera uma calota.

No *software SolidWorks* há uma função para traçar o arco que passa por três pontos, dois dos pontos que delimitam o arco correspondem a $(-D/2, 0, Z)$ e $(D/2, 0, Z)$, o outro ponto é definido por $(0, 0, Z + k)$. Ou seja, arbitrando-se Z e escolhendo-se valores específicos para k , pode-se obter superfícies com curvaturas distintas. As

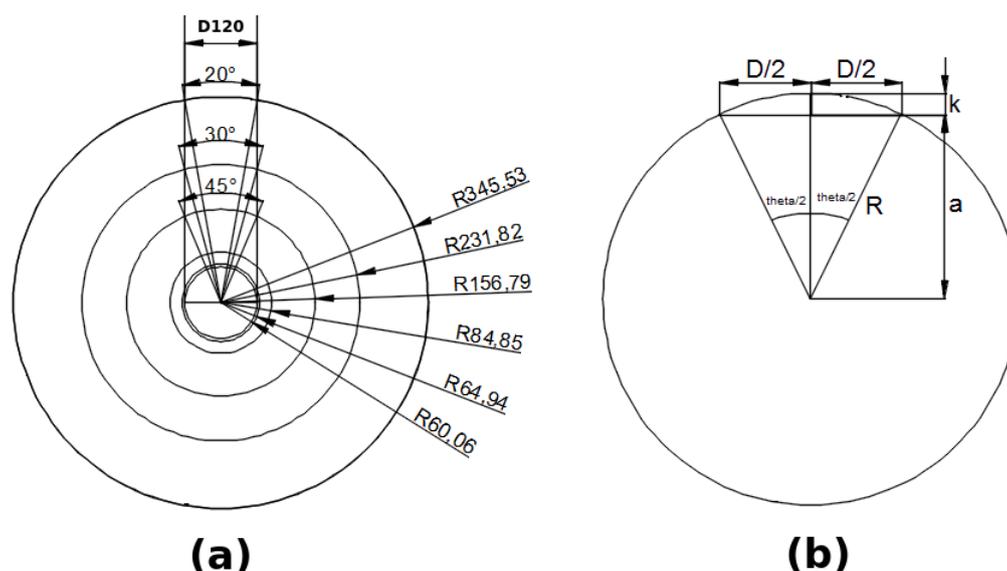


Figura 3.4: Curvaturas de superfície - (a) Diferentes curvaturas. (b) Indicação de variáveis para cálculo de curvatura.

equações que foram utilizadas para construção de uma superfície com curvatura de θ graus são: $R = D/(2 * \text{sen}(\theta/2))$ a qual permite encontrar o raio do círculo necessário para produzir a curvatura desejada e $k = R * (1 - \text{cos}(\theta/2))$ para determinação do terceiro ponto que o arco deve passar.

3.1.2 Ensaios de Compressão Uniaxial

Ensaio Manual

O procedimento geral para a realização do ensaio manual consistiu em posicionar uma régua na direção vertical ao lado de um corpo de prova de uma espuma em formato prismático. Aplicou-se um carregamento uniformemente distribuído sobre uma das faces do corpo de prova. Em seguida, mediu-se a mudança de espessura.

Ensaio Automático

Os ensaios de compressão uniaxial (Apêndice C) foram realizados no *Laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN)* - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil. Para simular a deformação local de um material que sofre grandes deformações com pequenos esforços, optou-se por utilizar materiais do tipo espuma.

O primeiro teste correspondeu a realização de ensaios para verificação da influência da taxa de deformação sobre a curva tensão×deformação. Para esses ensaios,

três amostras (corpos de prova) de dimensões 90 x 100 (mm) de seção transversal foram retiradas das espumas rosa (D16), cinza (D20), verde (D24.4) e laranja (D25.6). As densidades são simbolizadas pela letra D acompanhada do valor da densidade em (kg m^{-3}). A altura das espumas, nesse ensaio, corresponde a espessura inicial de cada uma das espumas 102, 102, 50 e 20 (mm), respectivamente. Para cada um dos corpos de prova, foram realizados testes em taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.

O segundo teste consistiu em verificar se amostras de diferentes espessuras apresentam a mesma região de platô, para uma mesma taxa de deformação, como no trabalho de Dupuis & Aubry [2008]. Para isso, cinco amostras de espumas cinza foram retiradas. Elas apresentam dimensões de 80 x 80 x (25, 40, 60, 82, 102) (mm), respectivamente, e foram testadas a uma taxa de deformação de 0.01/s.

3.2 ANSYS

Ajuste de Modelos de Materiais

O efeito da ativação da ferramenta de normalização de erro no ANSYS, no ajuste de modelos de materiais, foi avaliado para a curva tensão×deformação da espuma verde D24.4. Essa curva foi gerada a taxa de deformação de 0.083/s. Verificou-se as curvas geradas por meio do ajuste de curvas do ANSYS com e sem a ativação dessa ferramenta.

Número de Pontos

O efeito do número de pontos obtidos por testes, no ajuste de modelos de materiais, foi avaliado para a curva tensão×deformação da espuma verde D24.4. Essa curva foi gerada a taxa de deformação de 0.083/s. Verificou-se as curvas geradas com menos (17) e mais pontos.

Melhores Modelos

Para determinar qual o melhor modelo de material a ser utilizado para o ajuste de curvas, Blatz-Ko, Ogden-Foam de primeira, segunda ou terceira ordem, comparou-se curvas tensão×deformação ajustadas aos dados experimentais. Para a análise dos modelos de Blatz-ko, as curvas foram ajustadas em relação à curvas experimentais obtidas a taxa de deformação de 0.01/s para as espumas cinza, rosa e verde. Para a análise dos modelos de Ogden-Foam de primeira a terceira ordem, as curvas foram ajustadas em relação aos dados experimentais obtidos a taxa de deformação de 0.083/s, sem erro normalizado, para a espuma rosa.

3.3 Conceitos e Validação da Hipótese do Trabalho

Nesta seção, são apresentados os conceitos de *Raio de Deformação*, *Raio do Cilindro*, o procedimento para determinação dos valores mínimos de espessura e raio do cilindro (ou raio maciço) e as metodologias para validação da hipótese do trabalho tanto em simulação quanto por experimentos reais, para a obtenção dos deslocamentos locais esperados, por meio de simulação, para as espumas rosa, cinza e verde com superfícies planas.

3.3.1 Conceitos - Raio de Deformação e Raio do Cilindro

Os conceitos de raio de deformação e raio do cilindro são fundamentais para que a deformação local de um material, considerando uma determinada curvatura, permaneça constante e constitua uma propriedade do material para cada valor de carregamento. A Figura 3.5 apresenta uma vista em corte de um objeto, antes e após a deformação local. Esse objeto apresenta curvaturas de superfície e de base de pouco graus além de restrições de movimento na base em direções X, Y e Z. A ponta do efetuator é indicada, nessa mesma imagem, além do eixo Z do sistema de coordenadas que está posicionado sobre a superfície antes da deformação e é perpendicular a seção transversal do efetuator.

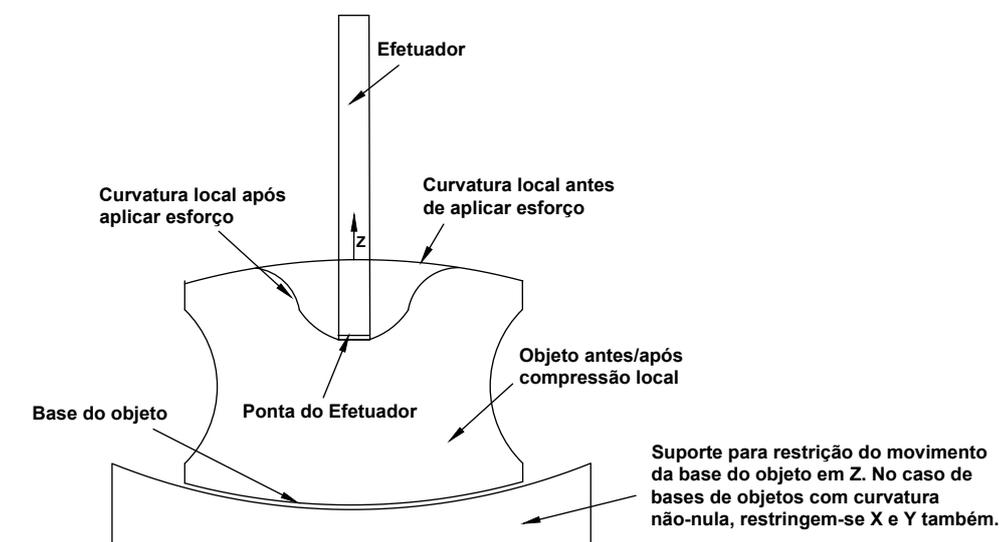


Figura 3.5: Nomenclatura geral - Compressão de um objeto de geometria genérica - Vista em corte.

O raio de deformação corresponde a distância entre o ponto, que sofreu algum deslocamento em Z, mais afastado no plano XY em relação a origem do sistema de

coordenadas. De forma prática, o raio de deformação pode ser determinado para um objeto em formato de cilindro e para um esforço, definindo-se um grande valor de espessura para o cilindro e, em seguida, aumentando-se o diâmetro do cilindro, até o momento que a deformação local ocorra sem que haja deslocamento em Z dos pontos de borda. Nesse instante, o raio de deformação de um material para um dado carregamento é determinado e, ao mesmo tempo, o raio mínimo do cilindro (ou raio maciço mínimo). Os objetos reais, para a aplicação dos métodos propostos pelo presente trabalho devem apresentar uma região maciça. Essa região deve ser capaz de conter um cilindro imaginário de raio maciço mínimo e uma altura maior ou igual a espessura mínima, além das restrições de movimento.

Por exemplo, na Figura 3.6, quando a região deformada, apresentada na letra (a), é projetada no plano XY (b), supondo que a deformação encontrada foi elíptica, o raio de deformação corresponde a um dos semieixos da elipse e define um círculo hipotético. Já o círculo com raio do cilindro é definido pela metade do comprimento do lado maciço do objeto, projetado sobre o plano XY, e engloba o círculo com raio de deformação. Além disso, o lado maior do objeto, nesse exemplo, corresponde ao maior lado de um retângulo e engloba até mesmo regiões não maciças.

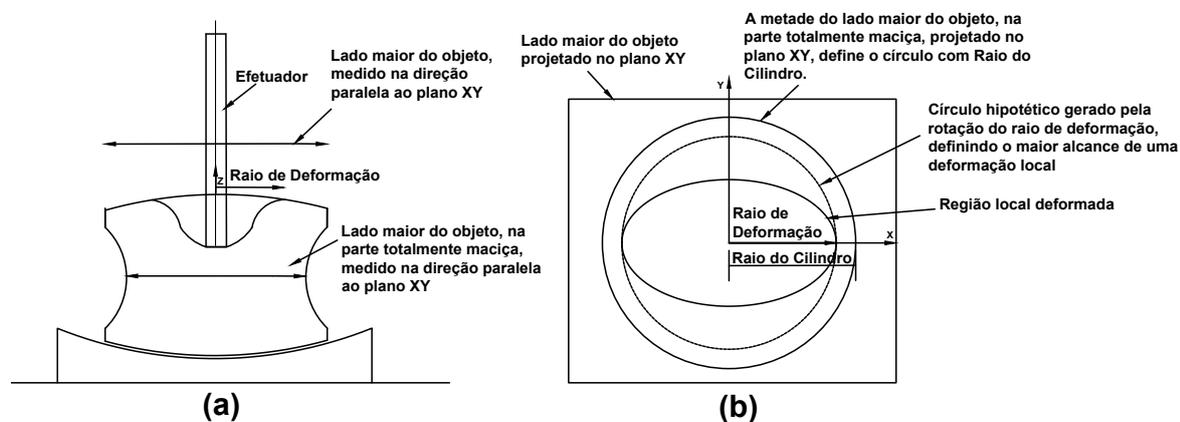


Figura 3.6: Objeto de geometria genérica - Determinação do Raio de Deformação e do Raio do Cilindro - (a) Vista lateral. (b) Vista superior.

Valor Mínimo Para o Raio do Cilindro

Para determinar o valor mínimo para o raio do cilindro, realizaram-se simulações, comprimindo a espuma rosa com um efetudador virtual. Arbitrou-se que o eixo Z, do sistema de coordenadas global, está localizado na mesma direção do eixo central do efetudador (nos experimentos reais corresponde ao eixo central do cano), e os eixos X

e Y são paralelos a face do efetuator. Considerou-se que a face comprimida de um objeto quando projetada, por meio de uma projeção ortogonal, sobre um plano paralelo a seção transversal do efetuator, define um conjunto de pontos que englobam o círculo determinado pelo raio do cilindro e o círculo determinado pelo raio de deformação. Ambos os círculos apresentam como origem o centro do efetuator $(0, 0, Z)$ no momento em que o efetuator toca o objeto antes de iniciar a deformação. Além disso, o círculo determinado pelo raio do cilindro deve conter o círculo determinado pelo raio de deformação.

Valor Mínimo Para o Espessura do Cilindro

Para determinar o valor mínimo de espessura, verificou-se a partir de qual valor da espessura de um cilindro, a deformação local permanece constante. Esse cilindro apresentou material de espuma rosa e raio de cilindro mínimo.

Considerações

Deve-se notar que os valores mínimos de espessura e raio do cilindro devem ser obtidos para o material a ser identificado que se deforma mais facilmente e para o maior carregamento que será aplicado sobre uma determinada área de um objeto. No passo de simulação, são esses valores que determinam o cilindro que representa a região local de um objeto, acompanhado da calota esférica para a determinação da curvatura.

3.3.2 Validação da hipótese do trabalho

De forma simplificada, a hipótese do trabalho afirma que a deformação local de um objeto homogêneo é uma propriedade constante do material que o constitui considerando uma curvatura de superfície, um esforço e uma área de aplicação de esforço fixos desde que as dimensões do objeto respeitem limites de espessura e raio do cilindro. A comparação entre as deformações locais de objetos com geometrias variadas permite a avaliação da hipótese, verificando se a deformação local de um material pode ser utilizada para identificá-lo. As metodologias para a validação da hipótese do trabalho, por meio de simulação e experimentos reais, são apresentadas nesta subseção.

Simulação

O *software* ANSYS simula a deformação do material, partindo-se de um conjunto de parâmetros de entrada: modelo do objeto, tipo de elemento, esforços, restrições de deslocamento, malha ao redor de um objeto e ensaios mecânicos (ensaios uniaxiais

de tração, compressão, ensaio biaxial, ensaio de cisalhamento, ensaio de cisalhamento simples ou ensaio volumétrico).

As simulações de aplicação de esforços em objetos que apresentam diferentes geometrias globais foram realizadas. O algoritmo que define o passo de simulação é apresentado no *Algoritmo 1*. A ideia principal consiste em variar para cada curvatura C de superfície de objeto (nesse caso, utilizaram-se somente espumas planas), os tipos de material M (espumas rosa D16, cinza D20 e verde D24.4). Para cada material, a força aplicada possui módulo de 2 kgf e é aplicada por um efetuator de seção transversal circular com raio de 15 mm. Definem-se o tipo de elemento, a força F , os dados de tensão×deformação obtidos pelo ensaio de compressão uniaxial e as restrições de movimento. A forma deformada do objeto é obtida. Por último, a posição original e o deslocamento de cada um dos nós da superfície são salvos em um arquivo texto.

Algoritmo 1: PROVA CONCEITUAL POR MEIO DA SIMULAÇÃO.

Entrada: C, M, F

Saída: Arquivos com coordenadas iniciais e finais dos nós para cada simulação

```

1 início
2   para cada curvatura de superfície  $c$  em  $C$  faça
3     para cada material  $m$  em  $M$  faça
4       para cada força  $f$  em  $F$  faça
5         Aplicam-se os parâmetros de entrada;
6         Simula-se no software de elementos finitos;
7         Abre um novo arquivo e salvam-se as coordenadas iniciais e
           finais dos nós da superfície;
8       fim
9     fim
10  fim
11 fim
12 retorna Arquivos

```

A saída corresponde a diferentes arquivos, um para cada trio: curvatura, material e força aplicada. Dentro desses arquivos, há posições iniciais e finais obtidas via simulação para cada nó. As simulações, uma vez executadas, não necessitam de serem repetidas. Essa é uma das características que permitem aos métodos MALD-CN e MALD-PC identificarem materiais em tempo real ao contrário do MEFI (Apêndice D).

Experimentos Reais

Para validar a hipótese do trabalho, três conjuntos de ensaios com espumas de mesmo material (rosa D16) são realizados. As três espumas apresentam superfície plana e diferentes geometrias globais. Sobre cada espuma, cinco alfinetes são posicionados com o mesmo espaçamento, antes da deformação. Além disso, eles estão alinhados com o centro do efetuator (ponta do cano) que pressionará as espumas. Nesses ensaios, para cada objeto, foram aplicados três vezes o mesmo esforço (2 kgf). Para cada esforço aplicado, mediram-se os deslocamentos de todos os cinco alfinetes no eixo Z, perpendicular a ponta do efetuator, por meio de um par de régua.

3.4 Métodos de Análise Local de Deslocamentos

Dois novos métodos para a identificação de materiais são propostos neste trabalho: **Método de Análise Local de Deslocamentos por Curvas de Nível (MALD-CN)** e **Método de Análise Local de Deslocamentos de Pontos Característicos (MALD-PC)**. Deve-se notar que ambos os métodos são consequências diretas da validação da hipótese do trabalho.

Em todos os testes realizados em ambiente controlado, considerou-se o sistema de coordenadas posicionado tangencialmente à mesa. Considerando a seção transversal do efetuator paralela à mesa, idealmente o centro do efetuator corresponde à origem do sistema de coordenadas. Em todos os testes que utilizaram o robô e na simulação, as coordenadas (X, Y, Z) são consideradas em relação ao centro do efetuator no instante imediatamente anterior ao início da compressão do objeto.

O método MALD-CN tem como ideia principal a verificação da mudança de curvatura de uma superfície, por meio da análise de deslocamentos de pontos de uma superfície na direção Z. Já a técnica de identificação de materiais MALD-PC apresenta como conceito principal a análise de deslocamentos de pontos característicos dentro de um raio de deformação esperado.

Para a identificação de materiais, ambos os métodos utilizam, como referência, dados de deformação local previamente tabelados. Os valores de referência para a deformação local de um material, os dados tabelados, devem ser obtidos de forma próxima à realidade, com poucos milímetros de erro e com baixa dispersão. O presente trabalho sugere duas formas para a determinação dos deslocamentos dos pontos: por medição precisa, manual ou automática, com instrumentos de medição como régua, paquímetro, dentre outros, ou por meio de simulação em *softwares* de elementos finitos. Cada uma das formas apresenta vantagens e desvantagens. A medição precisa apresenta como

grande vantagem a maior precisão (baixa variabilidade entre as medições) e acurácia (pequena distância entre valor medido e valor real) da medição enquanto a simulação apresenta como grandes vantagens a flexibilidade, a capacidade de simulação de geometrias e materiais variados. Após a construção das tabelas de referência de forma precisa e por meio das tabelas geradas pelo *software* de elementos finitos, experimentos foram realizados com um conjunto de objetos homogêneos, quase-homogêneos e heterogêneos por meio de medição precisa com régua e utilizando o sensor Kinect 1.0 (Apêndice E).

Os deslocamentos esperados para um conjunto de pontos, conforme apresentado na Figura 5.6, podem ser determinados manualmente, acrescentando-se um conjunto de alfinetes e, em seguida, medindo-se os deslocamentos por meio de instrumentos de medição com precisão milimétrica. Entretanto, medir manualmente apresenta a desvantagem de a extensão de uma área de deformação poder ser grande e algumas vezes assimétrica, necessitando de diversas marcações para englobar possíveis pontos característicos sobre regiões de deformação de um dado material. Além disso, a colocação de alfinetes pode ser inviável dependendo da rigidez do material.

Embora a simulação por meio do MEF possa apresentar problemas de menor acurácia, principalmente relacionados ao ajuste de modelos de compressão uniaxial, as simulações permitem que as posições, antes e após a deformação, de um conjunto de pontos de objetos sejam obtidas, em toda a extensão de uma área deformável, independentemente da deformação local originada. Além disso, a simulação apresenta como principal vantagem o fato de permitir a simulação de superfícies com diferentes curvaturas, obtendo as coordenadas, antes e após a deformação, de um conjunto de pontos. Não necessitando adquirir ou construir objetos reais com diferentes curvaturas de superfície. Finalmente, os *softwares* de elementos finitos permitem a simulação de diferentes tipos de objetos, incluindo objetos homogêneos, quase-homogêneos e heterogêneos.

A primeira subseção apresenta a metodologia referente aos testes realizados para a verificação de algumas características de materiais que podem influenciar a deformação local. Em seguida, cada um dos métodos MALD-CN e MALD-PC, além de um conjunto de testes em ambientes reais são apresentados.

3.4.1 Ensaios em Ambiente Controlado

3.4.1.1 Calibração da câmera de intensidade do Kinect

Utilizou-se o *ToolBox* calib do MATLAB® para a calibração tanto dos parâmetros intrínsecos quanto extrínsecos da câmera de intensidade do Kinect. Os parâmetros extrínsecos transladam o centro óptico da câmera para a origem do sistema de coor-

denadas posicionado sobre a bandeja branca acima da mesa, que é exibido na Figura 5.7. Além disso, os eixos X_c e Y_c , no sistema de coordenadas da câmera, passam a se orientar conforme os eixos X e Y do novo sistema de coordenadas. Posteriormente, o centro do novo sistema de coordenadas é transladado pela largura da bandeja de forma a tornar-se tangencial a mesa.

Os parâmetros intrínsecos do Kinect 1.0, fixado à máquina de ensaios em ambiente controlado, foram obtidos somente para a câmera de intensidade devido ao fato que um dos tópicos do ROS fornece a imagem de profundidade retificada e com os pixels correspondentes em relação a imagem de intensidade.

3.4.1.2 Testes com medição precisa - Objetos Homogêneos - Deslocamentos Máximos

Efeitos de Tensões Residuais e Velocidade de Carregamento

As tensões residuais correspondem a tensões que permanecem no interior de um material quando um esforço deixa de ser aplicado. Como resultado, um esforço de menor valor pode provocar uma deformação maior. Outro fator que pode influenciar a deformação local corresponde a velocidade de carregamento. Dependendo das curvas tensão×deformação de um material, a deformação local de um material pode ser influenciada pela taxa de deformação e conseqüentemente pelo tipo de carregamento. Para avaliar essas influências, testes foram realizados.

Os experimentos para verificação da influência de tensões residuais e do tipo de carregamento, estático ou quase-estático, foram feitos com amostras de espumas rosa, cinza e verde sem capa. Aplicaram-se a seqüência de forças de 2 kgf, 3 kgf, 4 kgf, 3 kgf e 2 kgf, realizando-se 10 medições para cada espuma. Os esforços foram aplicados sobre o mesmo ponto, para cada espuma. Primeiramente, para um valor de carga, o ensaio estático era feito, objetivou-se minimizar os efeitos dinâmicos da aplicação de esforços sobre as três espumas. Em seguida, o ensaio quase-estático é realizado para as três espumas. Devido ao fato de as tensões residuais corresponderem a tensões que permanecem no interior do material quando um esforço deixa de ser aplicado, embora o objeto possa recuperar a dimensão original, quando há tensões residuais, um mesmo esforço pode provocar uma deformação maior, por isso a seqüência de carregamentos 2/3/4/3/2 (kgf). Após a aplicação do esforço, aguarda-se o sistema entrar em equilíbrio de forças, mede-se os deslocamentos, remove-se a carga aplicada de forma súbita e aguarda-se 20 segundos entre uma medição e outra.

Teste de Repetição - Verificação de homogeneidade

Para verificar se as espumas rosa, cinza e verde eram homogêneas em termos de resistência a deformação local, medições de deslocamento máximo para três pontos, sobre cada espuma, foram realizadas. Para cada ponto foram aplicados dez carregamentos rápidos de 2 kgf e, em seguida, mediram-se os deslocamentos máximos.

3.4.2 Alinhamento de Nuvens de Pontos

Esta subseção refere-se ao alinhamento de nuvens de pontos adquiridas em experimentos que utilizaram câmera. Antes do alinhamento de nuvens de pontos, primeiramente, adquirem-se dois pares de imagens de intensidade e profundidade. No presente trabalho, ambos os pares de imagens são obtidos por meio do sensor *Kinect* 1.0. O primeiro par de imagens é adquirido no instante anterior à deformação de um objeto, o segundo par de imagens é obtido quando o sistema entra em equilíbrio de forças (referiu-se a esse momento, ao longo dessa subseção, pela expressão **após a deformação**). Ou seja, a força aplicada pela máquina de ensaios em ambiente controlado ou atuador linear é igualada pela força de reação realizada pelo objeto em teste. Filtram-se as imagens de profundidade adquiridas utilizando o filtro da mediana com o objetivo de reduzir o número de pontos com grandes erros de profundidade. O próximo passo, consiste em detectar os pontos característicos com o detector *STAR*¹ (Apêndice F) o qual é invariante a escala e é preciso.

Na etapa seguinte, o descritor BRAND (Nascimento et al. [2012]) (Apêndice G) foi utilizado para descrição dos pontos característicos devido a sua capacidade de fusão de dados de aparência e informação geométrica, apresentando robustez, processamento rápido e baixo consumo de memória. O descritor BRAND descreve uma região baseando-se na direção dominante de *keypoints*, essa direção é computada para uma pequena região de um objeto e considera as normais a superfície. Como esse descritor descreve os *keypoints* baseados nas normais a superfície, o resultado é que caso haja uma deformação do objeto, na região deformada a descrição será distinta antes e após a deformação. Como consequência, a correspondência dos pontos característicos na região de deformação provavelmente irá conter muitas correspondências incorretas. Portanto não se deve utilizar pontos característicos na região de deformação para o alinhamento grosseiro e fino.

Após a descrição dos pontos característicos, realiza-se a etapa de alinhamentos de nuvens de pontos (Figura 3.7) a qual foi dividida em quatro etapas principais: a

¹Detector STAR: https://docs.opencv.org/2.4.13.2/modules/features2d/doc/common_interfaces_of_feature_detectors.html

correspondência entre *keypoints*, a filtragem de *outliers*, os alinhamentos grosseiro e fino.

Utilizou-se a verificação cruzada para encontrar a melhor correspondência para cada *keypoint*. Como a posição central do efetuador ao comprimir um objeto apresenta variações de uma imagem para a outra, considerou-se que essa posição pode estar localizada a 360 graus e com uma distância máxima de 16 mm em relação ao ponto $(0, 0, Z)$ no plano XY de altura Z. O valor de 16 mm foi determinado por uma análise de uma sequência de imagens, correspondendo de forma aproximada à distância máxima entre a posição do efetuador e o ponto $(0, 0, Z)$ o qual idealmente deveria corresponder ao centro do efetuador.

Os *keypoints* foram divididos em dois grupos, um localizado dentro de uma região na qual todos os pontos que sofrem deslocamento na direção Z estão localizados e o outro constituído por pontos que estão localizados fora da região de deformação, não sofrendo deslocamento em Z. De forma mais detalhada, o primeiro grupo é constituído por pontos característicos que estão posicionados dentro do círculo definido pelo raio de deformação acrescido da incerteza relativa à posição do centro do efetuador (denominado **raio de deformação incerto**). Já o segundo grupo é constituído por pontos característicos que estão localizados fora do raio de deformação incerto, não sofrendo deslocamentos perceptíveis em Z. Como destacado anteriormente, o raio de deformação é uma característica do material e o círculo associado a esse raio engloba um conjunto de pontos que sofrem deslocamentos na direção Z. De forma semelhante, o círculo definido pelo raio de deformação incerto engloba o círculo definido pelo raio de deformação além de alguns pontos que não sofrem deslocamentos em Z devido a incerteza da posição central do efetuador.

A filtragem de *outliers* foi realizada por meio da função Matriz Fundamental e do algoritmo de RANSAC, disponibilizados pela biblioteca *OPENCV*. Entretanto, como a nuvem de pontos sofre deformação após a aplicação do esforço, correspondências incorretas ainda permanecem. Uma melhoria para a remoção de *outliers* consistiu em utilizar restrições de distância entre as coordenadas iniciais e finais de pontos, no plano XY, baseando-se nos dados obtidos por meio de simulações e por experimentos reais. Na prática, utilizar a restrição de deslocamentos em XY de 7 mm, baseando-se na resultante dos deslocamentos máximos em X e Y de 5 mm obtidos em simulação para as espumas rosa e verde, permite a remoção de *outliers* para espumas. No entanto, para outros materiais, verificou-se que algumas vezes valores superiores seriam necessários para que não fossem descartados quase todos pontos característicos da imagem. Como consequência e com o objetivo de realizar o alinhamento de nuvens de pontos corretamente, utilizou-se o valor de 30 mm como a distância máxima no plano XY

antes e após a deformação, valor esse determinado experimentalmente para o objeto que apresentou os maiores deslocamentos que foi o cubo com fibras de silicone (Figura 5.12 (m)).

O alinhamento grosseiro de nuvens de pontos foi realizado por meio da função *estimateRigidTransformation* da biblioteca PCL² e dos *keypoints* localizados fora do raio de deformação incerto para um dado material. Por exemplo, ao identificar espumas, o alinhamento grosseiro foi realizado com base nos pontos característicos fora do raio de deformação incerto para espumas. Por último, o alinhamento fino é realizado, por meio do algoritmo ICP (Rusinkiewicz & Levoy [2001]).



Figura 3.7: Fluxograma para alinhamento de nuvens de pontos.

3.4.3 Objetos Homogêneos, Heterogêneos e Quase-Homogêneos

Os objetos homogêneos são aqueles constituídos por somente um tipo de material. Já os objetos heterogêneos são aqueles que apresentam dois ou mais tipos de materiais. Para o presente trabalho, considerou-se que os objetos heterogêneos são constituídos por duas partes homogêneas distintas, uma interior ao objeto e a outra a revestindo, denominada capa. Essa restrição ocorre porque, mesmo para objetos heterogêneos de duas camadas, a rigidez pode ser totalmente alterada devido a um dos materiais. Imaginando, por exemplo, uma espuma prismática de baixa rigidez e uma tábua de madeira posicionada sobre a face que será comprimida dessa espuma, ao aplicar 2 kgf em uma área circular de raio 16 mm sobre uma espuma de baixa rigidez como a espuma verde, ela poderá não se deformar devido ao fato de a madeira ser rígida e transmitir o esforço por toda superfície da espuma. Ou seja, não haveria deformação local para esse caso, embora um dos materiais seja uma espuma.

Alguns materiais como as espumas de poliuretano de baixa densidade absorvem o sinal infravermelho emitido pelo sensor Kinect 1.0, não permitindo que informações de deslocamento para os pontos localizados sobre a superfície, muitas vezes, sejam obtidos. Em outras situações, embora o material apresente uma superfície que não absorva o infravermelho, a superfície pode apresentar um baixo número de pontos característicos, resultando em um alinhamento de nuvens de pontos incorreto. Para solucionar esses problemas, o presente trabalho propõe o uso de capas de baixa rigidez

²PCL: <http://pointclouds.org/>

e grande número de *keypoints* sobre objetos homogêneos. Adotou-se o termo quase-homogêneo para se referir a objetos homogêneos com esse tipo de capa, ou heterogêneos para objetos heterogêneos com esse tipo de capa. Devido a baixa rigidez e ao fato de as capas serem posicionadas sem restrição de movimento, elas praticamente não esticam nem encolhem, ajustando-se à superfície do objeto e não alterando a deformação local. Além da baixa rigidez e do grande número de pontos característicos, as capas não devem absorver o sinal de infravermelho do sensor Kinect 1.0. Como consequência, os métodos MALD-CN e MALD-PC podem ser aplicados até mesmo para objetos, inicialmente, sem textura.

3.4.4 Método de Análise Local de Deslocamentos Por Curvas de Nível (MALD-CN)

3.4.4.1 Descrição

O Método de Análise Local de Deslocamentos Por Curvas de Nível (MALD-CN) apresenta como conceito central que a aplicação de esforços, em uma região de um objeto, pode resultar na mudança de curvatura local de uma superfície e essa mudança permite a identificação de materiais. De forma simplificada, as mudanças de curvaturas de superfície podem ser analisadas como um conjunto de deslocamentos na direção Z, antes e após a deformação, em relação a um sistema de coordenadas posicionado na ponta do efetuador (Figura 3.8). Esse conjunto de deslocamentos permite que curvas de nível sejam obtidas devido a diferenças de profundidade, para cada direção paralela ao eixo Z, entre curvaturas antes e após a deformação. A comparação entre as curvas de nível obtidas por experimentos reais e as curvas de nível de referência, obtidas por meio de simulações ou por experimentos, permite a identificação de materiais.

A sequência de etapas do MALD-CN, utilizando-se um sensor de intensidade e profundidade e sem o alinhamento de nuvens de pontos, é descrita no fluxograma apresentado na Figura 3.9. As caixas indicadas pela cor azul correspondem às etapas que podem ser realizadas tanto por sensores de intensidade e profundidade, como o Kinect 1.0, quanto por instrumentos de medição precisa, de forma manual ou automática. A caixa indicada pela cor roxa corresponde a aplicação de esforços e as indicadas pela cor laranja correspondem às etapas principais do MALD-CN.

Conforme apresentado no fluxograma (Figura 3.9), a primeira etapa do MALD-CN, utilizando-se um sensor de intensidade e profundidade e sem o alinhamento de nuvens de pontos, consiste em adquirir uma imagem de profundidade antes da deformação. Em seguida, realiza-se uma transformação rígida que transfere o centro óptico

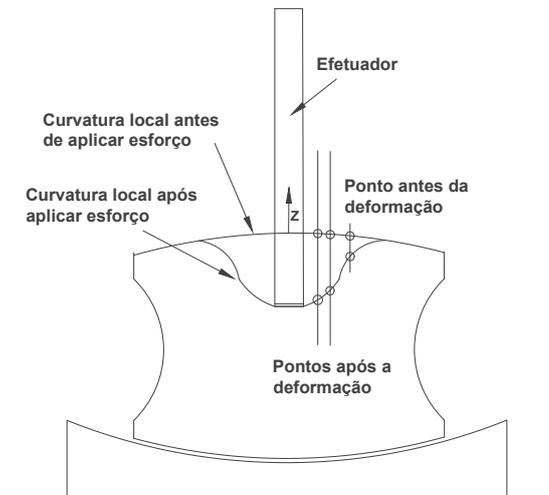


Figura 3.8: MALD-CN - Vista em corte de um objeto antes e após a deformação - Conceito Central.

do Kinect 1.0 para um ponto sobre uma mesa (em ensaios controlados) ou ponta do efetuador (para o robô), e que rotaciona a câmera de forma a manter o eixo Z da câmera na mesma direção que o eixo Z do sistema de coordenadas da mesa ou efetuador. A terceira etapa consiste na determinação da curvatura de uma superfície antes da aplicação do esforço. Realiza-se a compressão local do objeto e no momento em que o sistema entra em equilíbrio de forças, adquire-se um par de imagens de intensidade e profundidade. Outra transformação rígida é realizada devido a parâmetros extrínsecos da câmera, corrigem-se os efeitos de distorção da lente e erros de profundidade.

Quando um sensor de intensidade e profundidade for utilizado e houver movimento relativo em Z entre o robô e os pontos do objeto deformado que estão localizados fora do raio deformável do objeto, o alinhamento de nuvens de pontos deve ser realizado. Esse alinhamento permite que a diferença entre as curvaturas, antes e após a deformação de objetos, seja obtida de forma mais correta. Nesse caso, as etapas indicadas pelas caixas azul e roxa do fluxograma (Figura 3.9) podem ser substituídas pela sequência de etapas, indicadas pelas caixas de mesmas cores, do fluxograma referente ao MALD-PC (Figura 3.13).

Caso seja necessário medir com acurácia milimétrica a variação da curvatura, pode-se substituir as caixas indicadas pela cor azul no fluxograma, apresentado na Figura 3.9, pelos mesmos procedimentos, porém utilizando-se instrumentos de medição precisa, de forma manual ou automática. A utilização de réguas, por exemplo, é uma alternativa para a obtenção de dados menos susceptíveis a ruído e com uma acurácia maior.

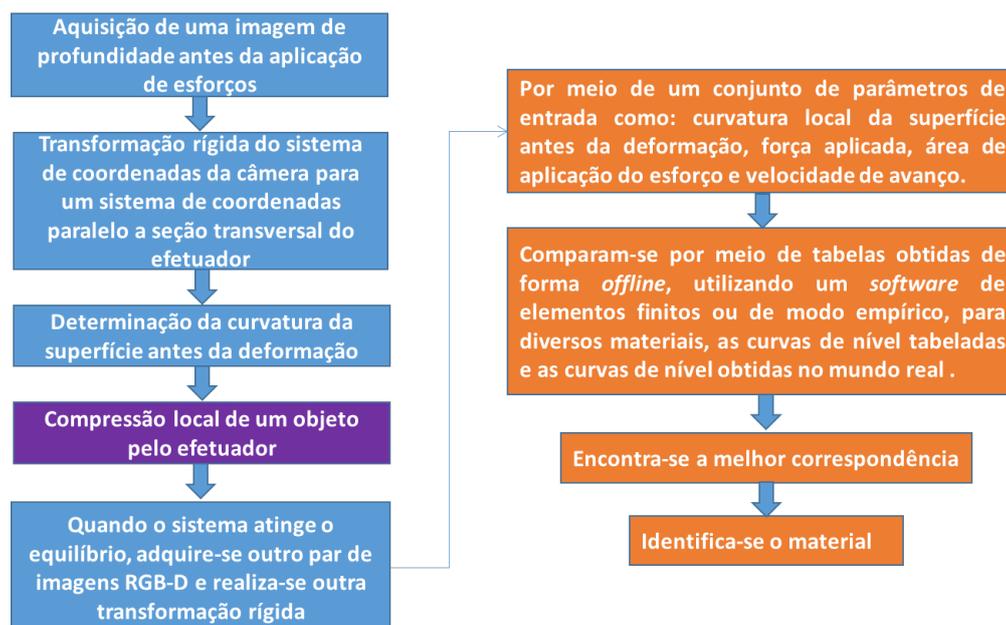


Figura 3.9: Fluxograma referente ao MALD-CN utilizando câmera e sem o alinhamento de nuvens de pontos.

Após a determinação da variação de curvatura local de um objeto para um dado carregamento e área do efetuator, as etapas indicadas pelos blocos laranja da Figura 3.9 são realizadas. Essas etapas consistem em: considerando um conjunto de parâmetros como curvatura local da superfície antes da deformação, força aplicada, área de aplicação do esforço e velocidade de avanço, realizar uma comparação entre as curvaturas locais obtidas por experimentos reais, por meio de medições precisa ou por câmera com as medições de referência, obtidas por simulação ou por medição direta de deslocamentos de pontos característicos. Encontrando-se a melhor correspondência e identificando-se o material. Esse método permite identificar materiais sem rastrear a movimentação de pontos ao longo da superfície.

Uma observação importante em relação ao MALD-CN é que por esse método comparar a mudança de curvatura na direção Z e o sensor Kinect 1.0 respeitar o modelo de projeção perspectiva, pontos projetados sobre o mesmo pixel antes e após a deformação não correspondem a pontos na mesma direção paralela ao eixo Z (Figura 3.10). Ou seja, antes de comparar os deslocamentos entre os pontos antes e após a deformação, pode-se organizar os dados reais de forma a permitir uma implementação mais eficiente do algoritmo do MALD-CN. Por exemplo, caso a deformação local esperada seja simétrica em torno da posição central do efetuator, pode-se organizar os dados obtidos por experimentos reais em uma tabela cuja chave é indicada pela distância radial do ponto ao centro do objeto, no plano XY , e os campos associados

a chave apresentam as posições antes e após a deformação. Dependendo da extensão da área deformável, esse formato de busca resultará em buscas com menor tempo de execução, devido a menor complexidade de tempo, por exemplo, de tabelas *Hash*.

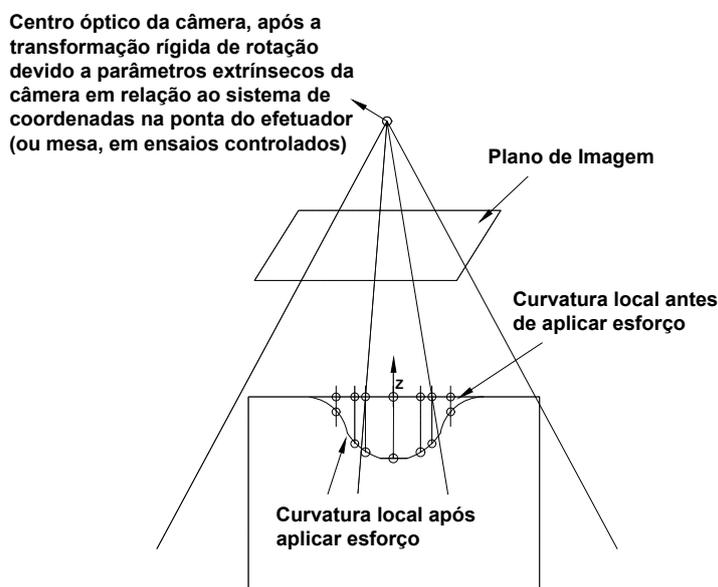


Figura 3.10: MALD-CN - Comparação entre curvaturas antes e após deformação - Problema da projeção perspectiva.

O método MALD-CN é uma consequência direta do fato de a deformação local ser uma propriedade do material para uma dada curvatura, carregamento e área de aplicação do esforço. Isso porque se a deformação local é aproximadamente igual para mesmos valores de curvaturas locais, esforço aplicado e área de aplicação do esforço, é uma consequência que as curvas de nível traçadas, que são obtidas pela diferença em Z entre a curvatura inicial e a superfície deformada, sobre uma região permitam a identificação do material. Uma vez que as curvas de nível representam a mudança da curvatura local da superfície.

3.4.4.2 Ensaios em Ambiente Controlado - Testes de Repetição - Deslocamentos Máximos

Objetos Homogêneos - Medição com Régua

Para medir os deslocamentos reais de cada uma das espumas e verificar as incertezas, ensaios de repetição foram realizados. Na máquina de ensaios, realizaram-se 10 repetições sobre cada uma das espumas (rosa, verde e cinza) sem capa. Aplicaram-se cargas de 2 kgf de modo quase-estático sobre uma área circular com raio igual a 16 mm em intervalos de 20 segundos entre o sistema atingir o equilíbrio e a aplicação do próximo

carregamento. Para cada teste, mediu-se por meio de uma régua o deslocamento máximo obtido. Utilizou-se a distribuição de *t-student*, para 95% e 9 graus de liberdade (t igual a 2.262), para computar a repetitividade de um conjunto de medições para o deslocamento máximo.

Objetos Quase-Homogêneos e Heterogêneos - Medição Com Régua e Por Câmera

Aplicou-se uma força de 2 kgf sobre uma região circular de raio 16 mm, foram realizadas 10 medições de deslocamentos máximos por meio de régua e por câmera em intervalos de 20 segundos. Deve-se notar que o deslocamento máximo medido por câmera, muitas vezes, será inferior ao deslocamento medido por régua, uma vez que a régua está fixada sobre o efetuador e mede o deslocamento máximo real enquanto que a câmera somente permite encontrar o deslocamento máximo na vizinhança do efetuador.

Teste para Identificação de Espumas

Para verificar a capacidade do MALD-CN em identificar materiais, testes foram realizados para identificar espumas em meio a objetos pertencentes a outras categorias. A diferenciação foi feita com base nos deslocamentos máximos esperados para a vizinhança de um efetuador de área de seção transversal conhecida, para um dado carregamento e curvatura. Não se utilizou o alinhamento de nuvens de pontos para testes em ambiente controlado, uma vez que não houve movimento relativo, na direção Z, entre o efetuador e pontos localizados fora do raio de deformação incerto para espumas.

3.4.4.3 Experimentos com o robô

Descrição

Com o objetivo de avaliar a utilização do MALD-CN em ambientes de maior ruído, com presença eventual de deslocamentos, na direção Z, entre o efetuador e o objeto comprimido, maior ruído devido a influência da distância sobre o erro de profundidade do Kinect e incertezas associadas a aplicação de esforços, testes foram realizados por meio de um atuador linear posicionado sobre o robô móvel *TurtleBot*. Para que os testes pudessem ser realizados, primeiramente, a calibração do Kinect 1.0 foi realizada. Em seguida, os parâmetros extrínsecos, em relação a ponta do efetuador no instante imediatamente anterior ao início da deformação, e intrínsecos foram determinados por meio do pacote *ToolBox* calib do MATLAB®.

O procedimento geral para realização dos experimentos consistiu em posicionar diferentes objetos heterogêneos a frente do robô (Figura 3.11), um de cada vez. Em seguida, o atuador linear posicionado sobre o robô aplica uma força de 2 kgf sobre uma área circular de raio 16 mm. Por meio do sensor Kinect 1.0, adquirem-se um par de imagens de intensidade e profundidade antes e após a deformação. Por meio das imagens capturadas e utilizando-se o método de identificação MALD-CN, realiza-se um teste para verificar a capacidade de o robô identificar as espumas em meio a outros materiais como manta acrílica, algodão, fibras de silicone.



Figura 3.11: Robô e atuador linear - Visão frontal.

Os deslocamentos locais são medidos utilizando o Kinect 1.0, o ROS e realizando-se uma sequência de passos. Primeiramente, um par de imagens de intensidade e profundidade são adquiridos antes da deformação. No próximo passo, o motor Dynamixel AX-12+ aplica o torque desejado utilizando o módulo *joint_torque_controller* do ROS. Pela relação entre torque transmitido pelo motor Dynamixel e o raio da engrenagem de dentes retos, tem-se uma força transmitida. Essa força é transmitida pela cremalheira

a qual empurra um cano, causando um movimento de avanço no sentido de comprimir um material. Quando a situação de equilíbrio de forças é atingida, o giro do motor é parado, adquire-se outro par de imagens. Utilizando-se os métodos propostos por esse trabalho, identificam-se os objetos constituídos por espumas e os diferenciam dos outros objetos.

Calibração de Câmera

Os parâmetros extrínsecos e intrínsecos do Kinect 1.0 acoplado ao robô foram obtidos por meio da *ToolBox* calib do MATLAB®. A calibração dos parâmetros extrínsecos foi realizada em relação ao sistema de coordenadas posicionado sobre a posição central da ponta do efetuador (ponta do cano) no instante imediatamente anterior ao início da compressão do objeto. Os parâmetros intrínsecos foram obtidos somente para a câmera de intensidade devido ao fato que um dos tópicos do ROS fornece a imagem de profundidade retificada e com os pixels correspondentes em relação a imagem de intensidade.

Diferenciação de Objetos Heterogêneos

Um objeto de cada vez foi posicionado em frente ao robô, aplicou-se o esforço constante de 2 kgf sobre uma área circular de raio 16 mm, em seguida o método MALD-CN foi aplicado para definir se um objeto é constituído por espuma.

3.4.5 Método de Análise Local de Deslocamentos Por Pontos Característicos (MALD-PC)

3.4.5.1 Descrição

O Método de Análise Local de Deslocamentos de Pontos Característicos (MALD-PC) consiste na identificação de materiais por meio da determinação do deslocamento de alguns pontos da superfície com vizinhanças especiais denominados pontos característicos (Figura 3.12). A identificação do material pelo MALD-PC é obtida por uma sequência de passos, sendo as principais etapas, a correspondência de pontos característicos antes e após a deformação (no momento de equilíbrio de forças), a determinação dos deslocamentos de pontos característicos dentro do raio de deformação incerto, a determinação da posição real do centro do efetuador e a comparação dos deslocamentos de *keypoints* com os deslocamentos esperados, armazenados em tabelas de referência obtidas por simulação ou por experimentos reais. O alinhamento de

nuvens de pontos antes e após a deformação utiliza somente pontos característicos fora do raio de deformação incerto para o material analisado.

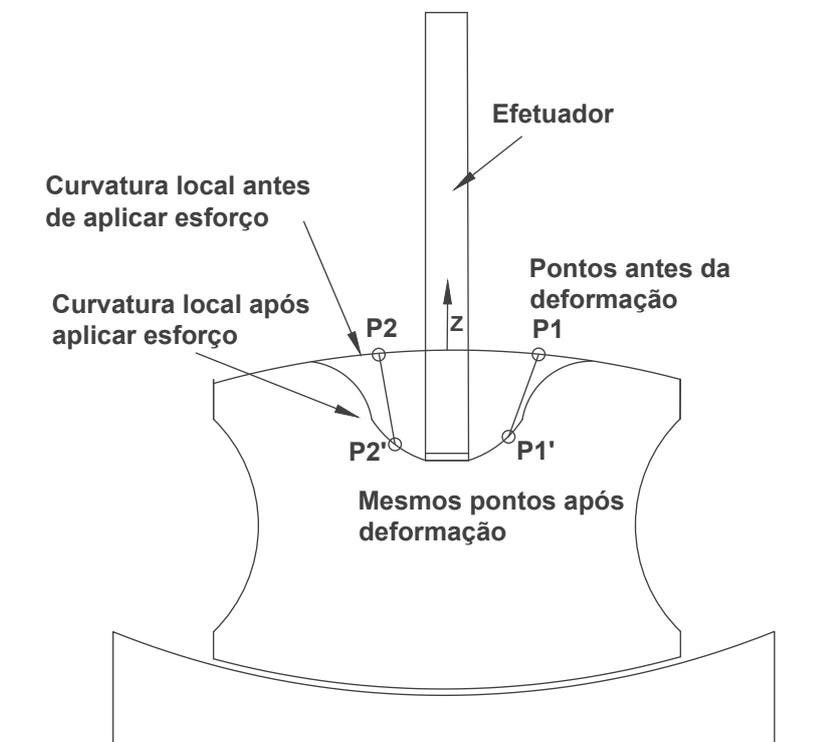


Figura 3.12: MALD-PC - Vista em corte de um objeto antes e após a deformação - Conceito central: Rastreamento de pontos.

O fluxograma (Figura 3.13) apresenta a sequência de passos necessária para o MALD-PC. Os blocos indicados pela cor azul podem ser determinados por instrumentos de medição precisa ou por meio de câmeras. Na abordagem utilizando câmeras, no caso do sensor Kinect 1.0, primeiramente, adquirem-se imagens de intensidade e profundidade antes da deformação. Em seguida, determinam-se os parâmetros intrínsecos e extrínsecos de uma câmera com o *Toolbox* calib no MATLAB® e aplicam-se as transformações rígidas que alteram a origem do sistema de coordenadas da câmera para um outro referencial. A calibração foi realizada da mesma forma que para o MALD-CN, tanto na etapa de ensaios controlados como em testes por robôs. Em seguida, determina-se a curvatura de uma região de um objeto antes da deformação de forma manual ou verificando qual equação de esfera é satisfeita com um menor erro. O raio de cilindro para analisar as curvaturas compreende pontos em uma área circular de raio 40 mm, obtido para espuma rosa. O ponto de origem do sistema de coordenadas corresponde ao ponto central do efetuator no momento do contato com o objeto, antes

da deformação. Quando o sistema atinge o equilíbrio adquire-se outro par de imagens e realiza-se outra transformação rígida com o mesmo objetivo da anterior.

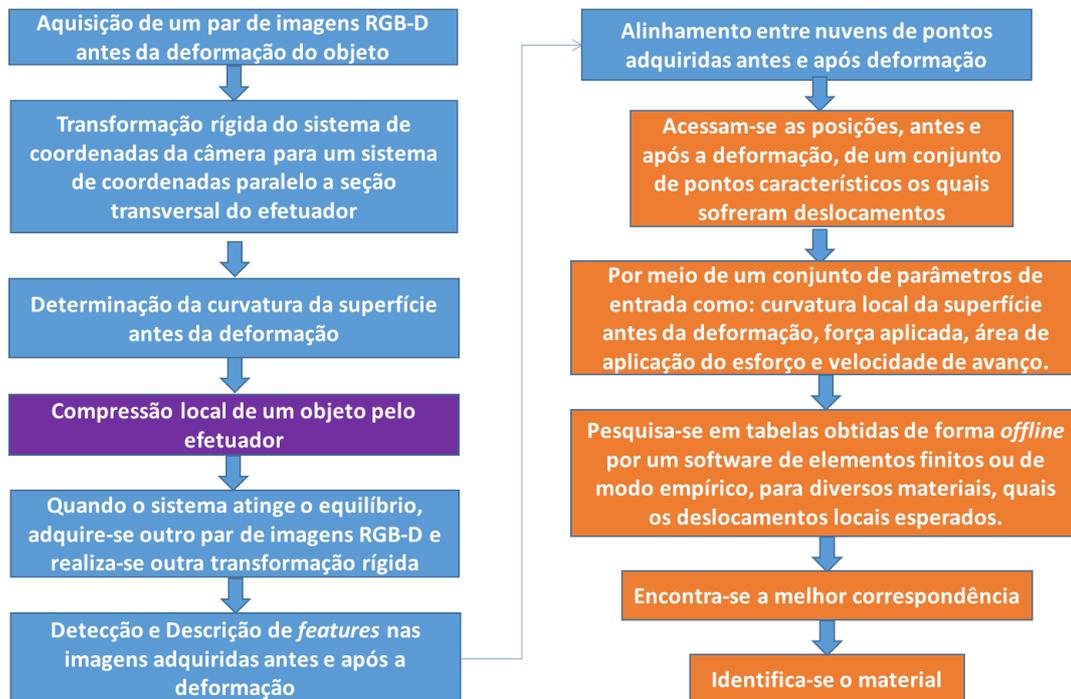


Figura 3.13: MALD-PC - Fluxograma.

A parte do fluxograma (Figura 3.13), marcada em laranja, corresponde aos conceitos principais associados a esse método. Considerando-se os parâmetros de entrada: curvatura local da superfície antes da deformação, força aplicada, área de aplicação, velocidade de avanço e por meio das posições iniciais dos pontos característicos, tenta-se encontrar o centro real do efetuador pesquisando para diferentes materiais, em tabelas obtidas por simulação no ANSYS ou de forma empírica, os deslocamentos para os pontos de coordenadas equivalentes aos pontos característicos em relação a posição corrente do centro do efetuador. Em seguida, comparando os deslocamentos dos pontos característicos detectados e os deslocamentos pesquisados em tabelas, encontra-se a melhor correspondência, ou seja, a posição do centro do efetuador na qual todos os pontos característicos dentro do raio de deformação incerto irão apresentar os deslocamentos tabelados. Caso não seja encontrada uma posição válida, altera-se o material de referência e repete-se o processo. Encontrar a posição para o centro do efetuador, no instante imediatamente anterior ao início da deformação, corresponde a identificar o material.

Testes foram realizados identificando-se, por meio de ensaios controlados, objetos quase-homogêneos e heterogêneos que apresentam como componente principal espumas

e objetos heterogêneos constituídos por espumas, em testes realizados por robôs. No caso de testes com objetos heterogêneos, tratou-se como erros sistemáticos as variações de posições de *keypoints* na direção *Z* em relação a espumas homogêneas.

3.4.5.2 Detalhes de Implementação - Centro Flutuante e Identificação de Não-Espumas

Idealmente a posição do centro do efetuador, no momento imediatamente anterior a deformação, deveria ser $(0, 0, Z)$. Essa posição corresponde a origem do sistema de coordenadas sobre a qual as posições dos pontos característicos são referenciadas. Entretanto, devido a erros no posicionamento do efetuador, essa posição varia ao longo das imagens. Com o objetivo de as coordenadas dos *keypoints* serem obtidas de forma mais corretas, em relação ao centro real do efetuador, o presente trabalho propõe a ideia de **Centro Flutuante** na qual varia-se o centro do efetuador original $(0, 0, Z)$ em torno de um círculo de raio de incerteza (determinado de forma aproximada pela maior distância entre o pixel que deveria ser o centro do efetuador e o centro real aproximado do efetuador, em cada imagem), 16 mm nesse trabalho. Ou seja, varia-se a posição corrente do efetuador no plano *XY* de 0 a 360 graus e para cada grau, varia-se a distância radial de 0 a 16 mm, no presente trabalho. Testam-se os deslocamentos dos pontos característicos e as coordenadas em relação a posição corrente do centro do efetuador até que todos os deslocamentos dos pontos característicos correspondam a valores esperados em relação a uma posição corrente, identificando-se o material. Caso não seja encontrada uma posição para o centro do efetuador, determina-se que um material não pertence a essa categoria. Essa ideia permite identificar materiais pelo MALD-PC mesmo não conhecendo-se à priori a posição exata do centro do efetuador. Tolerâncias tanto radial quanto em termos de profundidade devem ser adotadas, de forma a permitir que as coordenadas dos *keypoints*, obtidas de forma ruidosa, sejam correspondentes com dados tabelados. Adotaram-se 2 mm de tolerância radial e 4 mm para tolerância de profundidade, para mais ou menos em relação aos dados tabelados.

Quando os objetos não são constituídos por espumas, como alguns objetos apresentados na Tabela 5.9, o algoritmo MALD-PC apresenta duas formas de verificar esse fato, o primeiro modo consiste em verificar se algum ponto está fora do raio de deformação incerto e apresenta algum deslocamento na direção *Z* maior que 0 (ou um valor específico de tolerância) (*Núm_PC_Externo* nas Tabelas 5.9 e 5.10). O segundo modo de determinar que um objeto não é constituído por espuma consiste em, caso todos os pontos externos ao raio de deformação incerto apresentem deslocamentos válidos, tentar encontrar o centro do efetuador. Caso o número de pontos característicos, que

apresente deslocamento condizente com sua posição em relação ao centro do efetuador corrente, seja inferior ao número de pontos característicos encontrados na região de deformação (considerando um *threshold* ou não), indica-se na coluna *Núm_PC_Interno* (nas Tabelas 5.9 e 5.10) o número de pontos característicos ajustados no melhor caso, o sinal de menor ou igual, e o número de pontos característicos que deveria ser encontrado. Como consequência, conclui-se que não foi encontrado a posição para o centro do efetuador que adeque todos os pontos característicos na região de deformação incerta em relação ao centro do efetuador.

3.4.5.3 Deslocamentos de referência para MALD-PC

Os deslocamentos de referência foram obtidos tanto em testes reais, aplicando-se 2 kgf em uma área circular de 16 mm e medindo-se os deslocamentos de cinco alfinetes posicionados da mesma forma que na validação da hipótese do trabalho por experimentos reais para diferentes geometrias de espuma rosa, quanto por meio de simulação. Os dados de referência obtidos por experimentos reais correspondem à média entre três medições de deslocamentos na direção Z, para pontos que estão a uma distância radial de 20, 24, 28, 32, 36 e 40 (mm), em relação ao centro do efetuador (0, 0, Z) no plano XY. Já os deslocamentos obtidos por meio da simulação de deformação do cilindro R60 P120 de espuma cinza referem-se aos deslocamentos em X (U_x), Y (U_y) e Z (U_z) para um conjunto de pontos característicos posicionados em coordenadas (0, Y, 120). Para os pontos posicionados sobre essa reta, a distância radial ao ponto (0, 0, 120) corresponde ao mesmo valor que a coordenada Y.

3.4.5.4 Diferenciação de Objetos Heterogêneos

Um objeto de cada vez foi posicionado em frente ao efetuador, tanto em ambiente controlado quanto em frente ao robô o esforço constante de 2 kgf foi aplicado sobre uma área circular de raio 16 mm, em seguida o método MALD-PC foi aplicado para definir se um objeto apresenta espuma em sua composição.

Capítulo 4

Ensaio Laboratoriais

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes aos ensaios laboratoriais, os quais englobam resultados de ensaios de compressão uniaxial e de simulação, e suas respectivas análises. Os ensaios de compressão uniaxial permitiram a verificação das influências das taxas de deformação sobre a deformação local além de fornecerem curvas tensão×deformação necessárias para a etapa de simulação. Nessa etapa, descreveu-se os parâmetros de entrada e analisou-se os efeitos do ajuste de curvas para modelos, do número de pontos e comparou-se modelos de materiais de Ogden-Foam¹ de primeira a terceira ordem e o modelo de Blatz & Ko [1962]. Em seguida, esse capítulo apresenta a validação da hipótese do trabalho por meio de simulação. Por último, os deslocamentos locais de cada uma das espumas rosa D16, cinza D20 e verde D24.6 são apresentados. Esses deslocamentos são armazenados em tabelas e podem ser utilizados como referência para os deslocamentos locais esperados para cada uma das espumas. Comparando-se os deslocamentos obtidos por experimentos reais aos deslocamentos de referência, pelos métodos MALD-PC e MALD-CN, as espumas podem ser identificadas.

4.1 Ensaio de Compressão Uniaxial

Nas próximas subseções, os resultados dos testes para verificação da influência da taxa de deformação sobre a curva tensão×deformação (primeiro teste) e para verificar se amostras de diferentes espessuras apresentam a mesma região de platô (segundo teste) são apresentados e analisados. Da mesma forma, os resultados referentes aos testes para verificação de isotropia da espuma cinza, ajuste de curvas para modelos de materiais, número de pontos e comparação entre modelos de materiais de Ogden-Foam de primeira a terceira ordem e Blatz-Ko.

¹AnsyzMaterial: <http://148.204.81.206/Ansys/150/APDL%20Material%20Reference.pdf>

4.1.1 Ensaio Manual

Inicialmente, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados manualmente (Figura 4.1).



Figura 4.1: Ensaio manual de compressão uniaxial.

Posteriormente, observou-se que a taxa de deformação (s^{-1}) influencia a curva tensão×deformação. Ou seja, era necessário controlar a taxa de deformação que o objeto sofria a cada instante de tempo. Além disso, nos ensaios manuais era difícil controlar a aplicação de esforços de forma uniformemente distribuída o que induzia a resultados incorretos. Como consequência, os dados obtidos seriam bem mais precisos se fossem adquiridos por meio de uma máquina automática de ensaios de compressão uniaxial, uma vez que a taxa de deformação para ser controlada depende do controle de força aplicada e da medição dos deslocamentos de um corpo de prova ao longo do tempo.

4.1.2 Ensaios - Corpos de Prova

Os corpos de prova selecionados para a realização dos dois testes, por meio de ensaios automáticos, são apresentados na Figura 4.2. Os corpos de prova pertencentes ao primeiro teste, verificação da influência da taxa de deformação sobre a curva tensão×deformação, correspondem aos três corpos de prova de mesma espessura para cada uma das espumas rosa, cinza, verde e laranja. Para o segundo teste, verificação de que as amostras de diferentes espessuras apresentam uma mesma região de platô, para

uma mesma taxa de deformação, utilizaram-se as cinco espumas cinza de diferentes espessuras, localizadas na parte superior da imagem.



Figura 4.2: Corpos de prova.

4.1.3 Ensaios - Curvas Tensão×Deformação

Verificação da influência da taxa de deformação sobre a curva Tensão×Deformação

Gráficos comparativos entre as curvas tensão×deformação foram obtidos para as espumas rosa D16, cinza D20, verde D24.4 e laranja D25.6 a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s. Esses gráficos são apresentados nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. As legendas das curvas foram construídas utilizando-se a primeira letra da cor (V, L, C ou R), seguido do número do corpo de prova (1, 2 ou 3) e da taxa de deformação aplicada (0.01/s, 0.03/s ou 0.083/s).

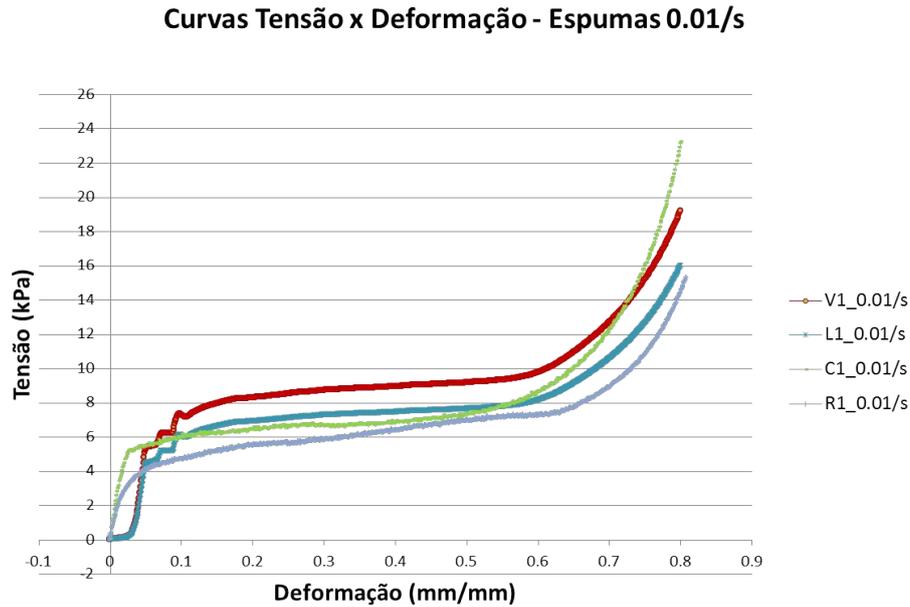


Figura 4.3: Todas espumas - Curvas tensão×deformação, ensaios de compressão uniaxial a 0.01/s.

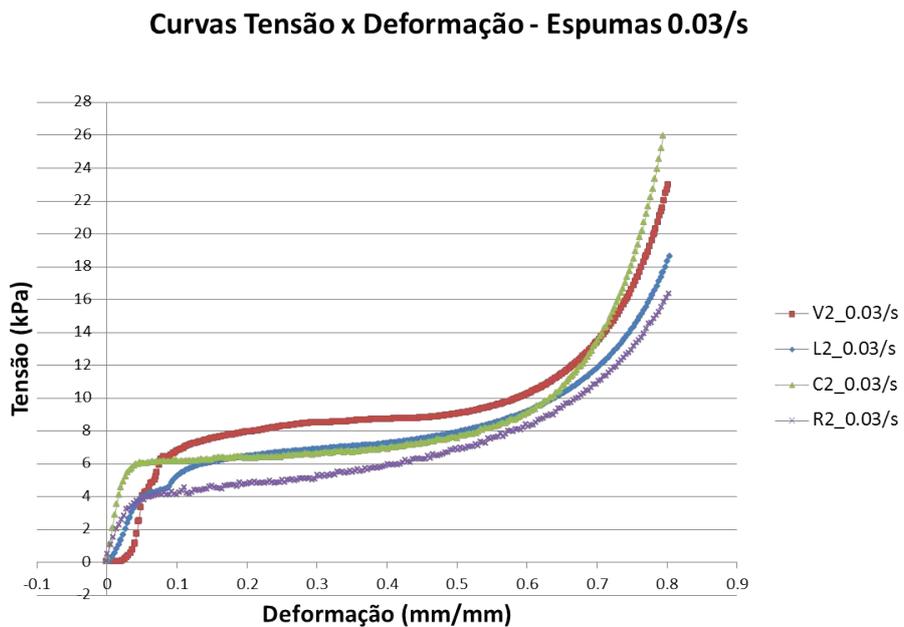


Figura 4.4: Todas espumas - Curvas tensão×deformação, ensaios de compressão uniaxial a 0.03/s.

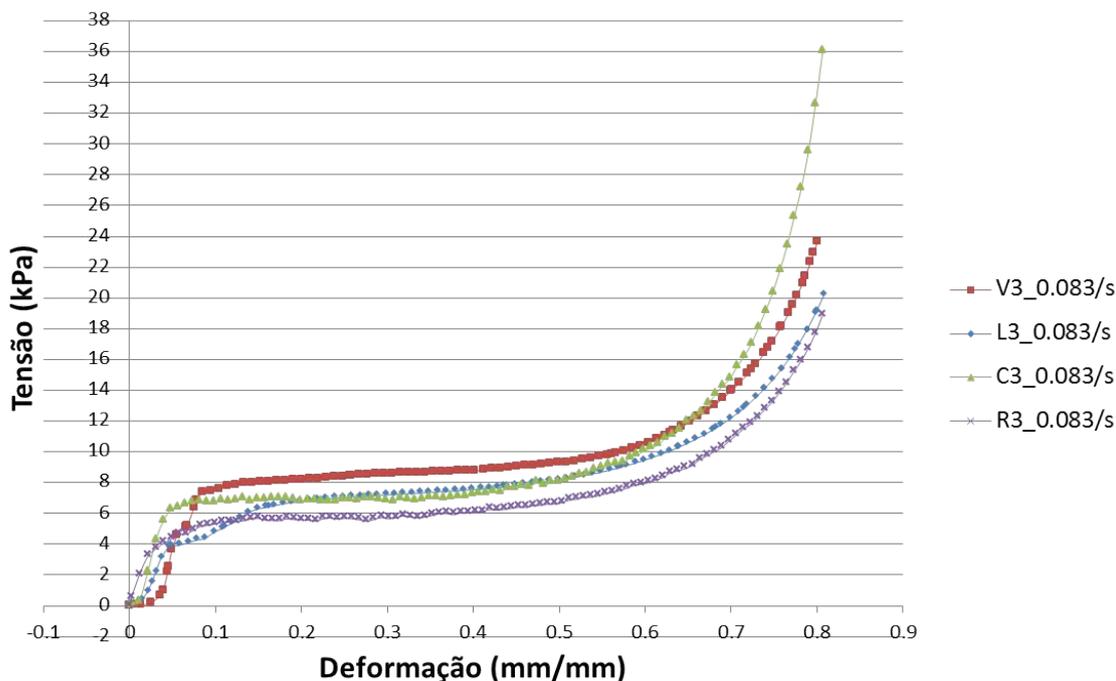
Curvas Tensão x Deformação - Espumas 0.083/s

Figura 4.5: Todas espumas - Curvas tensão×deformação, ensaios de compressão uniaxial a 0.083/s.

Analisando as Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, pode-se observar que para as três taxas de deformação, a curva tensão×deformação da espuma rosa, espuma de menor densidade, é dominada pelas curvas referentes às espumas de maior densidade, considerando a mesma taxa de deformação. Além disso, verifica-se nos gráficos, que a curva referente a espuma verde domina as outras curvas até aproximadamente 60% a 70% de deformação, quando a curva referente a espuma cinza supera a espuma verde. Isso demonstra que a espuma cinza se torna a espuma mais difícil de ser deformada, a que necessita de maior esforço, a partir desse valor de deformação. Outra observação importante é que as curvas tensão×deformação de espumas de maior densidade, não necessariamente dominam as curvas de espumas de densidade inferior, ao contrário do que é aparentado pelos resultados obtidos por Alzoubi et al. [2011].

As Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 apresentam as curvas tensão×deformação de cada uma das espumas a taxas de deformação diferentes.

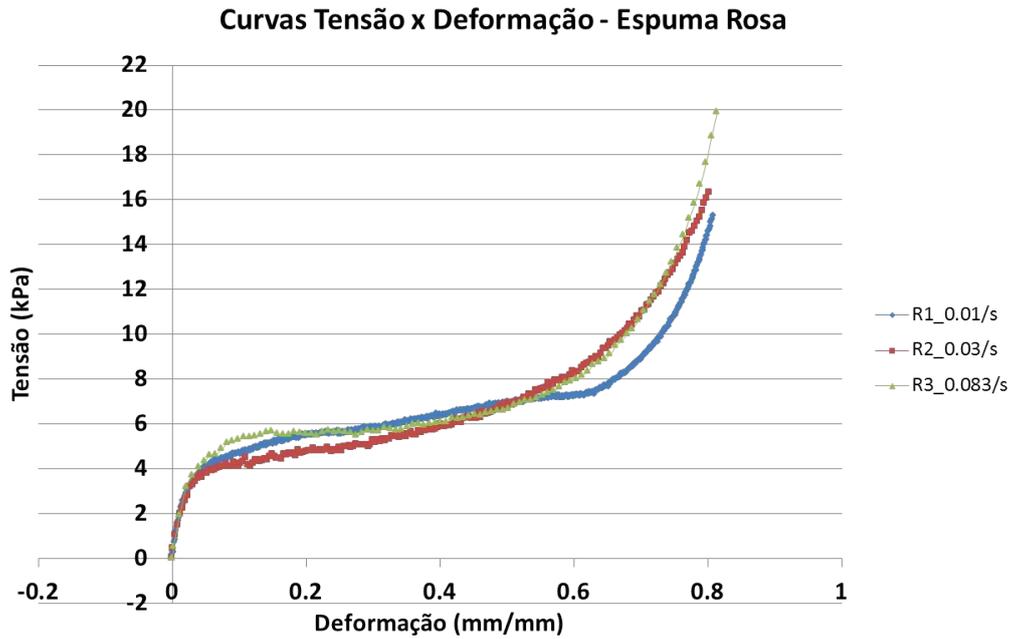


Figura 4.6: Espuma Rosa - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.

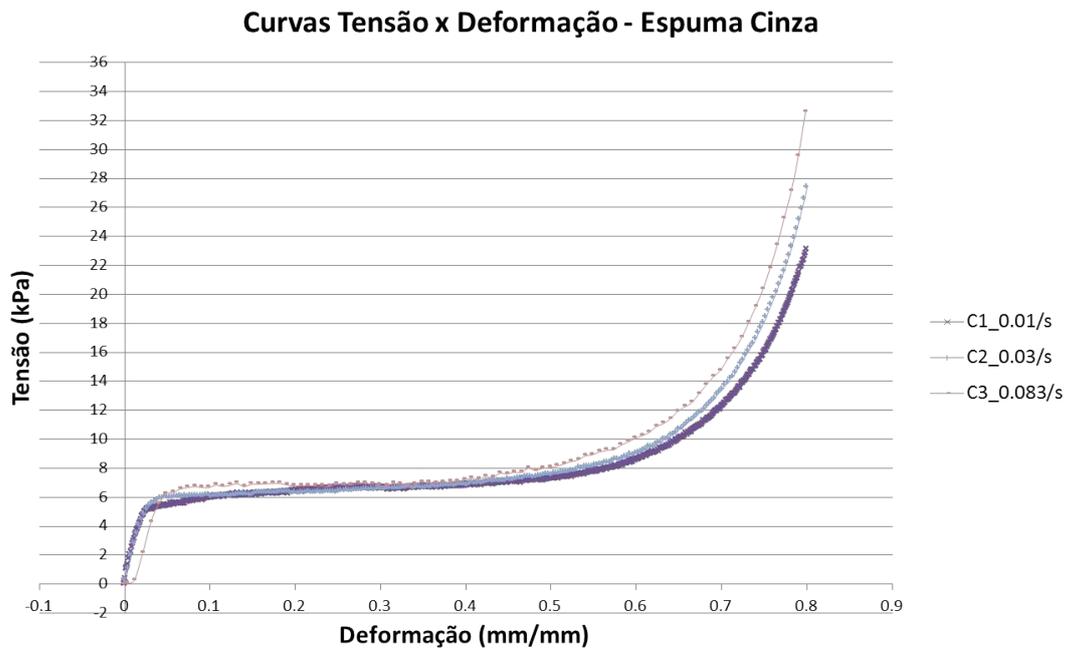


Figura 4.7: Espuma Cinza - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.

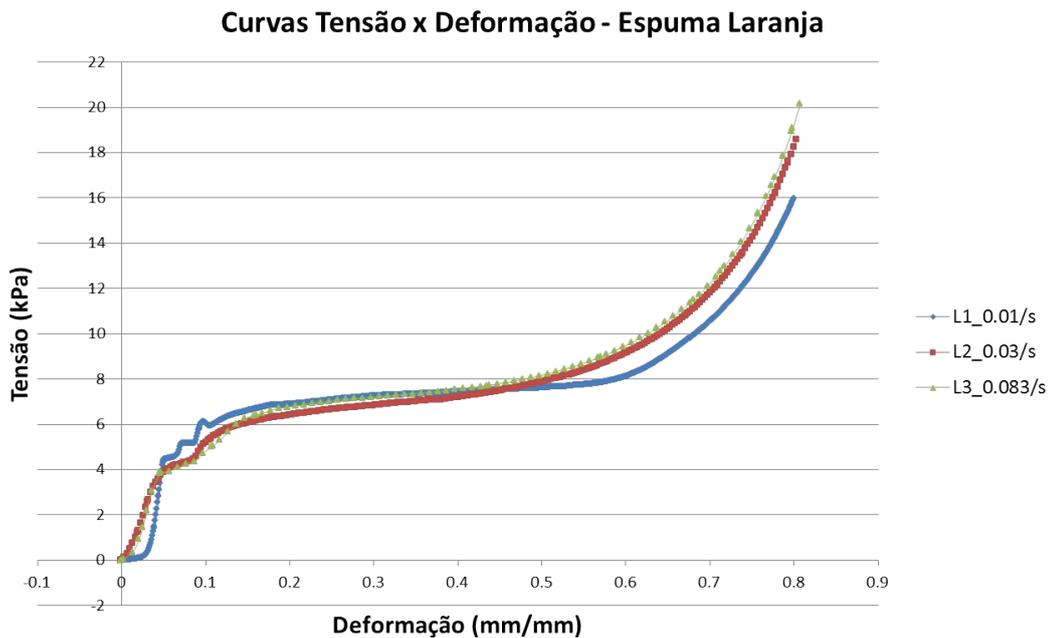


Figura 4.8: Espuma Laranja - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.

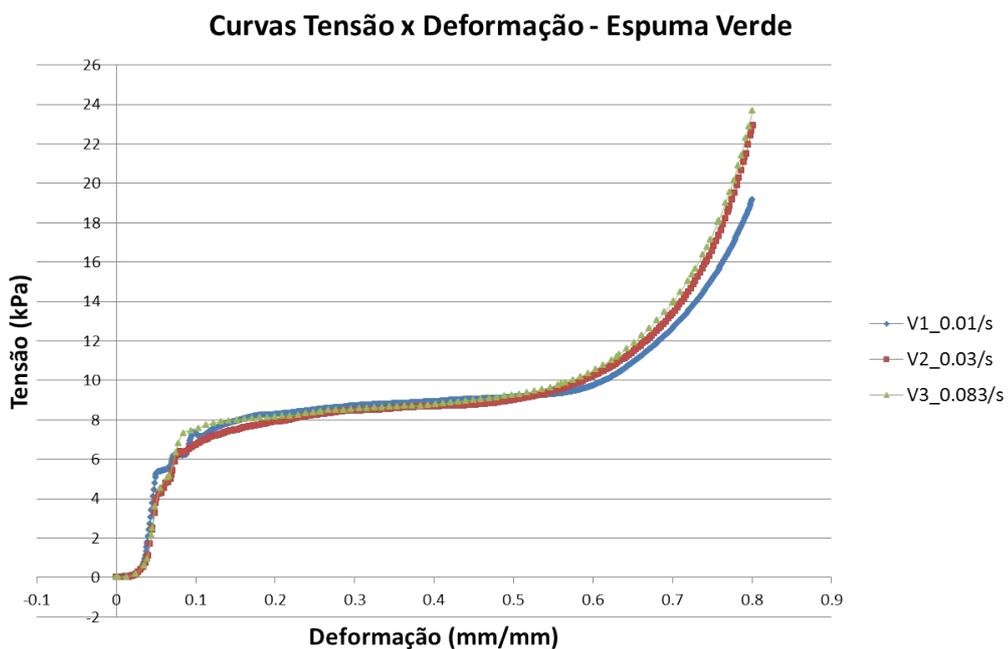


Figura 4.9: Espuma Verde - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação de 0.01/s, 0.03/s e 0.083/s.

No trabalho de Alzoubi et al. [2011], espumas de poliuretano com densidade superior a D78, D98 e D131 foram comparadas em termos de propriedades mecânicas.

Demonstrou-se que a curva da espuma de poliuretano D98 dominava para quase todas as taxas de deformação a curva associada a espuma D78, da mesma forma a espuma D131 dominava as outras duas curvas no ciclo de carregamento. De forma distinta, para as espumas de menor densidade adotadas nesse trabalho (até D25.6), pode-se observar nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 que as curvas tensão×deformação para taxas de deformação mais altas não dominam as curvas a taxas de deformação mais lentas para todos valores de taxa de deformação. Ou seja, para espumas de maior densidade, a taxa de deslocamento é um fator muito importante, devendo ser controlada na identificação de materiais (por exemplo, adotando-se sempre o avanço mais lento). Entretanto, para espumas de menor densidade, as curvas podem se tornar quase equivalentes, como para as espumas rosa, cinza, verde e laranja, sendo um indicativo de que não deverá ser necessário um controle da velocidade de deslocamento para a diferenciação das espumas. Além disso, observa-se que para espumas com grandes diferenças de densidade, as curvas tensão deformação são facilmente diferenciadas, de forma oposta a espumas com densidades próximas.

Todas as curvas tensão×deformação são apresentadas na Figura 4.10. Por meio dessa imagem, pode-se verificar que há trechos do gráfico no qual há uma diferenciação mais nítida entre os diferentes materiais como entre 10% e 60% no qual as três curvas inferiores referem-se a espuma rosa D16, as três superiores a espuma verde D24.6 e as seis curvas do meio são de difíceis distinção porém pertencem às espumas laranja e cinza. Outro fato que pode ser verificado é que para carregamentos maiores, as curvas laranja e cinza são diferenciados devido a dominância da curva cinza em relação à todas outras curvas. Ou seja, para a diferenciação de espumas de densidades próximas, pode-se aplicar um valor de carga sobre todas espumas e ir aumentando gradativamente de forma a diferenciá-las.

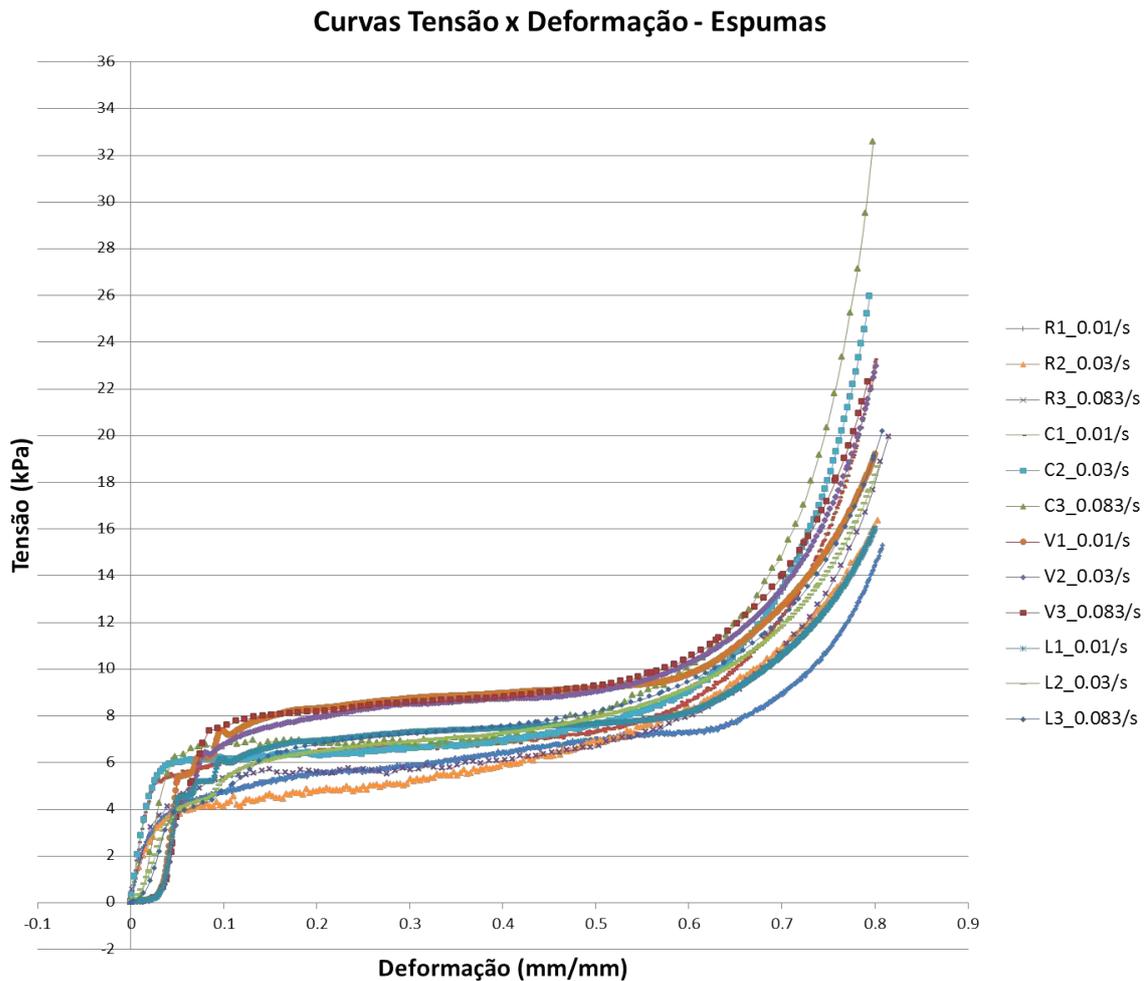


Figura 4.10: Todas Espumas - Curvas tensão×deformação obtidas a taxas de deformação distintas.

Influência da Espessura Sobre Região de Platô a uma Mesma Taxa de Deformação

As curvas tensão×deformação referentes às cinco espumas cinza com diferentes espessuras são apresentadas na Figura 4.11. Observando a Figura 4.11, confirma-se uma das conclusões do trabalho de Dupuis & Aubry [2008], corpos de prova de mesmo tipo de espuma mas com diferentes espessuras, se submetidos a uma mesma taxa de deformação, geram curvas tensão×deformação com aproximadamente o mesmo valor de platô (região paralela ao eixo horizontal), 6 a 7 kPa nesse trabalho, a partir de certas espessuras de corpo de prova (40 mm para espuma cinza D20).

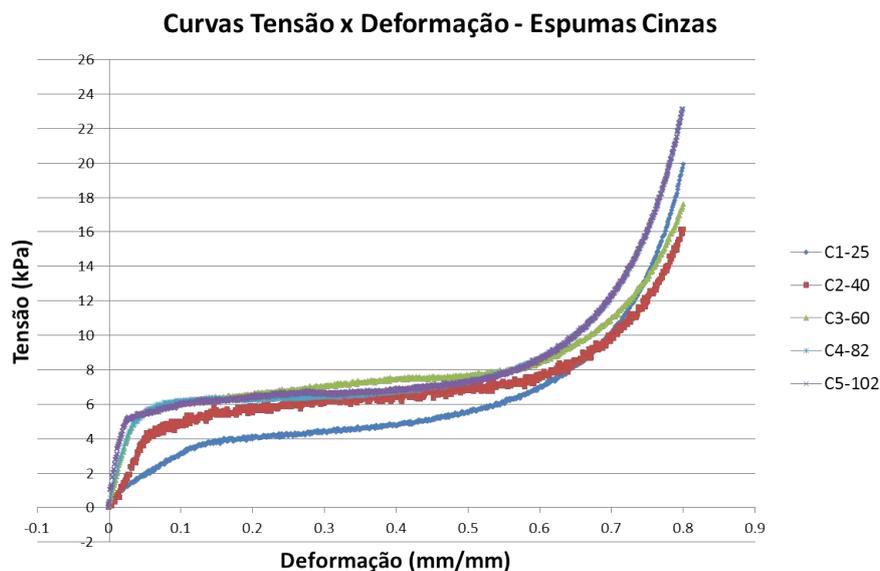


Figura 4.11: Espumas Cinzas - Diferentes espessuras - Curvas tensão×deformação obtidas a taxa de deformação 0.01/s.

Na Figura 4.12, as curvas tensão×deformação referentes a um teste para verificação de isotropia da espuma cinza é apresentado.

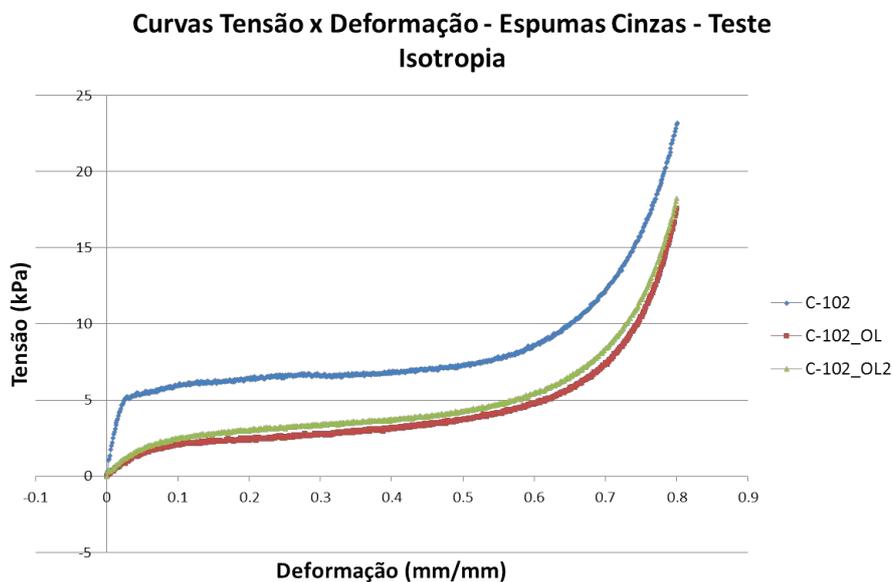


Figura 4.12: Espuma Cinza - Teste de isotropia - Compressão de três faces distintas C-102, OL e OL2.

Como a curva tensão×deformação do lado superior C-102 é diferente das curvas de OL e OL2, verifica-se que a espuma cinza apresenta anisotropia. Isso implica que dependendo da face a aplicar o esforço, para uma mesma área, essa face pode apresentar

deformação diferente de outra face se um mesmo esforço fosse aplicado. Dependendo da identificação de materiais a ser realizada, pode ser necessário levantar as propriedades de vários lados e modelar a variação de curvas tensão×deformação, conforme a direção de corte de um material.

4.2 Simulação

Curvaturas de Superfície

Diferentes Curvaturas para Objetos

Diferentes curvaturas locais de superfície são apresentadas na Figura 4.13. Essa figura apresenta o ângulo, que a curvatura representa em relação ao círculo de raio r que deu origem a superfície, e a altura k entre uma face do cilindro e o ponto mais distante de uma curvatura positiva ou negativa.

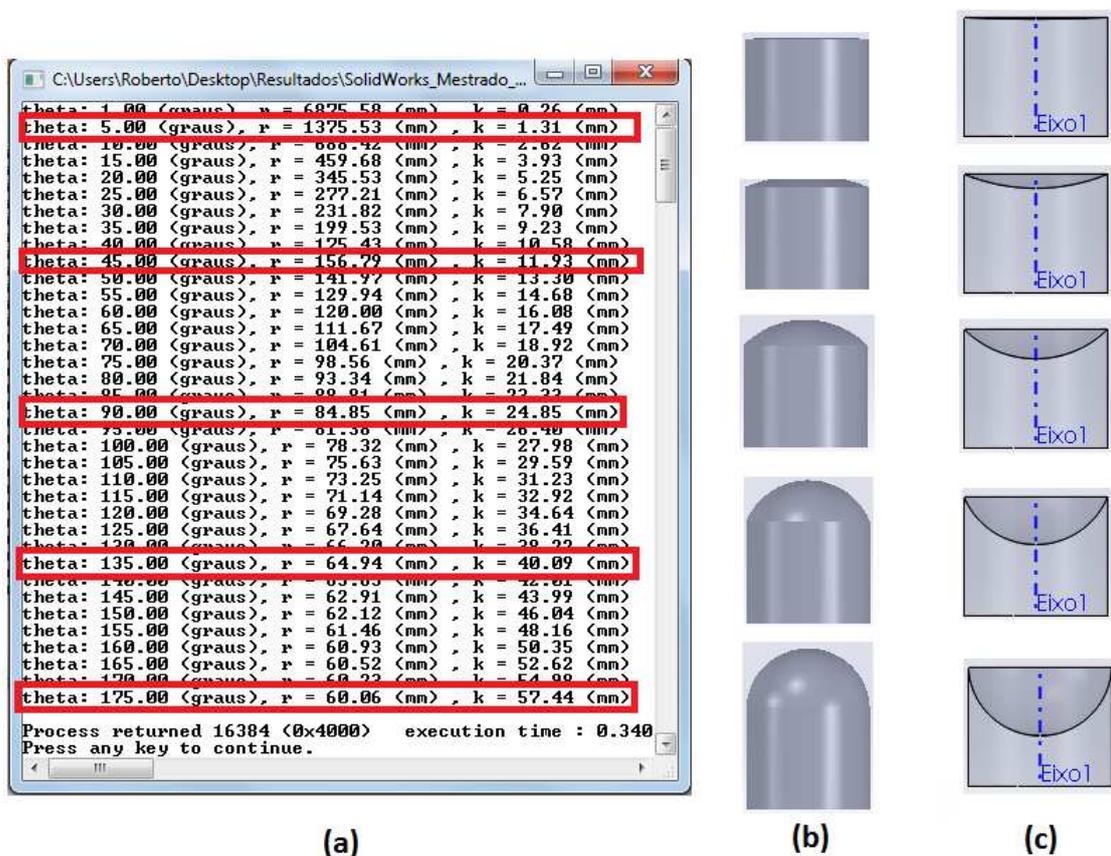


Figura 4.13: Curvaturas de superfície sobre um cilindro de diâmetro 120 mm - (a) Valores de θ , r e k para diferentes curvaturas de superfície. (b) Superfície local com curvaturas positivas. (c) Superfície local com curvaturas negativas.

Um exemplo de curvatura de superfície positiva e negativa para k igual a 57.44 mm é apresentado na Figura 4.14.

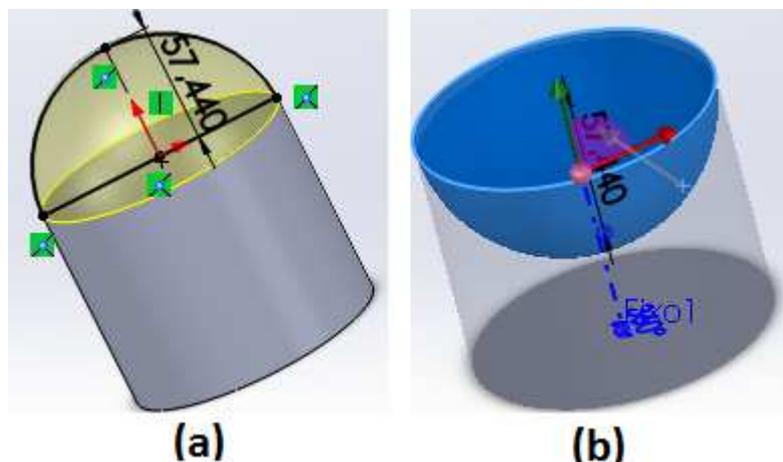


Figura 4.14: Curvaturas de superfície - Exemplo para k igual a 57.44 mm - (a) Curvatura positiva. (b) Curvatura negativa.

Seleção do Elemento

Neste trabalho, escolheu-se o elemento *SOLID187* por ser um elemento 3D de ordem maior, permitindo a simulação de hiperelasticidade e grandes capacidades de deflexão e deformação.²

Ensaio de Compressão Uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial permitem a obtenção de curvas tensão×deformação. Essas curvas são utilizadas pelo *software* de elementos finitos para a determinação da deformação de cada um de seus elementos, conforme a força aplicada.

Seleção do Modelo do Material

Para as espumas rosa e verde, utilizou-se o modelo de Ogden-Foam de segunda ordem. Para a espuma cinza, utilizou-se o modelo de Ogden-Foam de terceira ordem. Na subseção 4.2.3, será justificada a escolha pela utilização desses modelos para cada material.

²ANSYS APDL: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Mechanical%20APDL%20Element%20Reference.pdf>

Criação de Malhas

As malhas foram criadas com o elemento *SOLID187* de modo automático e apresentaram grau de refinamento 3.

Condições de Contorno

Os modelos dos objetos apresentaram restrição de movimento na direção vertical. Além disso, foi aplicada uma pressão sobre os nós que estão em uma área circular de raio 16 mm. Supondo que um plano é posicionado na direção perpendicular ao eixo Z, os nós que receberam esforços correspondem a pontos que quando projetados por uma projeção ortogonal sobre o plano XY estarão no interior de um círculo de raio 16 mm, para qualquer curvatura. Aplicou-se uma pressão equivalente a 2 kgf sobre a área circular de raio 16 mm. Selecionou-se o tipo de resolução para grandes deformações de forma estática.

4.2.1 Ajuste de Modelos de Materiais

O efeito da ativação da ferramenta de normalização de erro no ANSYS é apresentado na Figura 4.15.

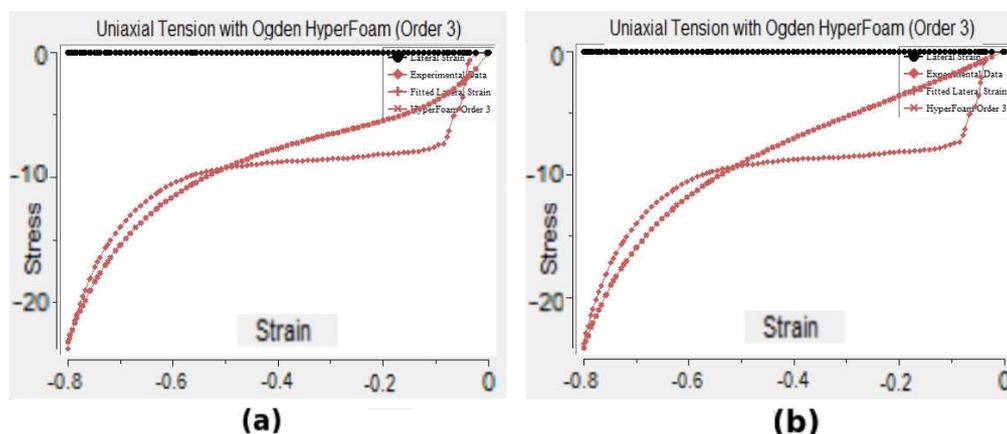


Figura 4.15: Ajuste de curva para curva tensão-deformação da espuma verde - 0.083/s - (a) Sem erro normalizado. (b) Com erro normalizado.

Na Figura 4.15, as curvas que apresentam uma região paralela ao eixo horizontal, eixo da deformação, correspondem a curva experimental obtida para a espuma verde com taxa de deformação 0.083/s. A outra curva corresponde a curva ajustada. Pode-se verificar que a curva com erro não normalizado é mais próxima da curva experimental para o começo da curva, gerando melhores resultados quando as tensões sobre os diversos nós de um material estiverem sobre essa faixa.

4.2.2 Número de Pontos

A influência do número de pontos no ajuste de curva é demonstrada na Figura 4.16. Pode-se verificar que as curvas ajustadas por meio do modelo de Ogden-Foam de ter-

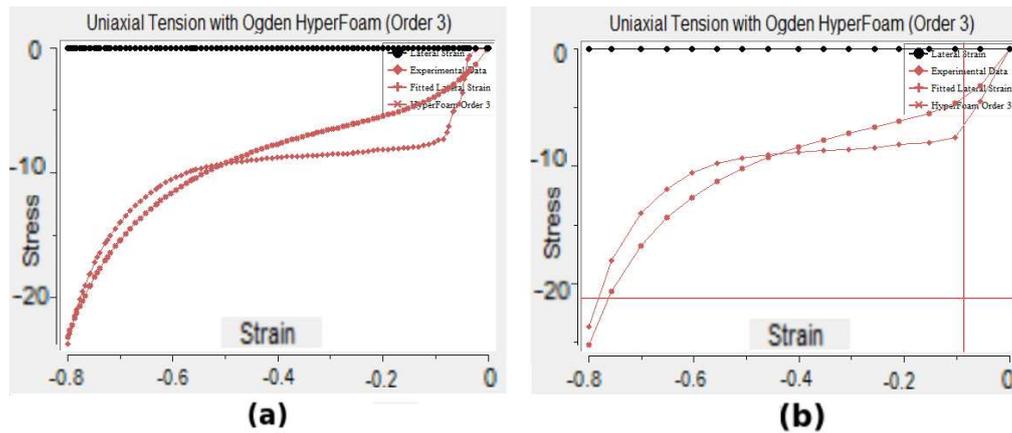


Figura 4.16: Influência do maior número de pontos no ajuste de curva - Espuma Verde - 0.083/s - (a) Mais Pontos. (b) Menos Pontos.

ceira ordem são as mesmas para um número maior e menor de pontos. Ou seja, pode-se ajustar os modelos de Ogden-Foam com menos pontos, para reduzir o tempo de processamento no ajuste de modelos.

4.2.3 Melhores Modelos

A Figura 4.17 apresenta os modelos de Blatz-Ko para espumas rosa, cinza e verde. Analisando-se a Figura 4.17, pode-se verificar que o modelo de Blatz-Ko apresenta um ajuste de curva ruim (mais de 10 kPa de erro) para as três espumas, não sendo recomendado para o presente trabalho.

Uma comparação entre os modelos de Ogden-Foam de primeira a terceira ordem para a espuma rosa é apresentada na Figura 4.18.

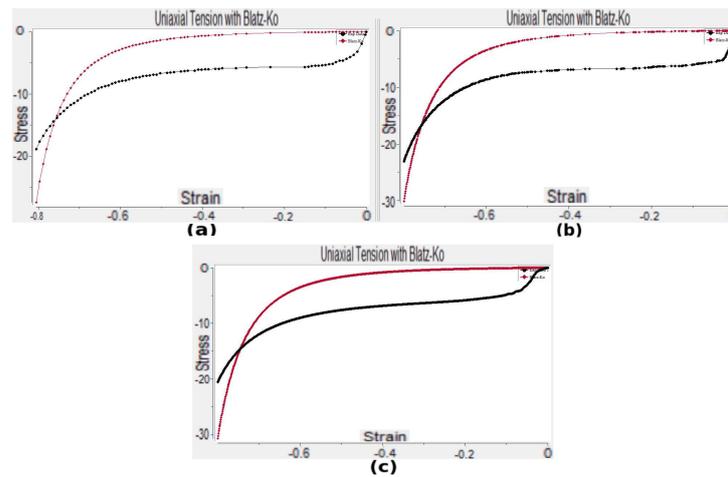


Figura 4.17: Modelos de Blatz-Ko ajustados (cor vermelha) a dados experimentais (cor preta) - 0.01/s - Sem erro normalizado - (a) Espuma Rosa. (b) Espuma Cinza. (c) Espuma Verde.

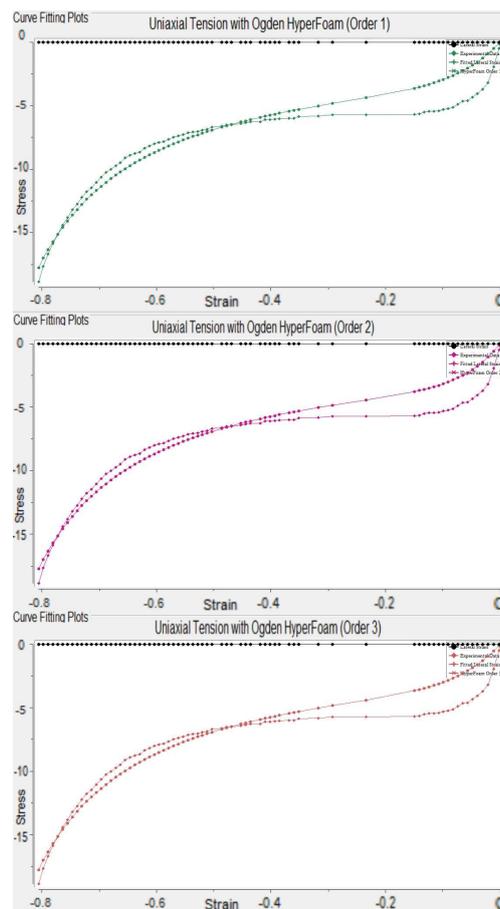


Figura 4.18: Modelos de Ogden-Foam de primeira (curvas verdes), segunda (curvas roxas, intermediárias) e terceira ordem (curvas vermelhas) ajustados para Espuma Rosa - 0.083/s - Sem erro normalizado.

Por meio da Figura 4.18, constata-se que os modelos de Ogden-Foam de primeira a terceira ordem resultam em ajustes de curvas semelhantes para as curvas tensão×deformação do presente trabalho. Entretanto, ao realizar os experimentos, as simulações e alguns experimentos reais, verificou-se que o modelo de Ogden-Foam de segunda ordem trouxe resultados melhores para a simulação, para as espumas rosa e verde, enquanto que o modelo de Ogden-Foam de terceira ordem apresentou melhor ajuste para a espuma cinza.

4.3 Simulação - Validação da Hipótese do Trabalho

4.3.1 Determinação dos Valores Mínimos de Raio do Cilindro e Espessura

Para verificar os valores mínimos de raio do cilindro e espessura, realizaram-se testes com a espuma de menor densidade, rosa D16. Isso porque, conforme observado nas curvas tensão×deformação, a espuma rosa apresenta a maior deformação entre as espumas utilizadas dado uma mesma carga aplicada e uma mesma área de aplicação de esforços. Em cada uma das espumas, simulou-se a aplicação de 2 kgf em uma área circular de raio 15 mm e considerou-se que a face oposta a aplicação do esforço apresenta restrição de movimentos na direção Z (para uma base plana).

Valor Mínimo Para o Raio do Cilindro

Obteve-se um raio mínimo de 60 mm para o cilindro. Esse raio mínimo pode ser observado comparando-se as Figuras 4.19 e 4.21 (b) no qual as bordas do objeto na primeira figura sofrem deslocamentos na direção Z e na segunda não.

Valor Mínimo Para a Espessura do Cilindro

O valor mínimo de espessura foi avaliado, verificando a partir de qual valor de espessura a deformação local não era alterada. Realizaram-se testes para espumas de até 40 mm de espessura e os deslocamentos locais não foram alterados. Conforme apresentado na Figura 4.20, os deslocamentos locais foram os mesmos para espessuras de 40 mm e 60 mm, sendo que o deslocamento máximo foi de aproximadamente 27 mm. Como consequência, para o presente trabalho, considerou-se que os objetos constituídos por espumas apresentam no mínimo 40 mm de espessura na região de raio maciço mínimo. Em outras palavras, para que a deformação local de um objeto, cujo material é espuma, seja constante entre diferentes geometrias globais, para o esforço e área de aplicação

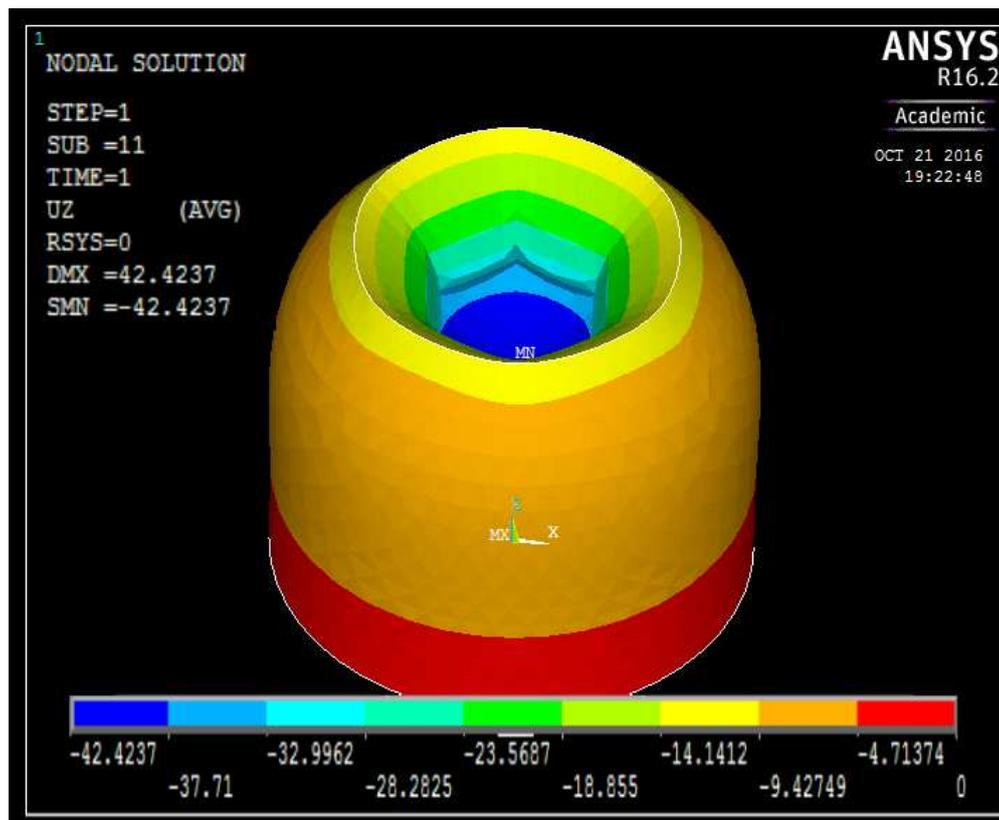


Figura 4.19: Valor mínimo para o Raio do Cilindro - Deslocamentos locais da espuma rosa na direção Z.

especificados, a espessura deve ser no mínimo 40 mm no círculo definido pelo raio do cilindro. Como resultado, nos próximos testes, a espuma laranja de densidade D25.6 e espessura 20 mm não será mais utilizada.

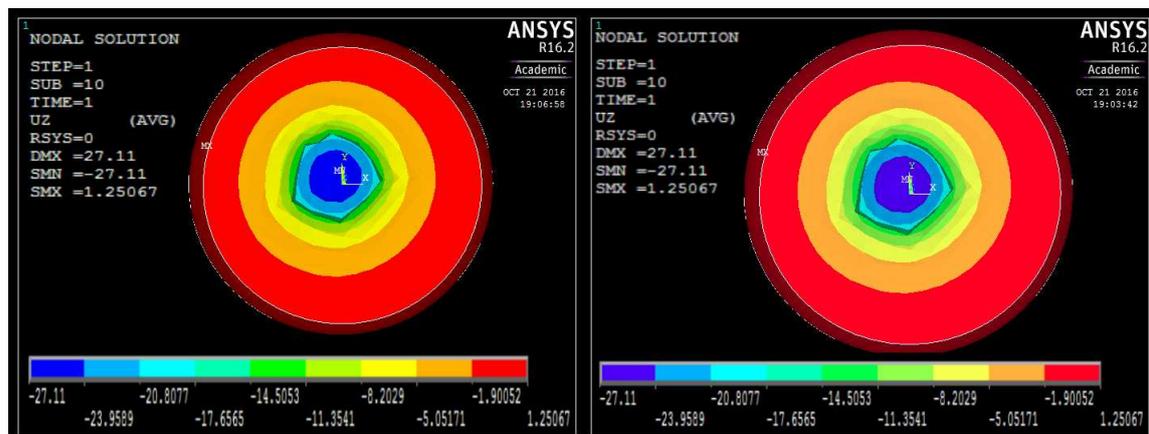


Figura 4.20: Limite de espessura - Deslocamentos locais da espuma rosa na direção Z - (a) Raio 60 Profundidade 40 (mm). (b) Raio 60 Profundidade 60 (mm).

4.3.2 Deslocamentos Locais

Por meio de simulação, a validação da hipótese do trabalho será verificada a partir da utilização de espumas que necessitam de maiores valores de tensão (espuma cinza) e menores valores de tensão (espuma rosa) para sofrer grandes deformações. Considerou-se o lado de um hexágono ou de um tronco de pirâmide indicados por L , o raio de um cilindro indicado por R e a altura indicada por P acompanhados por um número que indica o módulo da medida em milímetros.

Observa-se, nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, os deslocamentos locais de espumas rosas com diferentes geometrias, nas direções Z , X e Y respectivamente. Pode-se observar geometrias prismáticas de formato hexagonal $L70 P140$, cilíndricas $R60 P120$, $R80 P80$, $R250 P500$ e trapezoidal $L180 L80 P100$. Da mesma forma, as Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam as deformações locais obtidas para a espuma cinza.

Por meio das Figuras 4.21, 4.22 e 4.23, para a espuma rosa, e 4.24, 4.25 e 4.26, para a espuma cinza, pode-se verificar que a deformação local apresentou valores muito próximos para as diferentes geometrias globais. As pequenas variações acontecem devido aos problemas de refinamento da malha. Por exemplo, as maiores diferenças ocorrem para o cilindro de raio 250 mm e profundidade 500 mm no qual a região de aplicação de pressão é definida por poucos elementos na malha. De forma geral, pode-se concluir que a deformação local para objetos homogêneos é um parâmetro constante para um valor de carregamento e área de aplicação do esforço, desde que os valores mínimos de espessura e raio do cilindro sejam localmente respeitados em um objeto.

Antecipadamente esperava-se que a hipótese do trabalho fosse validada principalmente pelo fato de os métodos de análise de dureza identificarem os materiais por uma análise local da deformação de um objeto. Ou seja, se esse conceito não fosse verdadeiro, os ensaios de dureza não poderiam ser utilizados para a identificação de materiais assim como os métodos propostos pelo presente trabalho. Entretanto tanto os métodos de medição de dureza quanto os métodos propostos pelo presente trabalho, conforme será demonstrado no Capítulo 5, permitem a identificação de materiais.

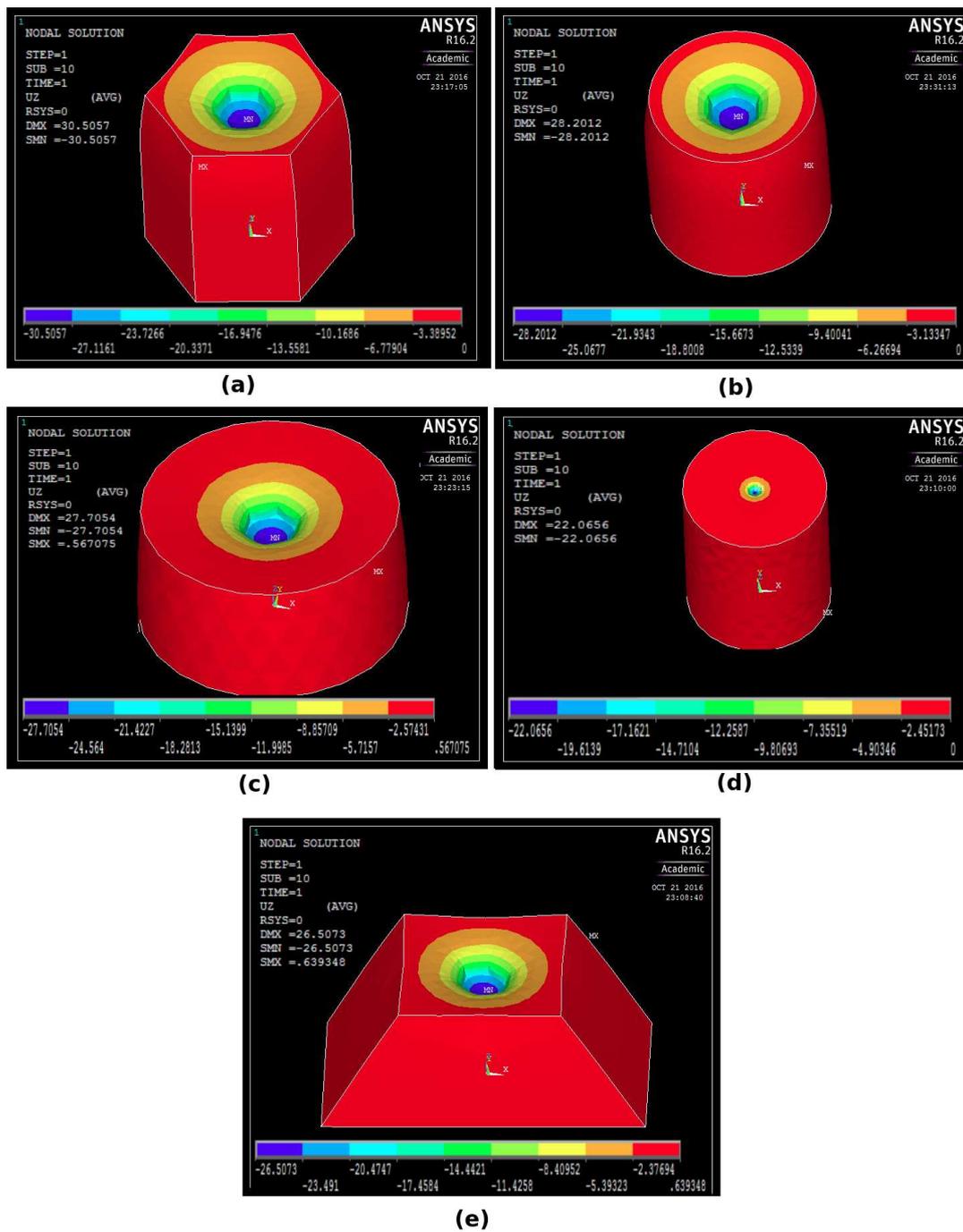


Figura 4.21: Espuma Rosa - Deslocamentos na vertical (Eixo Z) (mm) - (a) Hexágono L180 L80 P100. (b) Cilindro R60 P120. (c) Cilindro R80 P80. (d) Cilindro R250 P500. (e) Tronco de Pirâmide L180 L80 P100.

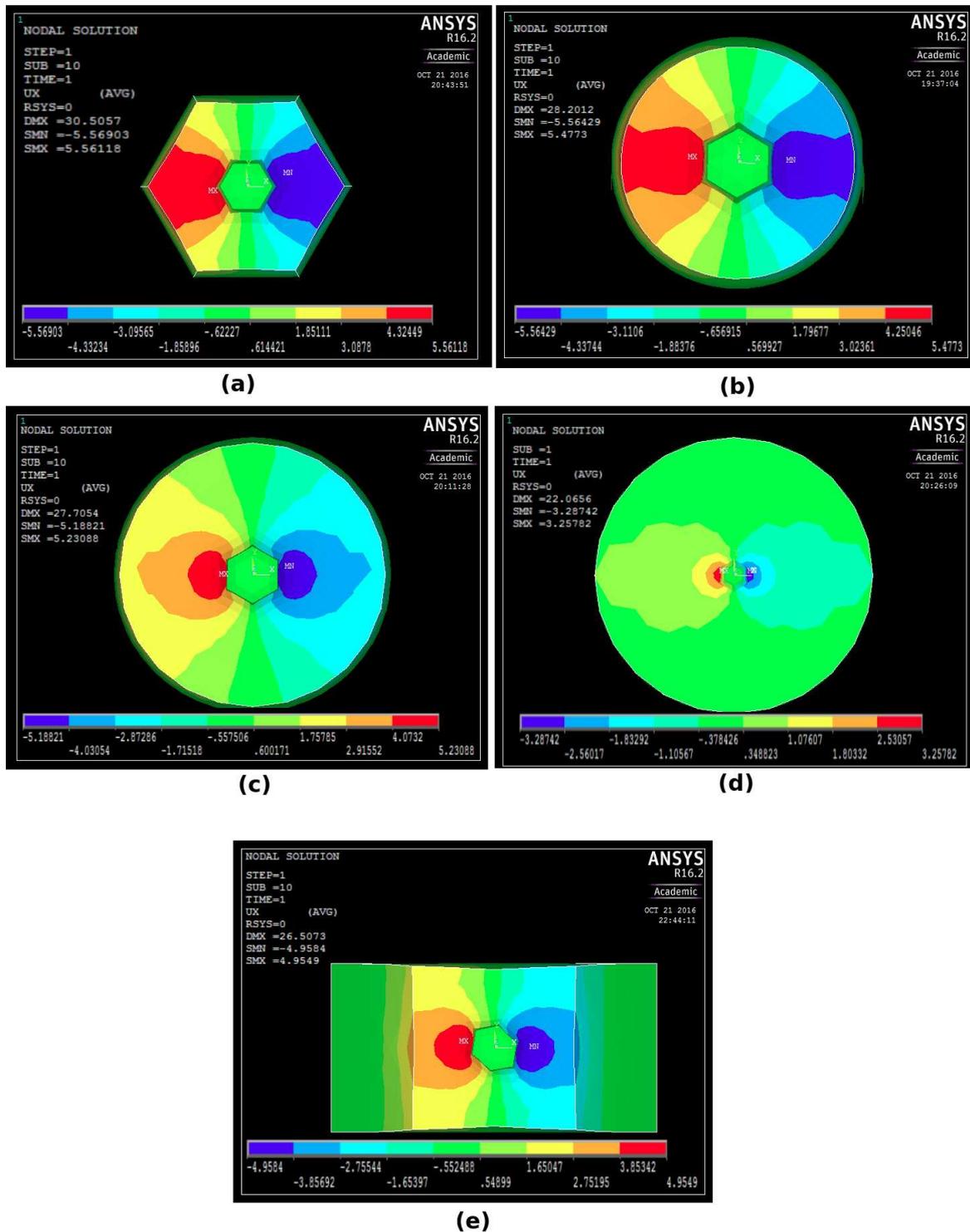


Figura 4.22: Espuma Rosa - Deslocamentos na direção X (mm) - (a) Hexágono L180 L80 P100. (b) Cilindro R60 P120. (c) Cilindro R80 P80. (d) Cilindro R250 P500. (e) Tronco de Pirâmide L180 L80 P100.

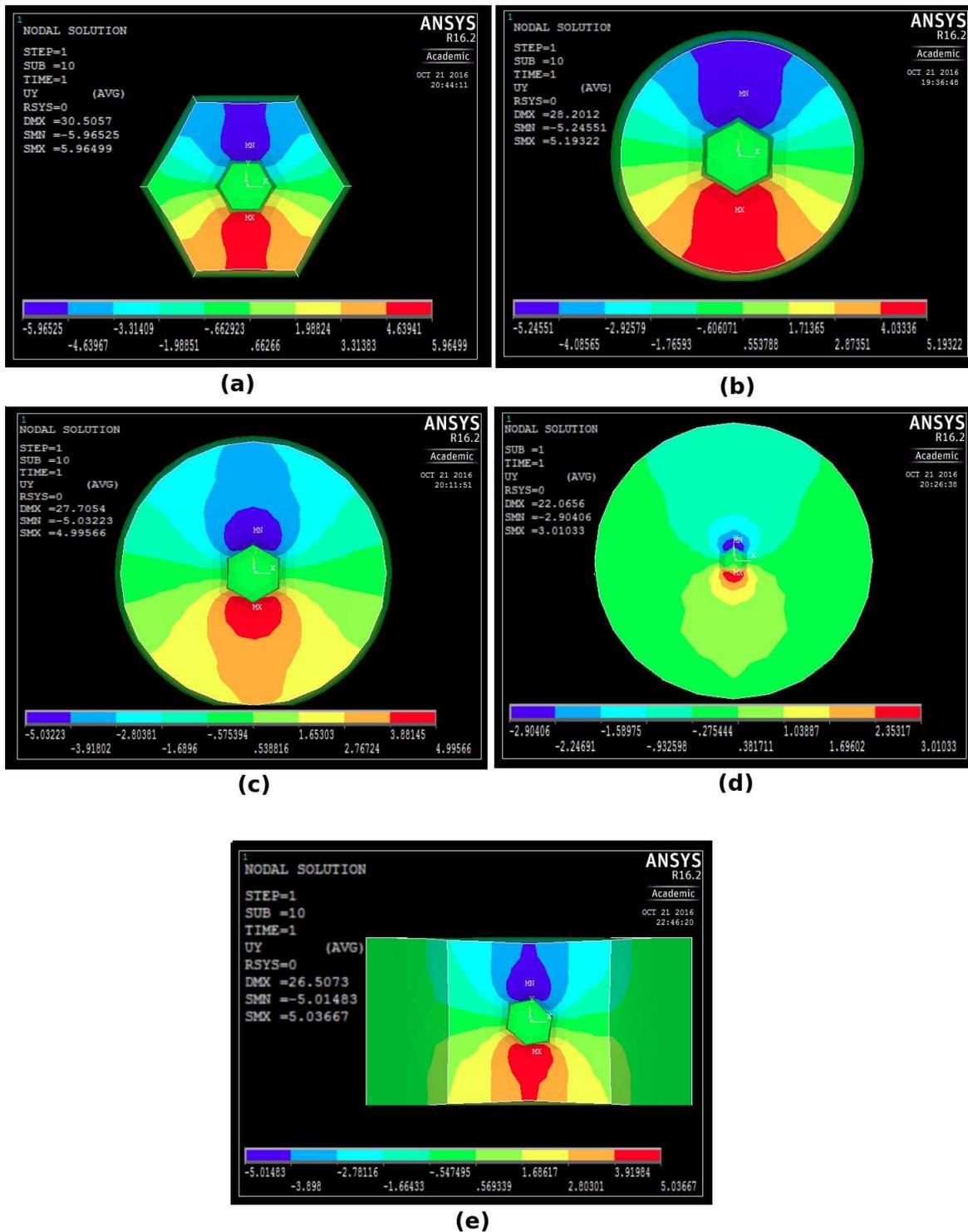


Figura 4.23: Espuma Rosa - Deslocamentos na direção Y (mm) - (a) Hexágono L180 L80 P100. (b) Cilindro R60 P120. (c) Cilindro R80 P80. (d) Cilindro R250 P500. (e) Tronco de Pirâmide L180 L80 P100.

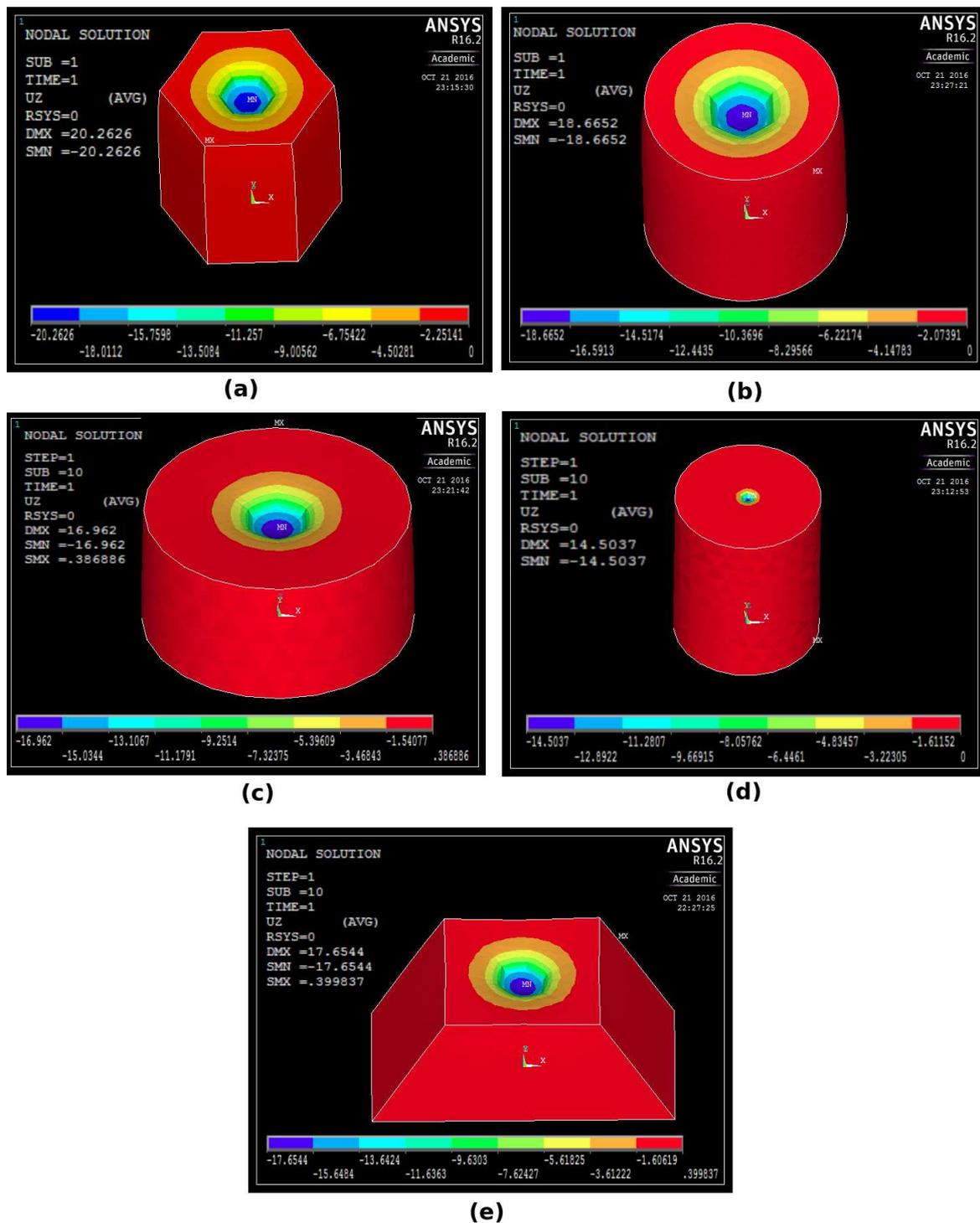


Figura 4.24: Espuma Cinza - Deslocamentos na vertical (Eixo Z) (mm) - (a) Hexágono L180 L80 P100. (b) Cilindro R60 P120. (c) Cilindro R80 P80. (d) Cilindro R250 P500. (e) Tronco de Pirâmide L180 L80 P100.

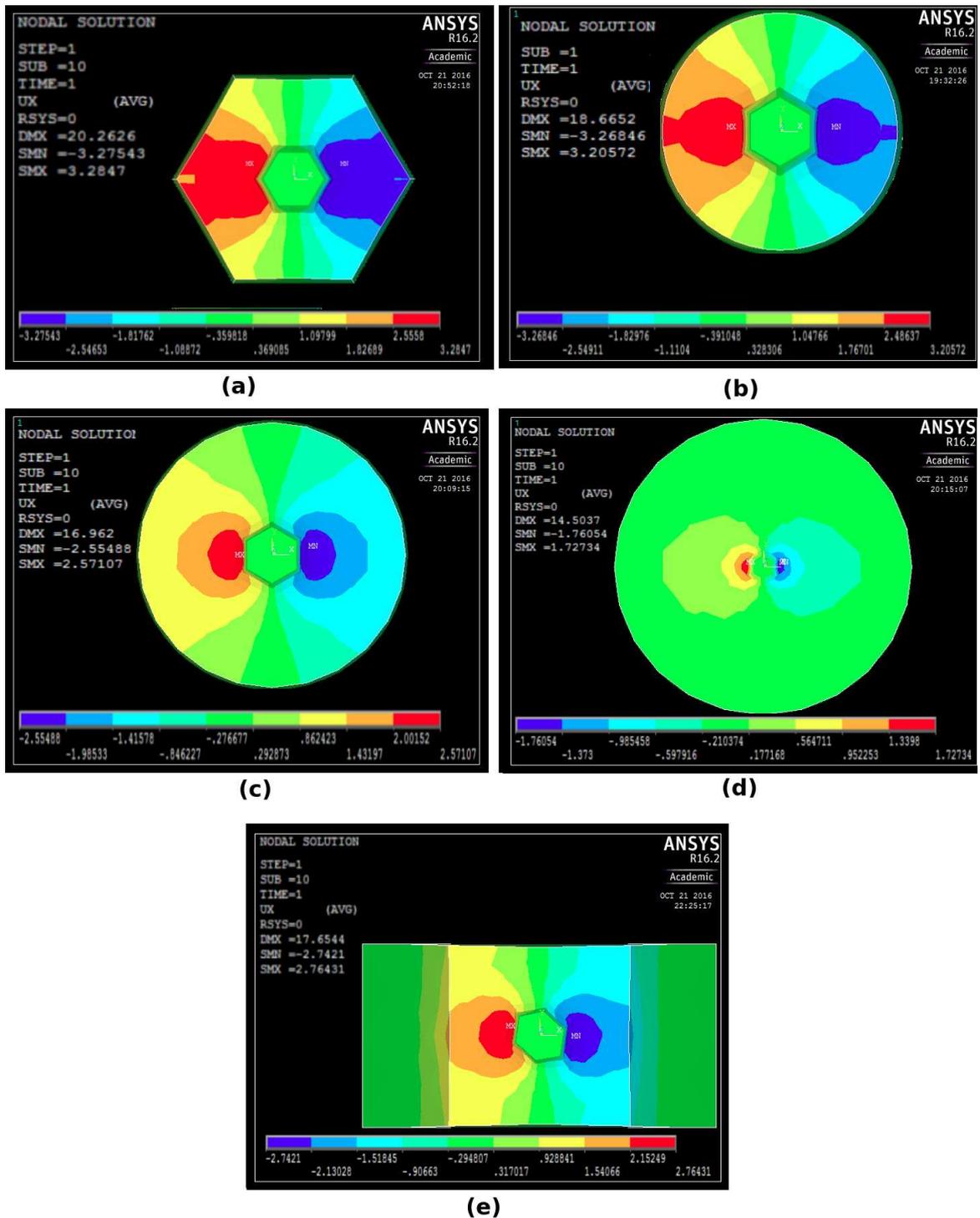


Figura 4.25: Espuma Cinza - Deslocamentos na direção X (mm) - (a) Hexágono L180 L80 P100. (b) Cilindro R60 P120. (c) Cilindro R80 P80. (d) Cilindro R250 P500. (e) Tronco de Pirâmide L180 L80 P100.

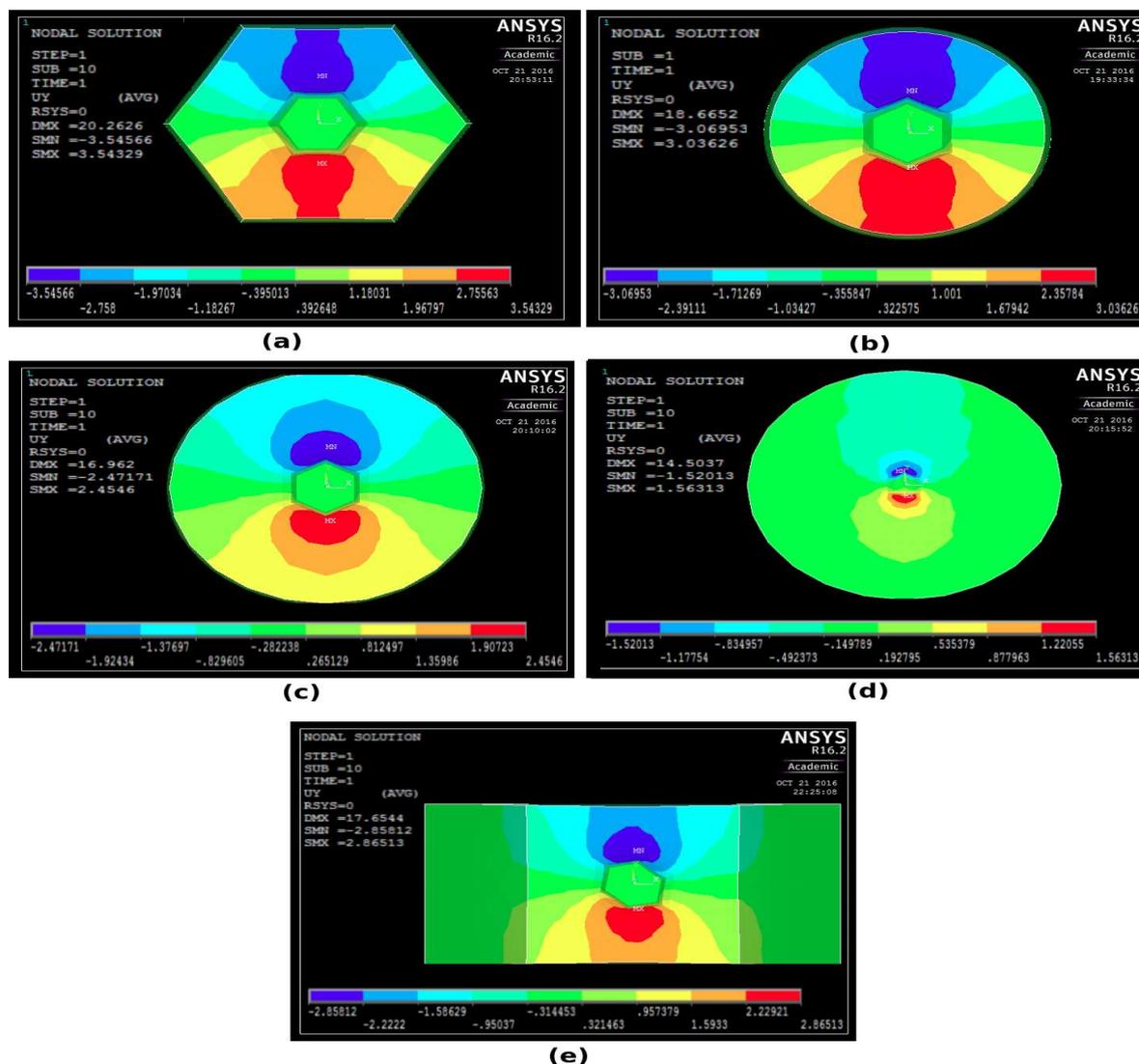


Figura 4.26: Espuma Cinza - Deslocamentos na direção Y (mm) - (a) Hexágono L180 L80 P100. (b) Cilindro R60 P120. (c) Cilindro R80 P80. (d) Cilindro R250 P500. (e) Tronco de Pirâmide L180 L80 P100.

4.3.3 Identificação de Materiais - Uma explicação para a deformação local como propriedade

A Figura 4.27 apresenta as tensões atuantes na direção Z sobre um cilindro de raio 60 mm, altura 120 mm e cujo material é espuma cinza. A Figura 4.28 apresenta a seleção de um conjunto de nós sobre a face externa de um objeto e a Figura 4.29 apresenta uma lista das tensões atuantes sobre os nós com os respectivos valores de tensões máximas atuantes.

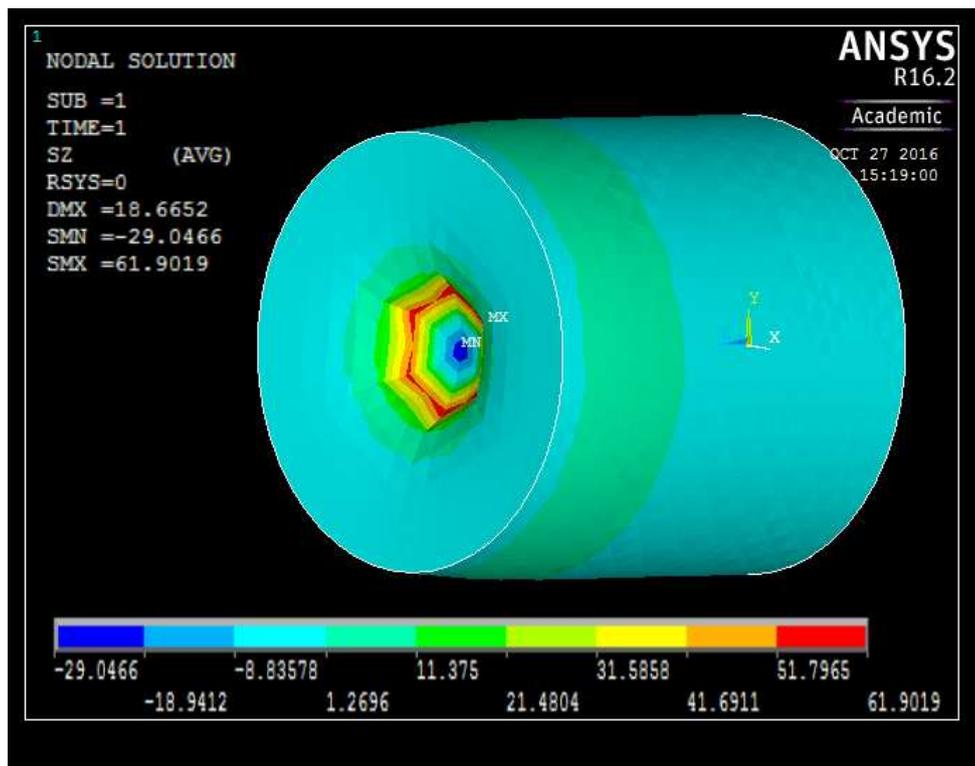


Figura 4.27: Simulação de deformação de espuma cinza - Objetos com dimensões superiores a raio mínimo do cilindro e mínima espessura, quando sofrem deformações locais, apresentam tensões desprezíveis próximo a borda do objeto.

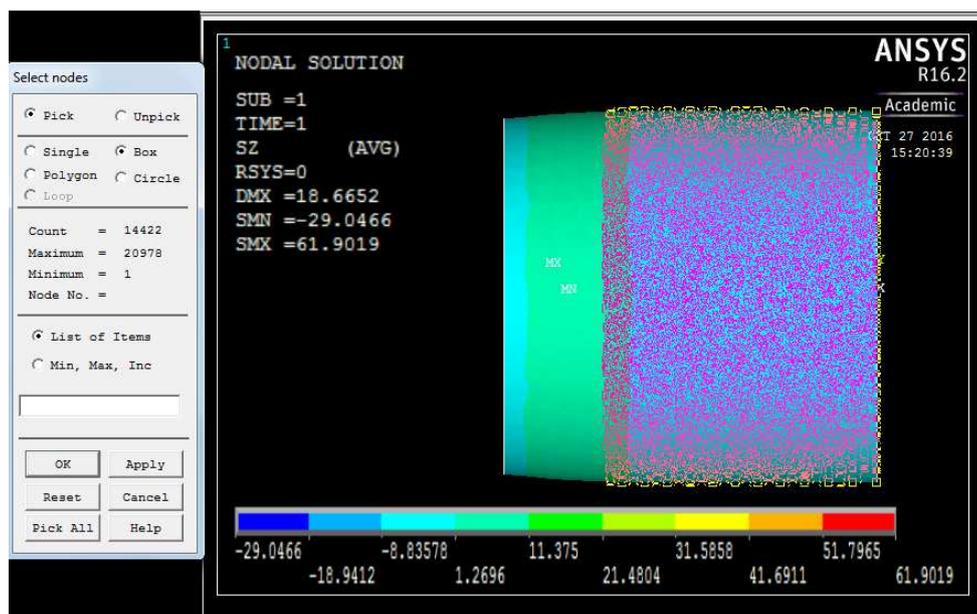


Figura 4.28: Deformações locais resultam em tensões desprezíveis próximo a regiões de borda - Seleção de nós.

NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SNZ
1	0.34372E-01	-0.96564E-03	-1.7759	0.32122E-04	-0.16693E-03	-0.16285E-04
2	-0.40983E-03	0.33804E-01	-1.7746	0.22211E-03	0.10203E-03	0.11531E-03
4	0.33702E-01	-0.26714E-03	-1.7759	0.47081E-02	-0.15929E-03	-0.43327E-04
6	0.31824E-01	0.16688E-02	-1.7762	0.89906E-02	-0.14407E-03	-0.55077E-04
8	-0.37802E-03	0.33602E-01	-1.7798	0.29363E-03	-0.13349E-03	-0.18124E-04
	■	■	■	■	■	■
	■	■	■	■	■	■
	■	■	■	■	■	■
20914	0.34582	0.19080E-01	0.29531	-0.68130E-01	0.14422	-0.36326E-01
20915	0.24716	0.34943E-01	0.53164	-0.64986E-01	0.23193	-0.81761E-01
20916	0.31264	0.40641E-01	0.27364	-0.10900	-0.14199	-0.55147E-01
20919	0.26333	0.25594E-01	0.46059	0.73453E-01	0.19089	0.65387E-01
20921	0.34900	0.18037E-01	0.35053	0.66550E-01	0.13553	0.35390E-01
20922	0.31719	0.41561E-01	0.35597	0.10983	-0.12624	0.50908E-01
NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SNZ
MINIMUM VALUES						
NODE	154	20203	17094	20684	20418	2071
VALUE	-0.19666	-0.20096	-1.7805	-0.17301	-0.32270	-0.26506
MAXIMUM VALUES						
NODE	20423	11874	20203	20761	20613	1974
VALUE	0.35995	0.34947	2.7255	0.17603	0.28711	0.24433

Figura 4.29: Deformações locais resultam em tensões desprezíveis próximo a regiões de borda - Tensões máximas em relação a nodos selecionados na Figura 4.28.

A deformação local de um material, considerando os valores mínimos de espessura e raio do cilindro, é uma propriedade que caracteriza o material. Isso ocorre porque grandes tensões atuam somente localmente e são distribuídas ao longo de um material. Ou seja, os nós distantes da região de aplicação de esforços sofrem tensões baixas e, muitas vezes, essas tensões são incapazes de resultar em alguma deformação visível. Na Figura 4.29 é mostrada que a tensão máxima na direção Z que atua sobre os nós selecionados apresenta valor de 2.73 kPa. Observando-se a curva tensão×deformação da espuma cinza (Figura 4.7), pode-se verificar que essa tensão não consegue provocar nem 2 % de deformação sobre um elemento.

4.3.4 Deslocamentos Locais de Referência

Considerou-se os valores de deslocamentos locais, obtidos para o cilindro de raio 60 mm e altura 120 mm na seção de validação da hipótese do trabalho, para as espumas rosa e cinza. Para a espuma de menor densidade, os valores de referência em Z, X e Y que foram adotados são apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.21(b), 4.22(b) e 4.23(b). Os deslocamentos em Z variaram de 0 a -28.2 mm. Os deslocamentos em X e Y apresentaram variação de, aproximadamente, -5 a 5 mm.

Os deslocamentos locais em Z, X e Y, para a espuma cinza, são apresentados nas Figuras 4.24(b), 4.25(b) e 4.26(b). Para a espuma cinza, os deslocamentos em Z variaram de 0 a -18.67 mm. Em X e Y, os deslocamentos estão entre -3 e 3 mm.

Já os deslocamentos locais obtidos, por meio de simulação, para a espuma verde são apresentados na Figura 4.30. Os deslocamentos em X e Y variaram entre, aproximadamente, -5 e 5 mm. Já os deslocamentos em Z variaram entre 0 e -24.8 mm, na simulação.

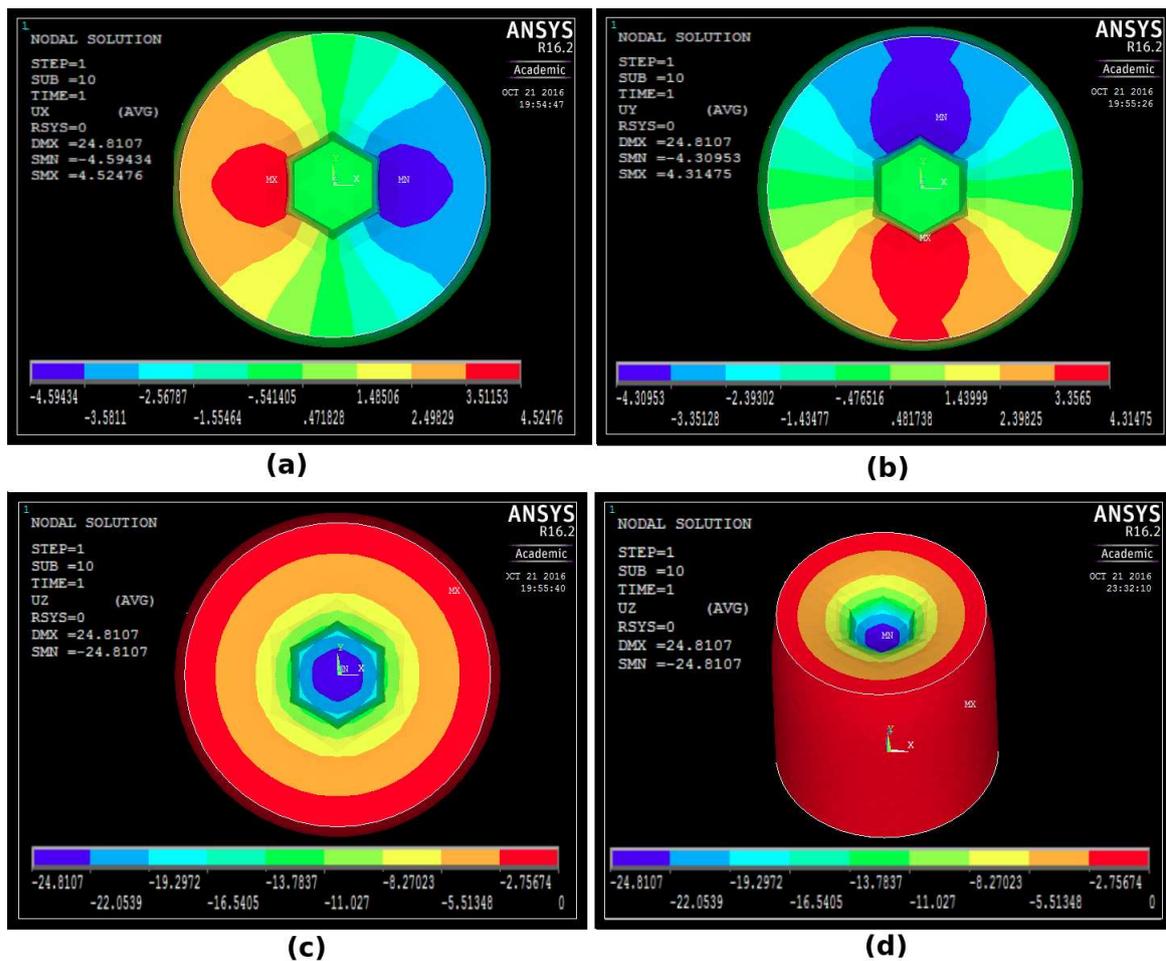


Figura 4.30: Espuma Verde - Simulação - Deslocamentos esperados (mm) nas direções X (a), Y (b), Z (c) e Vista Inclinada (d).

Pode-se observar que a diferenciação das espumas adotadas nesse trabalho, em termos dos deslocamentos em X e Y, é difícil de ser realizada, uma vez que, em módulo, os valores de deslocamentos nessas direções variam de 0 a 5 (mm), para a espuma rosa, e entre 0 e 3 (mm) para a espuma cinza. Em experimentos reais, realizando medições por câmera, a diferenciação de poucos milímetros em termos de X e Y é ainda mais difícil de ser percebida que na direção Z, uma vez que os deslocamentos nessas

direções são dependentes dos parâmetros intrínsecos da câmera e esses parâmetros, muitas vezes, apresentam incertezas que afetam a medição. De forma distinta, os valores de deslocamentos em Z são maiores, sendo obtidos com maior facilidade embora ainda haja erros de medição. Embora a simulação, algumas vezes, não represente a deformação real com grande acurácia (e.g., menos que 2 mm de erro), os deslocamentos obtidos servem como referência para resultados esperados em experimentos reais.

Capítulo 5

Experimentos Reais

Neste capítulo, os resultados referentes aos experimentos reais são apresentados e analisados. A primeira seção apresenta o projeto e construção de dispositivos. Em seguida, os materiais e *softwares* utilizados são descritos. Por meio de experimentos reais, validou-se a hipótese do trabalho. Para as avaliações dos efeitos da tensão residual e da homogeneidade do material em termos de rigidez, ensaios em ambiente controlado foram realizados. Na sequência, o alinhamento de nuvens de pontos e a capa selecionada para os objetos quase-homogêneos são exibidos. Os resultados dos experimentos, em ambiente controlado e por robô, referentes a identificação de materiais por meio dos métodos MALD-CN e MALD-PC são apresentados. Em seguida, é feita uma comparação entre tempos de execução das técnicas MALD-CN e MALD-PC em relação ao Método de Elementos Finitos Inverso (MEFI). Por último, uma discussão a respeito da validade dos métodos de identificação de materiais propostos quanto à geometria, homogeneidade, elasticidade, rigidez, dureza e textura é realizada.

5.1 Projeto e Construção de Dispositivos

A máquina para ensaios em ambientes controlados e um atuador linear, os quais foram projetados e construídos para a realização de experimentos reais, são apresentados no Apêndice H. A máquina para ensaios em ambientes controlados foi utilizada na validação da hipótese desse trabalho em ambiente real, para a realização de experimentos de identificação de espumas de forma menos susceptível a erros aleatórios, para a avaliação de homogeneidade e de efeitos de tensão residual. Já o atuador linear projetado permitiu a aplicação de esforços constantes na direção horizontal, possibilitando a realização de experimentos de identificação de espumas por meio do robô *TurtleBot*.

5.2 Materiais

Com o objetivo de verificar a validade dos métodos propostos nesse trabalho, o primeiro passo consistiu na definição de quais os tipos de materiais seriam adquiridos. Existem materiais que sofrem grandes deformações com pequenos esforços nas categorias de materiais elásticos, hiperelásticos e não-elásticos. Entretanto, como muitos dos materiais que sofrem grandes deformações com pequenos esforços são pertencentes a categoria de materiais hiperelásticos, optou-se por validar os métodos propostos com materiais pertencentes a essa categoria.

5.2.1 Objetos Utilizados

Os materiais hiperelásticos utilizados englobam espumas de diferentes densidades rosa (D16), cinza (D20), verde (D24.4), laranja (D25.6). As espumas rosa e cinza apresentam espessura de 102 mm, a espuma verde, 50 mm e a espuma laranja, 20 mm. Além disso, foram adquiridas espumas para isolamento acústico (cinza acústica), fibras de silicone, mantas acrílicas, látex, silicone, algodão, balões com diferentes propriedades. A Figura 5.1 apresenta os materiais adquiridos.



Figura 5.1: Materiais adquiridos.

5.2.2 Objetos com Capas e Bolas

O próximo passo consistiu na colocação de capas ao redor dos diversos materiais hiperelásticos adquiridos. O encapamento de um material pode alterar a compressibilidade do objeto formado (capa + material) e algumas vezes pode modificar totalmente as características de deformação. Quanto menos rígida uma capa for, menor será a sua influência sobre a deformação local de um objeto. Construíram-se objetos de diferentes geometrias e capas. Além disso, algumas bolas que apresentam a região externa composta por diferentes materiais poliméricos foram utilizadas. A Figura 5.2 apresenta os objetos com capa, construídos para esse trabalho, e algumas bolas.



Figura 5.2: Objetos com capas e bolas.

5.2.3 Ensaios Mecânicos Padrão

A máquina universal de ensaios mecânicos Instron 5882 (Figura 5.3), localizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos do CDTN, foi utilizada para a realização de ensaios de compressão uniaxial.

5.2.4 Materiais Diversos

Notebook

Para realização do processamento das imagens e execução dos algoritmos, utilizou-se um *Notebook* Dell Vostro 3550. Esse computador apresenta processador Intel(R) Core(TM) i5-2430M CPU @ 2.40GHz e 6 GB de memória RAM SODIMM DDR3 Síncrono 1333 MHz.



Figura 5.3: Máquina universal para ensaios mecânicos Instron 5882.

Pesos

Anilhas e chumbadas para aplicação de esforços desejados na máquina de ensaios projetada.

Medidores de força

Balanças para medição de forças aplicadas na vertical e um transdutor para medição de força em qualquer direção.

Servomotor Dynamixel AX-12+

Pode-se acessar a diversas propriedades do servomotor Dynamixel AX-12+ ao longo da atuação. Podem ser acessadas a temperatura, tensão atuante sobre o motor, a velocidade de rotação e o torque interno. O servomotor Dynamixel AX-12+ deve ser alimentado por uma fonte de 9 a 12 Volts. Em termos de componentes mecânicos, o servomotor Dynamixel apresenta um redutor de engrenagens acoplado ao eixo de alta rotação, eixo do motor, permitindo um torque de saída de até 1.5 Nm. Entretanto é recomendado que o torque máximo desse servomotor seja no máximo 40% do valor máximo de torque de saída ¹. O servomotor Dynamixel AX-12+ foi utilizado no atuador linear projetado para essa trabalho.

¹Robotis Dynamixel: http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/ax_series/dxl_ax_actuator.htm

USB2 Dynamixel

Conecta um ou mais servomotores Dynamixel ao computador e permite o seu controle, por exemplo, por meio do Sistema Operacional Robótico ou MATLAB®.

5.2.5 Robô *TurtleBot*

É um tipo de robô móvel que pode ser programado e controlado utilizando-se o sistema operacional robótico (Figura 5.4). Foi utilizado para suportar e transportar o atuador linear.



Figura 5.4: Robô móvel *TurtleBot*.

5.3 *Softwares*

Sistema Operacional Robótico (ROS)

No Sistema Operacional Robótico (ROS), existem tópicos que realizam o controle de movimento de juntas, outros que realizam o controle de torque e tópicos que permitem o acesso a informações como temperatura, velocidade de rotação, do motor Dynamixel AX-12+. O ROS permite a calibração de ambas as câmeras do Kinect, além da obtenção de imagens já retificadas e sincronizadas pelo pacote *freenect*² e da manipulação de imagens por meio das bibliotecas *OpenCV* e *Point Cloud Library*. Ao mesmo tempo, pode-se controlar o movimento de um robô, como por exemplo o *TurtleBot*, realizar simulações nos simuladores 2D, RVIZ, ou 3D, Gazebo. De forma resumida, o ROS permite o acesso, por meio de um único programa, via terminal Linux, de um conjunto de funcionalidades que necessitariam da comunicação entre diversos programas e seriam dificilmente obtidas por um único programador.

²Exemplo de arquivo *launch* do pacote *freenect*: `freenect-registered-xyzrgb.launch`

MATLAB®

O *software* MATLAB® permite a manipulação de matrizes por meio de uma linguagem interpretada. Diversos pacotes são implementados para rodar em MATLAB®, conhecidos como *ToolBox*. Para o presente trabalho, a *ToolBox* *calib* foi utilizada para a calibração de parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera de intensidade do sensor Kinect 1.0.

OpenCV

Biblioteca de caráter livre e gratuito. Permite a manipulação de imagens, disponibilizando funções para filtragem, detecção de *keypoints*, alguns descritores, remoção de *outliers*, dentre outras.

Point Cloud Library (PCL)

Biblioteca de caráter livre e gratuito. Permite a manipulação e visualização de nuvens de pontos.

AutoCad

Software utilizado, principalmente, para a produção de desenhos mecânicos bidimensionais. Apresenta uma versão gratuita para estudantes. Realizaram-se os projetos preliminares da máquina de ensaios em ambiente controlado e do atuador linear nesse *software*.

SolidWorks

É utilizado para a realização de desenhos mecânicos tridimensionais, desenharam-se as superfícies com diferentes curvaturas por meio desse *software*.

ANSYS

Software de elementos finitos que permite a simulação da deformação de objetos com geometrias variadas e diferentes materiais. Permite determinar esforços atuantes, tensões, deformações, dentre outros, por meio de um conjunto de parâmetros de entrada como restrições de movimento de um objeto, malha, esforços externos, modelos de materiais, tipos de carregamentos. Apresenta uma licença com limitação do número máximo de nós para estudantes e pesquisadores.

5.4 Experimentos Reais - Validação da hipótese do trabalho

5.4.1 Descrição

Para validar a hipótese do trabalho, por meio de experimentos reais, três ensaios com espumas rosa D16, as quais apresentam superfície plana e diferentes geometrias globais, foram realizados. Foram utilizadas três amostras de espuma rosa com superfície plana, uma correspondendo a um prisma hexagonal, outra a um prisma retangular e a última, semelhante a um tronco de pirâmide. A espessura das espumas é de 102 mm. Aplicou-se uma força de 2 kgf em uma região circular com raio de 16 mm.

Cinco alfinetes são posicionados com o mesmo espaçamento, antes da deformação, sobre cada uma das espumas (Figura 5.5). Além disso, eles estão alinhados com o centro do efetuator (ponta do cano) que pressionará as espumas. O primeiro alfinete está posicionado a aproximadamente 20 mm do centro no plano XY, os outros quatro são alinhados com o primeiro e apresentam distância inicial, em relação ao centro, de 24 mm, 28 mm, 32 mm e 36 mm. Após a aplicação dos esforços (Figura 5.6), o deslocamento na direção vertical de cada um dos alfinetes é medido. Por esse método, validou-se a hipótese do trabalho e ao mesmo tempo observou-se alguns erros entre as medições por meio da simulação e por experimentos reais. Para cada espuma, foram aplicados três vezes o mesmo esforço. Para cada esforço aplicado, mediram-se os deslocamentos de todos os cinco alfinetes no eixo Z, perpendicular a ponta do efetuator, por meio de um par de régua.



Figura 5.5: Espumas Rosa de diferentes geometrias e com alfinetes posicionados - Antes da deformação.

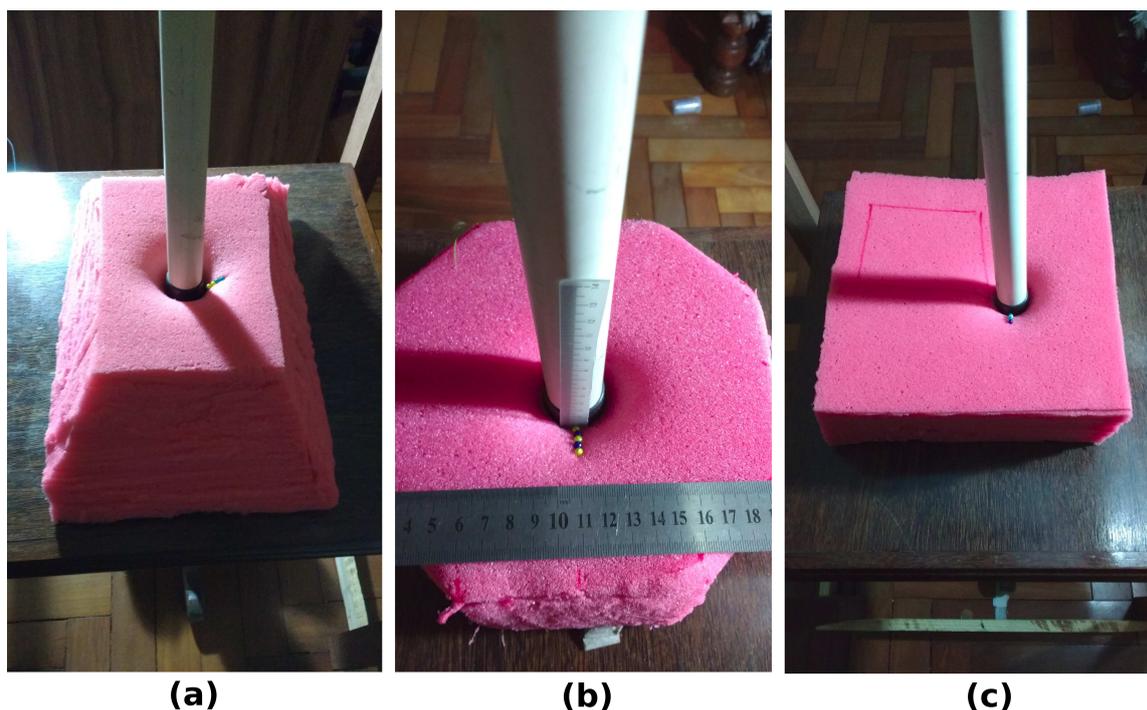


Figura 5.6: Experimentos reais - Prova conceitual - Espumas Rosa com geometrias de (a) Tronco de Pirâmide, Prismas (b) Hexagonal e (c) Retangular - Aplicação de esforço e deslocamentos de pontos característicos.

5.4.2 Deslocamentos de pontos característicos - Geometrias distintas

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de medições de deslocamento na direção vertical para os cinco alfinetes, pontos característicos, posicionados sobre o prisma hexagonal, prisma retangular e o tronco de pirâmide constituídos de espuma rosa. Cada um dos pontos característicos P1, P2, P3, P4 e P5 foram posicionados nas coordenadas $(0, 20, Z)$, $(0, 24, Z)$, $(0, 28, Z)$, $(0, 32, Z)$ e $(0, 36, Z)$ (mm), respectivamente, em relação ao centro do efetuador $(0, 0, Z)$, para as três geometrias. Para cada uma das espumas, para cada um dos cinco pontos característicos, realizaram-se três medições (M1, M2 e M3).

Observando a Tabela 5.1, verifica-se que as médias de medições para os pontos posicionados em mesmas coordenadas, indicados por cores iguais, apresentam variações de aproximadamente no máximo 2 mm para as diferentes geometrias (15.67, 16.33, 16.33), (12.67, 13, 13.33), (10, 9.67, 11), (6.33, 6.00, 7.67) e (4.33, 4.00, 5.67). Além disso, o desvio padrão associado às três medições, para cada geometria, apresentou valor máximo de 1.63 mm. Observando-se os deslocamentos dos pontos característicos, conclui-se que os deslocamentos locais de materiais, caso respeitem certos limites de

Tabela 5.1: Experimentos Reais - Prova conceitual - Espumas Rosa - Tronco de pirâmide, prismas retangular e hexagonal - Aplicação de esforço (2 kgf) e deslocamentos de pontos característicos (mm).

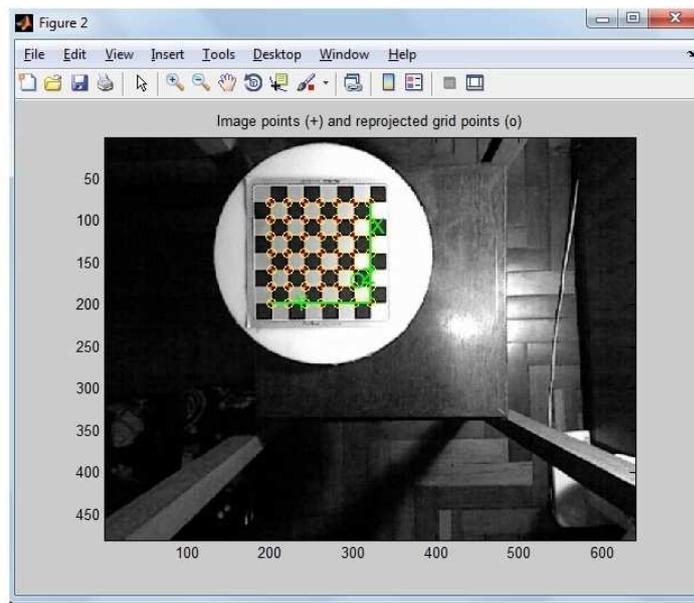
Prisma Hexagonal		M1	M2	M3	Média	Desv.Padr.
	P1	16	16	15	15.67	0.47
	P2	13	13	12	12.67	0.47
	P3	10	11	9	10.00	0.82
	P4	6	7	6	6.33	0.47
	P5	4	5	4	4.33	0.47
Prisma Retangular		M1	M2	M3	Média	Desv.Padr.
	P1	16	17	16	16.33	0.47
	P2	13	13	13	13.00	0.00
	P3	9	11	9	9.67	0.94
	P4	4	8	6	6.00	1.63
	P5	2	6	4	4.00	1.63
Tronco De Pirâmide		M1	M2	M3	Média	Desv.Padr.
	P1	16	16	17	16.33	0.47
	P2	14	13	13	13.33	0.47
	P3	11	11	11	11.00	0.00
	P4	9	6	8	7.67	1.25
	P5	7	4	6	5.67	1.25

espessura e raio mínimo de deformação, apresentam valor aproximadamente constante para um dado esforço aplicado. Ou seja, validou-se a hipótese do trabalho.

5.5 Ensaios em Ambiente Controlado

5.5.1 Calibração de Câmera

Os parâmetros extrínsecos do Kinect 1.0, fixado a máquina de ensaios em ambiente controlado, são apresentados na Figura 5.7. Os parâmetros intrínsecos correspondem aos comprimentos focais em pixels em X (f_x), em Y (f_y), as coordenadas do ponto principal (c_x , c_y), os parâmetros de distorção da lente e o ângulo α_c entre os eixos X e Y do sensor. Os valores dos parâmetros intrínsecos são, para o Kinect 1.0 utilizado em ambiente controlado, respectivamente, 519.11, 520.80, (317.83, 269.22), [0.17193, -0.35923, 0.01331, -0.00936, 0.00000] e α_c igual a 0.



Extrinsic parameters:

```

Translation vector: Tc_ext = [ 4.384425    -99.349152    712.288891 ]
Rotation vector:   omc_ext = [ 2.217749    -2.227783   -0.023002 ]
Rotation matrix:  Rc_ext = [ -0.004566   -0.999950   -0.008931
                             -0.999921    0.004461    0.011758
                             -0.011717    0.008984   -0.999891 ]
Pixel error:      err = [ 0.10482  0.11655 ]

```

Figura 5.7: Máquina de Ensaio - Calibração de parâmetros extrínsecos do Kinect 1.0 em relação à bandeja.

5.5.2 Testes com medição precisa - Objetos Homogêneos - Deslocamentos Máximos

Efeitos de Tensões Residuais e Velocidade de Carregamento

A Tabela 5.2 apresenta os dados obtidos nos testes para espumas rosa, cinza e verde, em termos de carregamentos lentos (aproximação do carregamento estático) ou rápidos (aproximação do carregamento quase-estático). A letra P indica a força aplicada para provocar a deformação local, as 10 medições estão indicadas como MX, sendo X o número da medição. A média, o desvio padrão e a repetitividade, calculada por meio da distribuição de *t-student* e parâmetro t igual a 2.262 para 95%, também são apresentados nessa tabela.

Tabela 5.2: Ensaios Controlados - Efeitos da velocidade de carregamento e de tensões residuais - Carregamentos Lento e Rápido - Deslocamentos máximos (mm).

		P (kgf)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Média	Desv. Padr.	Re	
Rosa	Lento	2	21	22	22	22	22	22	22	22	23	23	22.10	0.54	1.22	
		3	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	29.90	0.30	0.68	
		4	40	40	40	40	40	41	41	41	41	41	40.50	0.50	1.13	
		3	37	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36.10	0.30	0.68	
		2	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30.00	0.00	0.00	
	Rápido	2	23	23	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22.20	0.40	0.90
		3	28	28	28	28	28	28	28	29	29	29	29	28.40	0.49	1.11
		4	36	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	36.90	0.30	0.68
		3	34	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	35.50	0.67	1.52
		2	29	29	29	29	30	30	30	30	30	30	30	29.60	0.49	1.11
Cinza	Lento	2	20	20	20	21	21	21	20	21	21	21	20.60	0.49	1.11	
		3	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28.00	0.00	0.00	
		4	34	34	35	35	35	35	35	35	35	36	36	35.00	0.63	1.43
		3	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32.00	0.00	0.00
		2	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26.00	0.00	0.00
	Rápido	2	18	18	18	19	19	19	19	19	19	20	20	18.90	0.70	1.58
		3	25	25	26	26	26	26	26	26	26	27	27	26.00	0.63	1.43
		4	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	33.50	0.50	1.13
		3	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	30.90	0.30	0.68
		2	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26.00	0.00	0.00
Verde	Lento	2	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17.00	0.00	0.00	
		3	24	24	24	24	24	24	24	25	25	25	25	24.40	0.49	1.11
		4	34	34	33	33	33	32	32	32	32	32	32	32.70	0.78	1.77
		3	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29.00	0.00	0.00
		2	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22.00	0.00	0.00
	Rápido	2	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18.00	0.00	0.00
		3	22	22	22	22	22	22	22	23	23	23	24	22.50	0.67	1.52
		4	30	30	30	30	30	30	30	31	31	31	31	30.40	0.49	1.11
		3	27	28	28	28	29	29	29	29	29	29	29	28.50	0.67	1.52
		2	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	21.80	0.40	0.90

Em termos de tensões residuais, pode-se verificar que após a aplicação das forças de 2 a 4 kgf, quando uma força de 3 kgf ou 2 kgf voltam a ser aplicadas, o deslocamento máximo obtido passa a ser maior. Isso indica que embora as espumas retornem às suas dimensões originais, para a força externa de 4 kgf aplicada sobre a área circular de raio 16 mm, as propriedades internas não são totalmente restabelecidas. Isso ocorre devido a presença de tensões residuais. Como consequência, esforços menores são necessários para provocar deslocamentos maiores. Por exemplo, para a espuma rosa com carregamento lento, o deslocamento passou de 22 mm para 30 mm para a força de 2 kgf, após a aplicação dos outros esforços. De forma semelhante, os deslocamentos das espumas cinza e verde também foram alterados.

Em termos de velocidade de carregamento, pode-se verificar, para as três espumas, que os deslocamentos obtidos para os pontos, nos ensaios lento e rápido, foram praticamente os mesmos. Por exemplo, para as espumas rosa, cinza e verde, os deslocamentos na segunda aplicação de 2 kgf, para os ensaios lento e rápido, foram respectivamente os pares (30.00, 29.60), (26.00, 26.00) e (22.00, 21.80). Isso significa que, conforme indicado pelos ensaios de compressão uniaxial realizados para as espumas desse trabalho, a velocidade de avanço não é um fator muito importante. Entretanto, deve-se observar que para outros tipos de espumas ou outros tipos de materiais, a velocidade de avanço pode afetar a realização dos testes e ser um fator que influencie na deformação local. Caso o controle da velocidade de avanço seja necessário, os esforços sobre os objetos reais poderiam ser aplicados da forma mais lenta possível. Aproximando-se a curva tensão×deformação mais lenta dos materiais, 0.01/s, ao comportamento do material.

Observando-se os desvios-padrão e repetitividade para 95% de confiabilidade, pode-se verificar que os valores de desvio-padrão apresentaram valores inferiores a 1 mm e a repetitividade máxima encontrada foi de 1.77 mm para a espuma verde, no carregamento de 4 kgf. De forma geral, pode-se verificar que as variações da profundidade máxima, para cada um dos materiais, é muito pequena, novamente indicando que os deslocamentos locais de materiais permitem a identificação de um material.

Algumas vezes, os deslocamentos locais para diferentes densidades de espumas podem ser próximos. Comparando o primeiro carregamento de 2 kgf das espumas rosa, cinza e verde, observa-se que os valores reais de medição são, em média, muito próximos (22.10, 20.60 e 17.00) (mm). Ou seja, para diferenciar os materiais, por meio de análise local de deslocamentos com maior precisão, algumas vezes, será necessário aumentar a carga aplicada, considerar as características de tensões residuais, raio de deformação, deslocamentos em X e Y, sensibilidade a fadiga, dentre outras. Caso a diferenciação entre materiais com características muito semelhantes não seja necessária, a análise local de deslocamentos por meio da análise de um único carregamento pode ser suficiente.

Teste de Repetição - Verificação de homogeneidade

A Tabela 5.3 apresenta as dez medições de deslocamentos indicadas por MX, onde X refere-se ao número da medição sobre um mesmo ponto, para os três pontos P1, P2 e P3. Pode-se verificar que as médias das medições de deslocamentos máximos, para os três pontos da espuma rosa, foram de 22.10 mm, 22.40 mm e 21.70 mm. Para a espuma cinza foram de 20.60 mm, 20.80 mm e 21.60 mm e para a espuma verde 17.00 mm, 17.00 mm e 16.00 mm, indicando que as três espumas são, por amostragem,

aproximadamente homogêneas em termos de rigidez.

Tabela 5.3: Ensaio Controlado - Testes de repetição - Deslocamentos máximos (mm).

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Média	Desv. Padr.	Re
Rosa	P1	21	22	22	22	22	22	22	22	23	23	22.10	0.54	1.22
	P2	23	23	23	23	22	22	22	22	22	22	22.40	0.49	1.11
	P3	21	21	21	22	22	22	22	22	22	22	21.70	0.46	1.04
Cinza	P1	20	20	20	21	21	21	20	21	21	21	20.60	0.49	1.11
	P2	20	20	20	20	21	21	21	21	22	22	20.80	0.75	1.69
	P3	20	21	21	22	22	22	22	22	22	22	21.60	0.66	1.50
Verde	P1	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17.00	0.00	0.00
	P2	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17.00	0.00	0.00
	P3	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16.00	0.00	0.00

5.6 Alinhamento de Nuvens de Pontos

A Figura 5.8 apresenta o alinhamento entre duas nuvens de pontos antes e após a deformação de uma espuma cinza quase-homogênea. A nuvem de pontos deformada é resultado da aplicação de 2 kgf sobre uma área circular de 16 mm de raio. Essa figura contém as imagens RGB antes e após a deformação, todas as correspondências entre pontos característicos, os pontos característicos fora do raio de deformação incerto usados para o alinhamento de nuvens de pontos, os *keypoints* localizados dentro do raio de deformação incerto utilizados no MALD-PC, a nuvem de pontos resultante do alinhamento grosseiro, a nuvem de pontos resultante do alinhamento fino e a vista lateral da região deformada englobada pelo círculo amarelo e que apresenta cor vermelha.

5.7 Objetos Homogêneos, Heterogêneos e Quase-Homogêneos

Em experimentos reais e conseqüentemente na área de robótica, pode-se colocar uma capa de baixa rigidez sobre um objeto homogêneo, de forma que ela não apresente dobras. A Figura 5.9 apresenta diferentes capas de baixa rigidez que foram testadas. A capa indicada pela letra (a), nessa imagem, foi selecionada para a criação de objetos quase-homogêneos e algumas vezes utilizada sobre objetos heterogêneos.

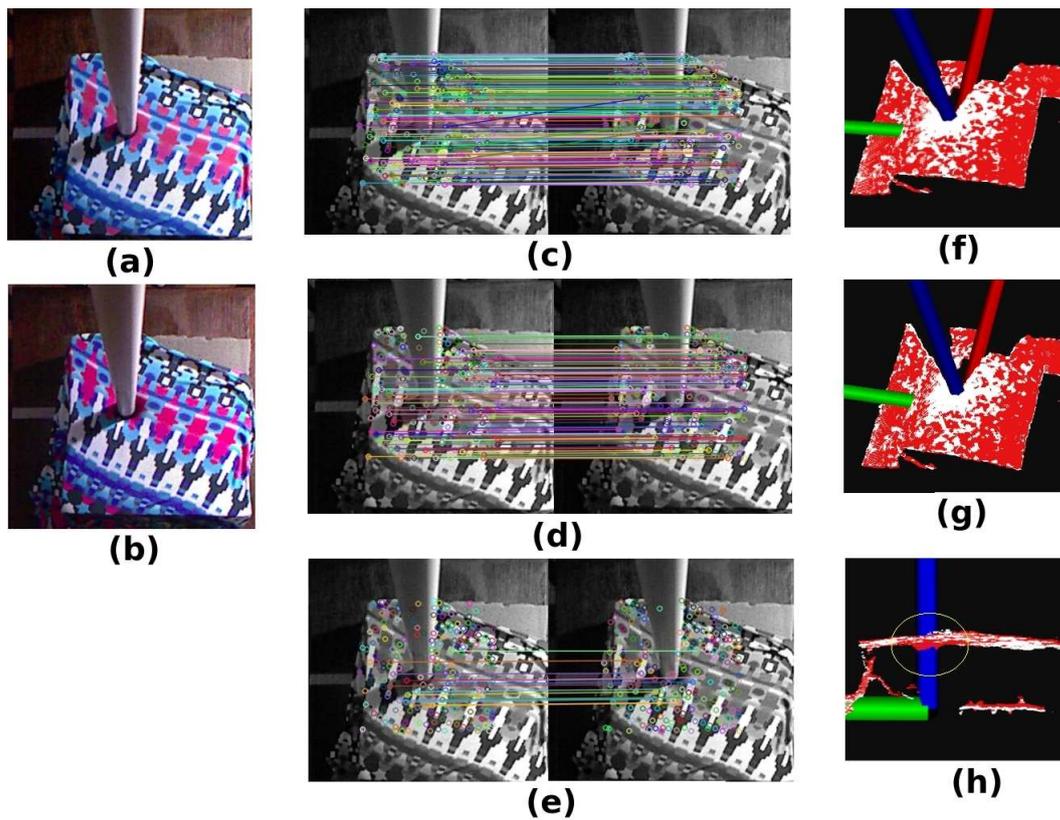


Figura 5.8: Alinhamento de nuvens de pontos referente à espuma cinza quase-homogênea - (a) Imagem RGB adquirida pelo Kinect antes da deformação. (b) Imagem RGB adquirida após a deformação de uma espuma. (c) Todas correspondências entre pontos característicos. (d) Sem *Outliers* - Correspondência entre pontos característicos fora do raio de deformação incerto. (e) Correspondência entre pontos característicos dentro do raio de deformação incerto. (f) Alinhamentos grosseiro. (g) Alinhamento fino. (h) Vista lateral da região de deformação (circulada pela cor amarela).

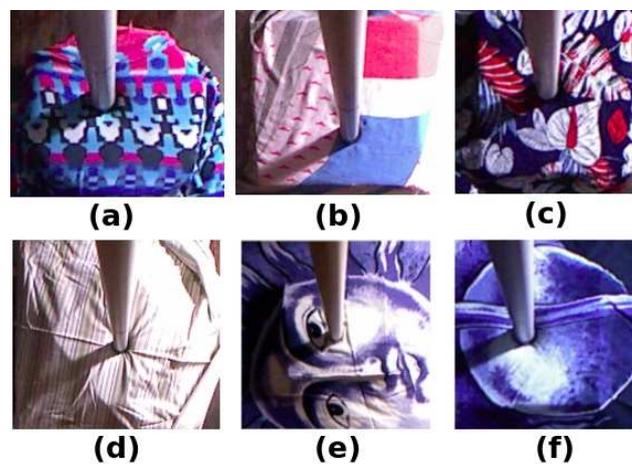
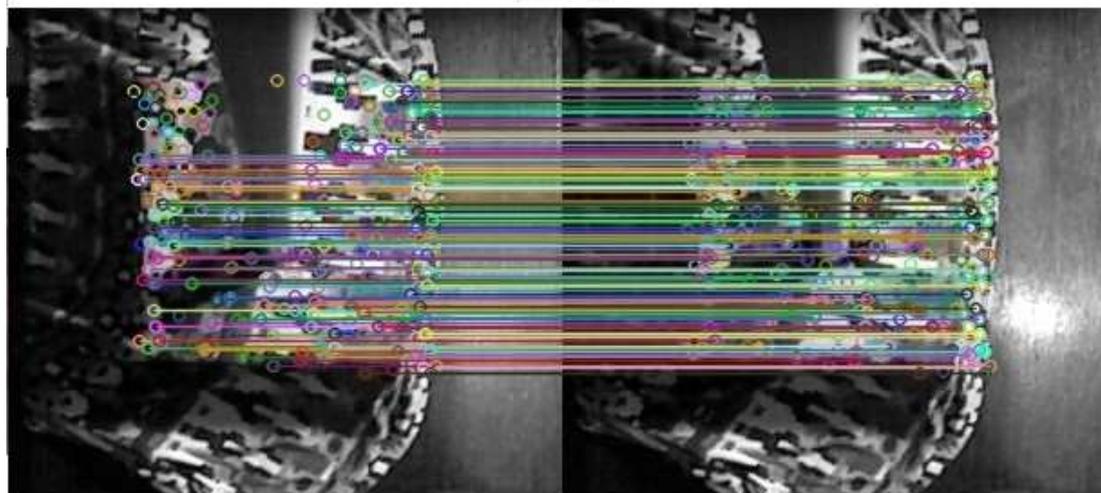


Figura 5.9: Objetos Quase-Homogêneos - Diferentes capas.

A Figura 5.10 apresenta os motivos da capa indicada pela Figura 5.9(a) ter sido escolhida. O número de pontos característicos sobre a Figura 5.10 é muito grande antes (a) e após (b) a filtragem de *outliers* e a capa não absorve o sinal infravermelho.



(a)



(b)

Figura 5.10: Objetos Quase-Homogêneos - Capa escolhida - Correspondência entre pontos característicos antes e após deformação - (a) Sem filtrar *outliers*. (b) Filtrando *outliers*.

5.8 Método de Análise Local de Deslocamentos Por Curvas de Nível (MALD-CN)

5.8.1 Legenda de cores

A escala de cores adotada para representar as diferentes profundidades obtidas pela diferença entre as nuvens de pontos inicial e final, em diferentes figuras da seção referente ao MALD-CN, é apresentada na Figura 5.11.

Vermelho	($0 \leq z < 2$)	[mm]
Laranja	($2 \leq z < 4$)	[mm]
Amarelo	($4 \leq z < 6$)	[mm]
Verde	($6 \leq z < 8$)	[mm]
Azul	($8 \leq z < 10$)	[mm]
Roxo	($10 \leq z < 12$)	[mm]
Azul Claro	($12 \leq z < 14$)	[mm]
Magenta	($14 \leq z < 16$)	[mm]
Verde Esc.	($16 \leq z < 18$)	[mm]
Oliva	($18 \leq z < 20$)	[mm]
Branco	($20 \leq z < 150$)	[mm]

Figura 5.11: MALD-CN - Legenda de cores, conforme a variação de profundidade Z.

5.8.2 Ensaios em Ambiente Controlado - Testes de Repetição - Deslocamentos Máximos

5.8.2.1 Objetos Homogêneos - Medição por Régua

Os deslocamentos, para os testes de repetição, para diferentes carregamentos, são apresentados na Tabela 5.4. Indicados pelas mesmas cores estão as células referentes ao mesmo tipo de espuma. Por meio dessa tabela, pode-se observar que quanto maior o carregamento, maior a diferença entre os deslocamentos locais máximos obtidos e conseqüentemente, maior a diferença entre as deformações locais das diferentes espumas. Basicamente o deslocamento máximo local cresce para todas as espumas a medida que o carregamento é aumentado. Os valores de desvio padrão e repetitividade são pequenos. A repetitividade apresenta valor máximo de 2.44 mm, confirmando novamente que a deformação local de um objeto é uma característica do material.

Tabela 5.4: Ensaios Controlados - Testes de repetição para diferentes forças - Carregamento lento - Deslocamentos máximos (mm).

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Média	Desv. Padr.	Re
1.5 kgf	Rosa_L	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18.00	0.00	0.00
	Cinza_L	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17.00	0.00	0.00
	Verde_L	12	12	12	12	12	13	12	13	13	13	12.40	0.49	1.11
2 kgf	Rosa_L	22	23	23	22	23	23	23	22	22	23	22.60	0.49	1.11
	Cinza_L	21	21	22	21	21	21	21	22	22	22	21.40	0.49	1.11
	Verde_L	15	16	16	16	16	16	17	17	17	17	16.30	0.64	1.45
2.5 kgf	Rosa_L	27	26	27	27	27	28	28	28	27	28	27.30	0.64	1.45
	Cinza_L	26	27	27	27	27	28	27	28	28	27	27.20	0.60	1.36
	Verde_L	18	19	19	19	17	18	18	19	19	18	18.40	0.66	1.50
3 kgf	Rosa_L	31	34	33	31	32	32	31	32	34	32	32.20	1.08	2.44
	Cinza_L	31	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30.10	0.30	0.68
	Verde_L	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22.00	0.00	0.00
4 kgf	Rosa_L	38	38	38	38	38	39	39	39	39	39	38.50	0.50	1.13
	Cinza_L	32	32	33	33	33	33	33	33	34	34	33.00	0.63	1.43
	Verde_L	33	33	32	32	32	31	31	31	31	31	31.70	0.78	1.77
5.5 kgf	Rosa_L	50	51	51	51	51	51	51	51	50	51	50.80	0.40	0.90
	Cinza_L	41	42	43	41	42	42	42	42	42	42	41.90	0.54	1.22
	Verde_L	38	38	37	37	37	38	37	37	37	38	37.40	0.49	1.11

5.8.2.2 Objetos Quase-Homogêneos e Heterogêneos

Diferentes objetos

A Figura 5.12 apresenta os diferentes objetos quase-homogêneos e heterogêneos utilizados para os testes em ambiente controlado. De forma geral, antes da deformação, todos os objetos adotados para ensaios em ambientes controlados apresentaram uma superfície aproximadamente plana.

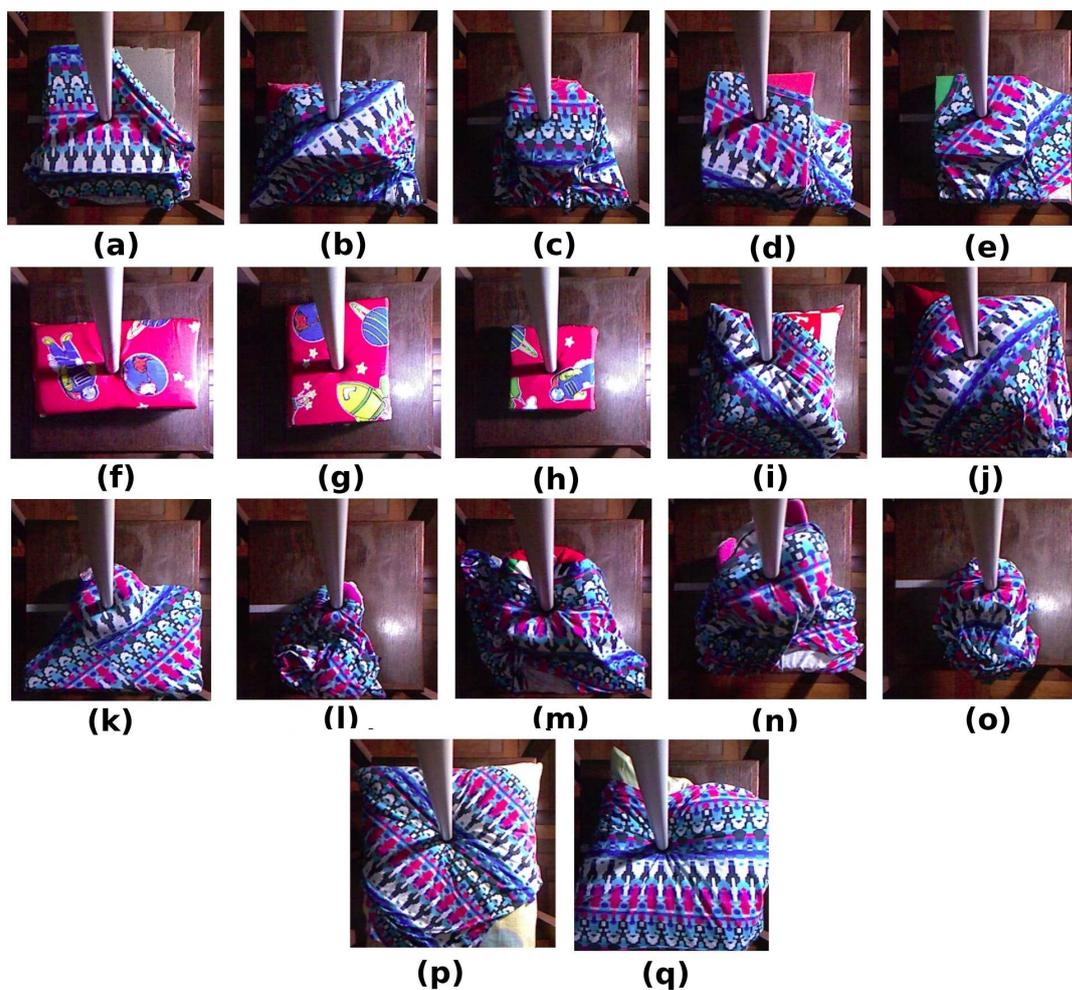


Figura 5.12: Objetos utilizados - Deslocamentos máximos de objetos quase-homogêneos (a, b, c, d, e) ou heterogêneos - (a) Espuma Cinza. (b) Espuma Rosa - Tronco de Pirâmide. (c) Espuma Rosa - Prisma Hexagonal. (d) Espuma Rosa - Prisma Retangular. (e) Espuma Verde. (f) Espuma Rosa Heterogênea. (g) Espuma Cinza Heterogênea. (h) Espuma Verde Heterogênea. (i) Almofada com Fibras de Silicone. (j) Almofada com Flocos de Espuma. (k) Disco com Fibras de Silicone. (l) Cilindro com Manta Acrílica. (m) Cubo com Fibras de Silicone. (n) Objeto com Ar no Interior. (o) Cilindro com Flocos de Espuma. (p) Travesseiro de Algodão I. (q) Travesseiro de Algodão II.

Medição por Régua

A Tabela 5.5 apresenta as medições de deslocamentos máximos para régua e medição por câmera, para objetos quase-homogêneos e heterogêneos.

Tabela 5.5: Ensaios Controlados - Testes de repetição - Força aplicada de 2 kgf - Carregamento rápido - Deslocamentos máximos (mm).

		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Média	Desv. Padr.	Re	
Quase-Homogêneos	Régua	Rosa_R	21	23	23	23	23	23	23	23	23	24	22.90	0.70	1.58
		Cinza_R	19	19	19	20	20	21	21	21	21	21	20.20	0.87	1.97
		Verde_R	17	17	17	17	17	17	17	18	18	18	17.30	0.46	1.04
	Câmera	Rosa_R	13.27	15.13	16.79	17.39	15.04	14.87	16.84	17.29	15.23	15.23	15.71	1.25	2.83
		Cinza_R	15.07	13.09	15.10	13.12	13.00	15.17	14.81	17.14	15.14	13.00	14.46	1.30	2.95
		Verde_R	13.08	12.89	12.84	13.03	15.33	12.84	12.99	13.11	12.83	12.83	13.18	0.72	1.64
Heterogêneos	Régua	Rosa_R	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16.00	0.00	0.00
		Cinza_R	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12.00	0.00	0.00
		Verde_R	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12.00	0.00	0.00
	Câmera	Rosa_R	13.57	12.84	15.18	12.84	12.86	12.90	12.88	12.84	12.84	12.90	13.17	0.70	1.59
		Cinza_R	9.09	9.38	9.28	8.89	9.06	11.19	11.31	9.27	9.17	11.16	9.78	0.95	2.15
		Verde_R	9.26	13.33	10.93	10.94	13.26	11.06	11.16	15.53	13.23	13.19	12.19	1.72	3.90

Pode-se verificar que os deslocamentos obtidos por régua (Tabela 5.5), em média, para cada uma das espumas (22.90, 20.20, 17.30) (mm) quase-homogêneas, para o esforço de 2 kgf, foram próximos aos valores obtidos, em média, para as espumas homogêneas rosa (22.20 mm), cinza (18.90 mm) e verde (18.00 mm), apresentados na Tabela 5.2. Pode-se então confirmar que as capas utilizadas, em objetos quase-homogêneos, praticamente não afetaram a deformação local em relação ao objeto homogêneo.

Medição por Câmera

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam a imagem adquirida por meio de câmera antes da deformação (a), depois da deformação (b), as curvas de nível em um raio de 40 mm (c) e a diferença entre curvaturas em toda a imagem (d) para as espumas quase-homogêneas rosa, cinza e verde, respectivamente.

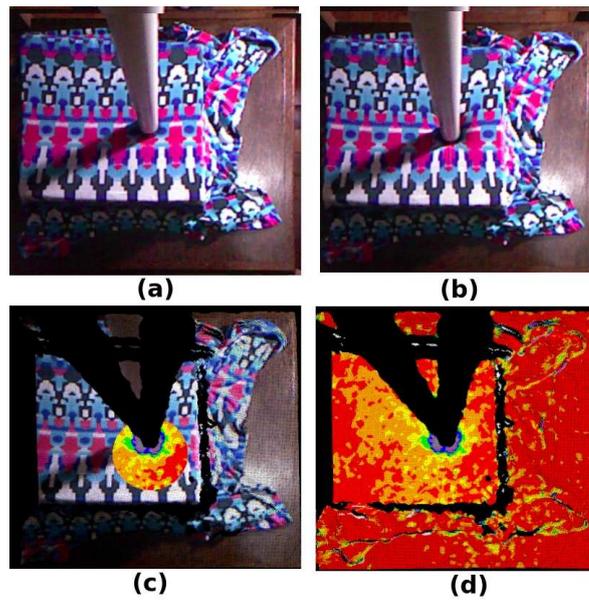


Figura 5.13: MALD-CN - Espuma Rosa - Determinação de curvas de nível - (a) Antes da aplicação do esforço. (b) Após a aplicação do esforço. (c) Curvas de nível locais. (d) Curvas de nível locais e visualização do ruído do Kinect 1.0 sobre toda a imagem. Escala de cores das curvas de nível (c, d) conforme a Figura 5.11.

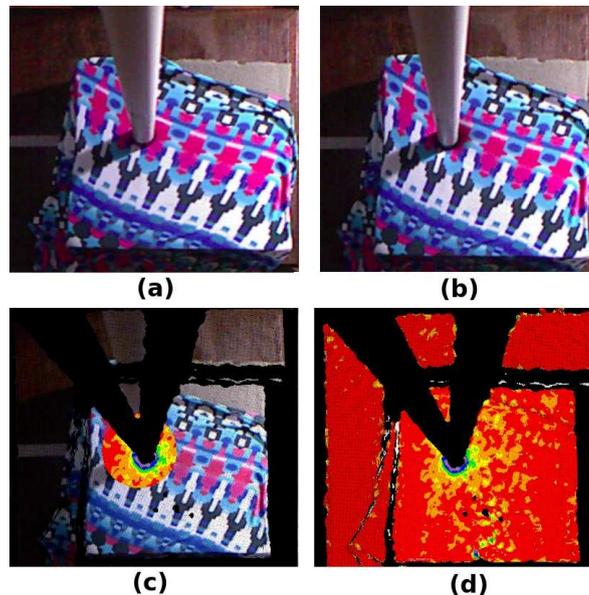


Figura 5.14: MALD-CN - Espuma Cinza - Determinação de curvas de nível - (a) Antes da aplicação do esforço. (b) Após a aplicação do esforço. (c) Curvas de nível locais. (d) Curvas de nível locais e visualização do ruído do Kinect 1.0 sobre toda a imagem. Escala de cores das curvas de nível (c, d) conforme a Figura 5.11.

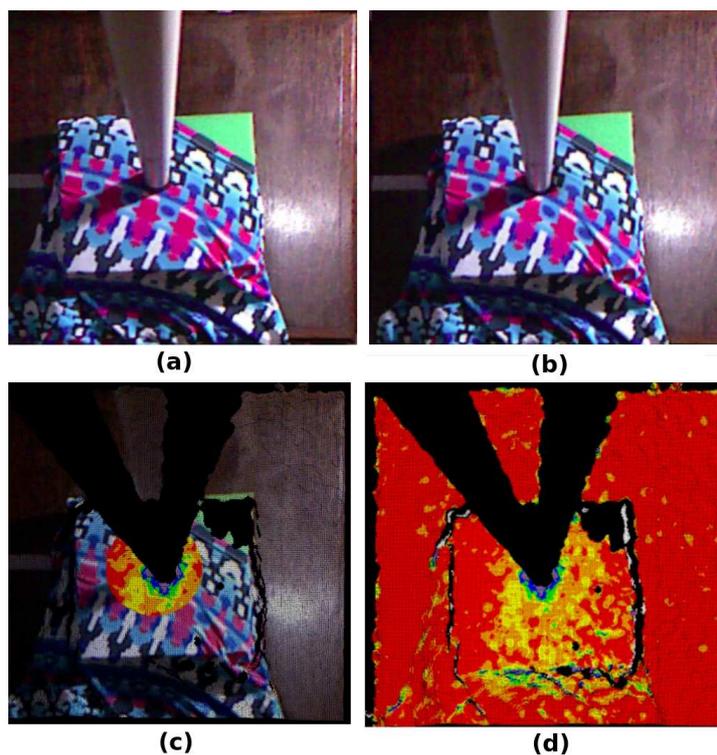


Figura 5.15: MALD-CN - Espuma Verde - Determinação de curvas de nível - (a) Antes da aplicação do esforço. (b) Após a aplicação do esforço. (c) Curvas de nível locais. (d) Curvas de nível locais e visualização do ruído do Kinect 1.0 sobre toda a imagem. Escala de cores das curvas de nível (c, d) conforme a Figura 5.11.

Pode-se observar nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 que as curvas de nível obtidas pelo sensor Kinect 1.0, para as diferentes espumas, não respeitaram totalmente os círculos concêntricos e a suavidade esperados por meio das simulações no *software* de elementos finitos ANSYS. Isso ocorre principalmente devido a presença de erros aleatórios em medições realizadas pelo Kinect 1.0, ruído ambiente e ao fato do centro ideal do efetuador $(0, 0, Z)$, em relação ao instante em que a deformação do material será iniciada, não corresponder ao centro real do efetuador. O resultado disso é que se as curvas de nível fossem comparadas ponto a ponto às curvas de nível obtidas por meio de simulação para as espumas rosa, cinza e verde, ou aos deslocamentos de pontos característicos obtidos de forma precisa por experimentos reais, haveria problemas para a identificação de materiais devido a imprecisão do Kinect 1.0, mesmo se o centro do efetuador fosse determinado com grande acurácia em cada imagem. Além disso, o erro de profundidade sobre as imagens aumenta com a distância do objeto. Mesmo aplicando a correção para o erro de profundidade sugerida por Pagliari & Pinto [2015], erros de aproximadamente 4 mm, em uma distância aproximada de 690 mm entre câmera e objeto no ambiente controlado, para mais ou menos ainda estão presentes

nas medições realizadas. E 8 mm, a distância de 1119 mm entre câmera e objeto, em testes realizados com o robô.

Como uma alternativa a trabalhar com dados ruidosos, o presente trabalho identificou os materiais pelo método MALD-CN de forma a agrupar pontos que apresentem deslocamentos em faixas com incremento de 2 mm. Em seguida, determinou-se o máximo deslocamento na vizinhança do efetuador, sendo que o máximo valor a ser considerado correspondeu a média de deslocamentos máximos entre o conjunto de pontos que se enquadra na faixa de deslocamentos. Além disso, mesmo utilizando o filtro da mediana nas imagens de profundidade, verificou-se a necessidade de reduzir a chance de algum ponto com grande ruído em uma região ser considerado o máximo deslocamento na vizinhança do efetuador. Como consequência, considerou-se que o número de pontos pertencentes a faixa de deslocamento máximo deveria ser maior que um valor arbitrário (adotou-se 10).

Comparação entre medições por régua e câmera

Em relação ao deslocamento medido por câmera, para objetos quase-homogêneos, pode-se notar que os maiores deslocamentos para as espumas foram de 4 a 7 mm inferiores ao deslocamento máximo. Isso ocorre porque, conforme destacado anteriormente, a câmera não mede o deslocamento na região do efetuador, mas apenas na sua vizinhança. Observando-se a média de medições para a espuma rosa (Tabela 5.1), na prova conceitual por experimentos reais, pode-se verificar que o deslocamento em Z para o ponto P1, cuja coordenada é $(0, 20, Z)$ (mm), para as diferentes geometrias foi de (15.67, 16.33, 16.33) (mm). Observando a Tabela 5.5, para a espuma rosa quase-homogênea, verifica-se que o deslocamento máximo de 15.71 mm foi medido pelo sensor Kinect 1.0. Comparando as profundidades de aproximadamente 16 mm às medições obtidas por câmera, demonstra-se que apesar do erro de medição de profundidade ser considerável e das curvas de nível não serem obtidas com acurácia, o deslocamento máximo em uma região pode ser obtido com valor próximo ao valor verdadeiro.

Para os objetos heterogêneos, pode-se observar que os deslocamentos máximos medidos por meio de régua foram inferiores aos deslocamentos medidos para os objetos homogêneos ou quase-homogêneos constituídos pelas mesmas espumas. Isso indica que a capa posicionada ao redor do objeto interferiu na rigidez do material, modificando a deformação local. Já as medições por câmera, apresentaram uma tendência em reduzir o maior deslocamento para as espumas rosa e cinza, entretanto para a espuma de menor espessura foi possível medir o deslocamento de 12 mm, assim como medido por régua. Isso indica que a deformação para essa espuma apresentou um maior aplainamento,

tendo uma espécie de platô na região de deformação, foi mais influenciada por ruído ou apenas foi beneficiada por um melhor ângulo de visão devido a menor espessura da espuma. De forma geral, objetos heterogêneos de duas camadas apresentarão sempre um deslocamento real inferior ao que a componente homogênea, interior ao objeto, apresentaria.

Por meio da Tabela 5.5, pode-se verificar também que o desvio-padrão e, conseqüentemente, a estimativa de incerteza aleatória para 95% de confiança é maior para as medições realizadas por câmera devido às aquisições ruidosas. Em termos de identificação de materiais, essa tabela permite inferir alguns conceitos. Primeiramente, a deformação local de um objeto homogêneo é praticamente igual a deformação local de um objeto quase-homogêneo, por meio de experimentos realizados por deslocamentos de pontos característicos e pelas medições do deslocamento máximo de uma deformação local. Em segundo lugar, a medição, por meio de instrumentos de maior precisão, permite uma identificação de material de forma mais correta. Em terceiro lugar, em objetos heterogêneos de duas camadas, a deformação local será alterada. Entretanto, caso o efeito da diminuição de deslocamentos ocasionado pela maior rigidez seja conhecido, por simulação ou por experimentos reais, algumas vezes os materiais que constituem a parte interior do objeto poderão ser identificados.

Deve-se notar que apesar da medição do deslocamento máximo do efetuator ou do deslocamento máximo em uma vizinhança do efetuator não constituírem parâmetros suficientes para diferenciar todos materiais, em termos de medições com grande ruído, outros parâmetros podem ser utilizados como auxiliares, como estimativas de raio de deformação, as coordenadas médias em X e Y do conjunto de pontos pertencentes a cada faixa de medição, os segundos maiores deslocamentos, em média, em uma região de deformação, terceiros, e assim por diante. Além da alteração do esforço aplicado, uso de tensões residuais, dentre outras características já enumeradas por esse trabalho. Muitas vezes, a identificação e diferenciação de materiais que apresentam deslocamentos máximos na vizinhança do efetuator semelhante será difícil de ser realizada apenas pela avaliação de uma carga aplicada sobre o material. Finalmente, considerando-se espumas que ainda não sofreram carregamentos superiores a 2 kgf, pode-se verificar que em medições realizadas por câmera, as espumas podem apresentar deslocamentos máximos de vizinhança entre 11 mm e 19 mm para espumas quase-homogêneas e entre 7 mm e 16 mm para espumas heterogêneas, considerando as repetitividades.

5.8.2.3 Teste para Identificação de Espumas

A Tabela 5.6 apresenta os deslocamentos máximos para diferentes objetos, permitindo a diferenciação de materiais em ambiente controlado.

Tabela 5.6: MALD-CN - Identificação de espumas - Deslocamentos máximos (mm) - Legenda: Figura 5.12.

	Objetos	Legenda	D_máx Sem alinhamento (mm)
Quase-Homogêneos	Espuma Cinza	a	15.07
	Espuma Rosa – Tronco de Pirâmide	b	14.81
	Espuma Rosa – Prisma Hexagonal	c	12.84
	Espuma Rosa – Prisma Retangular	d	12.90
	Espuma Verde	e	12.90
Heterogêneos	Rosa_R	f	13.57
	Cinza_R	g	9.09
	Verde_R	h	9.26
	Almofada com Fibras de Silicone	i	42.73
	Almofada com Flocos de Espuma	j	26.35
	Disco com Fibras de Silicone	k	23.70
	Cilindro com Manta Acrílica	l	25.01
	Cubo com Fibras de Silicone	m	49.83
	Objeto com Ar no Interior	n	22.73
	Cilindro com Flocos de Espuma	o	21.21
	Travesseiro de Algodão I	p	36.15
Travesseiro de Algodão II	q	48.45	

Por meio dos deslocamentos máximos na vizinhança, para os diferentes materiais, pode-se diferenciar facilmente as espumas das outras categorias de materiais consideradas nesse experimento. Identificou-se 100% dos objetos constituídos por espumas, validando a utilização do MALD-CN para a identificação de materiais. O deslocamento máximo na vizinhança é uma característica útil para a distinção de materiais, entretanto a utilização completa de todas as curvas de nível, resultantes das diferenças de curvatura antes e após a deformação local na direção Z, permitiria uma maior capacidade de distinção. Dependendo da precisão e acurácia dos instrumentos de medição, do conhecimento do histórico de deformações que um objeto já sofreu e da coordenada real do centro do efetivador, é esperado que o método MALD-CN seja capaz de diferenciar até mesmo materiais que apresentem curvas tensão×deformação próximas como as espumas de baixa densidade rosa, cinza e verde, na pior hipótese, aplicando mais que um carregamento.

5.8.3 Experimentos com o robô

Calibração de Câmera

Os parâmetros intrínsecos correspondem aos comprimentos focais em pixels em X (f_x), em Y (f_y), as coordenadas do ponto principal (c_x , c_y), os parâmetros de distorção da lente e o ângulo α_c entre os eixos do sensor X e Y. Os valores dos parâmetros intrínsecos são, respectivamente, 515.87, 517.47, (319.5, 239.5), [0.16426, -0.36851, -0.00706, 0.00415, 0.00000] e α_c igual a 0.

Os parâmetros extrínsecos referentes a esse Kinect são apresentados na Figura 5.16. Esses parâmetros levam o centro óptico da câmera para o sistema de coordenadas posicionado sobre a bandeja que é exibido nessa mesma figura. Além disso, os eixos X e Y do novo sistema de coordenadas são exibidos nessa mesma imagem.

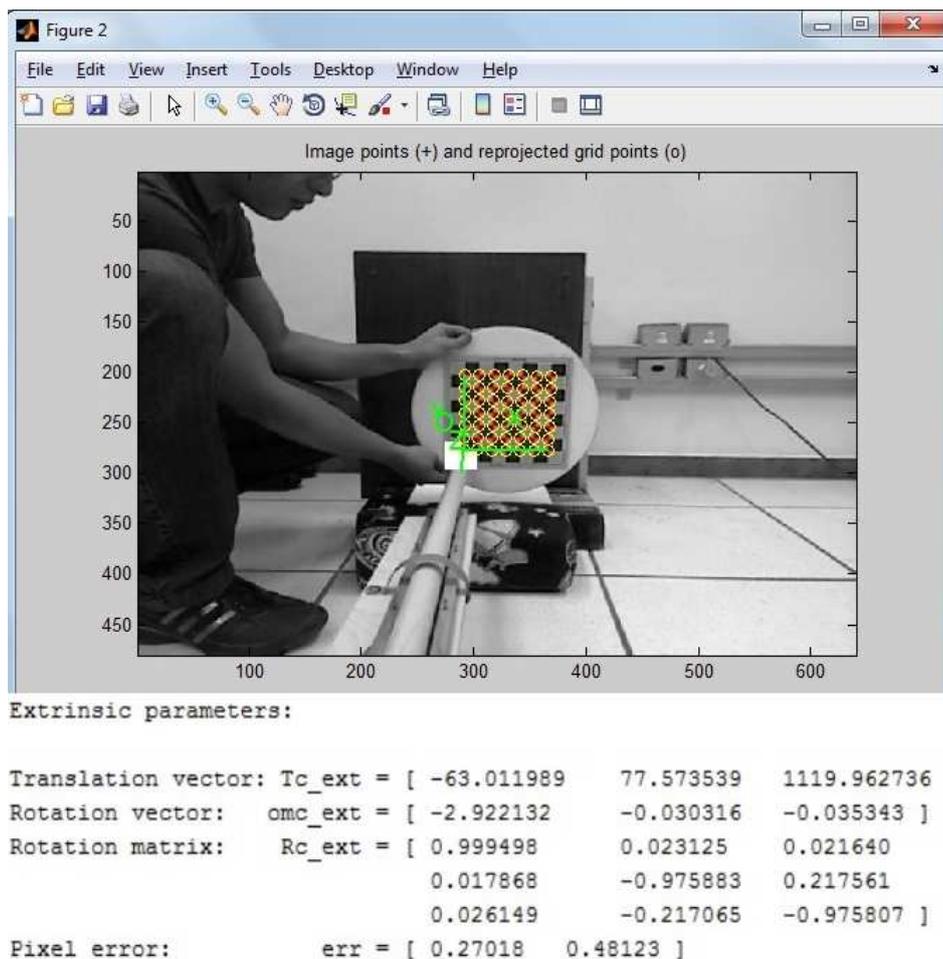


Figura 5.16: Calibração de parâmetros extrínsecos - Kinect do robô.

Diferenciação de Objetos Heterogêneos

Conforme apresentado na Figura 5.17, um objeto de cada vez foi posicionado a frente do robô. Essa imagem contém o robô *TurtleBot*, o atuador linear construído e uma almofada com fibras de silicone.



Figura 5.17: Testes com robô - Diferenciação de materiais - Visão de conjunto.

Utilizou-se o MALD-CN com alinhamento de nuvens de pontos, uma vez que em

alguns testes houve movimento relativo, na direção Z, entre robô e pontos do objeto fora do raio de deformação incerto. As diferentes curvas de nível obtidas, para os diferentes objetos, são apresentadas na Figura 5.18.

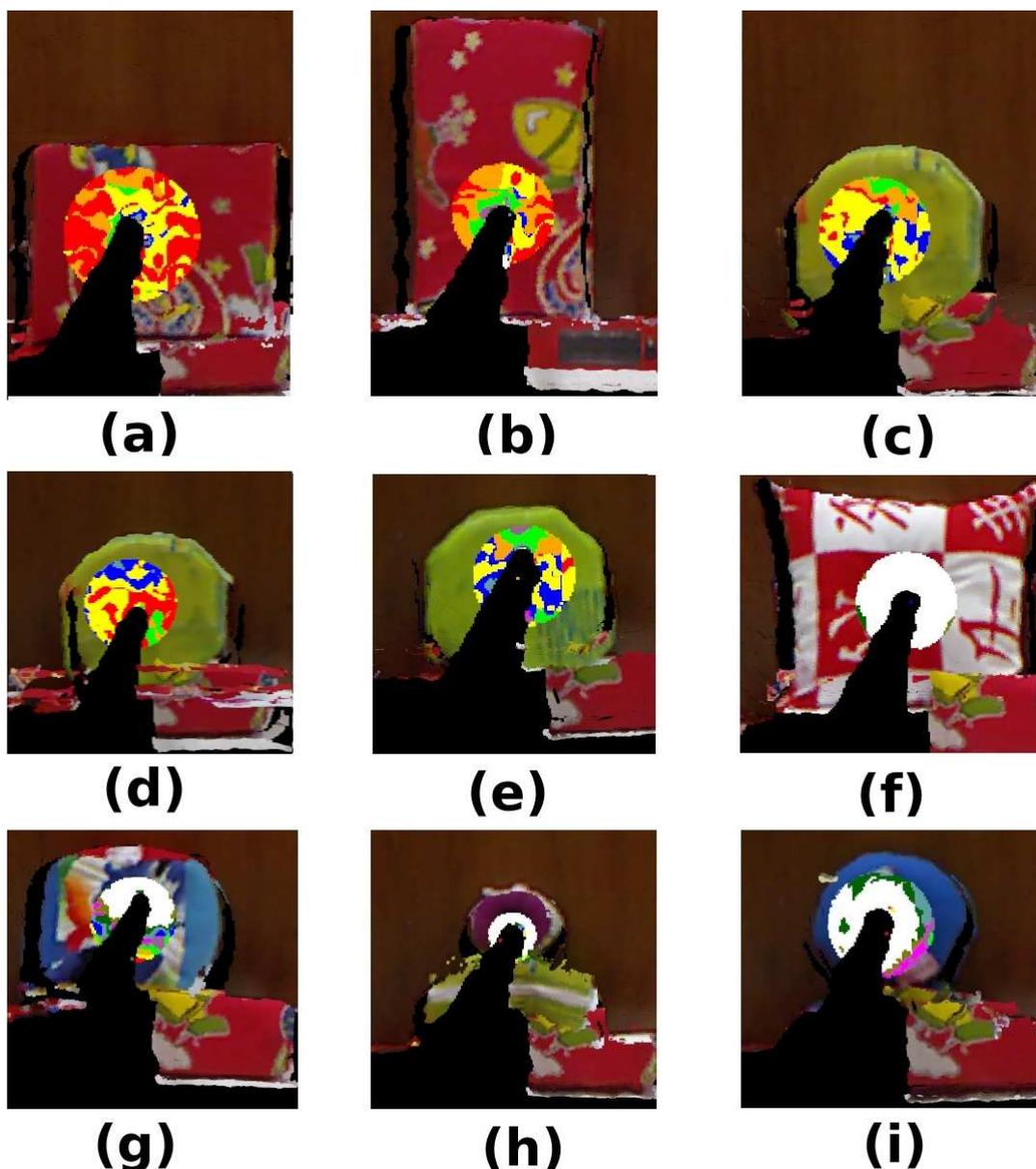


Figura 5.18: MALD-CN - Identificação de espumas - (a) Espuma Cinza. (b) Espuma Rosa. (c) Espuma Rosa I. (d) Espuma Rosa II. (e) Espuma Verde. (f) Almofada com Fibras de Silicone. (g) Cubo com Fibras de Silicone. (h) Cilindro com Manta Acrílica. (i) Disco com Fibras de Silicone. Escala de cores das curvas de nível conforme a Figura 5.11.

Os resultados dos testes de diferenciação de materiais pelo método MALD-CN, utilizando-se o robô, são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: MALD-CN - Diferenciação de objetos heterogêneos - Legenda: Figura 5.18.

Objetos Heterogêneos	Legenda	D_máx Sem alinhamento (mm)	D_máx Com alinhamento (mm)
Espuma Cinza	a	15.1	12.05
Espuma Rosa	b	21.83	11.6
Espuma Rosa I	c	12.42	13.08
Espuma Rosa II	d	11.48	12.28
Espuma Verde	e	44.75	11.69
Almofada com Fibras de Silicone	f	40.72	32.22
Cubo com Fibras de Silicone	g	42.99	25.41
Cilindro com Manta Acrílica	h	33.35	33.33
Disco com Fibras de Silicone	i	27.18	25.04

Por meio dessa tabela, pode-se identificar todos os objetos heterogêneos de duas camadas constituídos por capa e uma espuma de baixa densidade, uma vez que os deslocamentos para espumas situaram-se na faixa de 7 a 16 mm e os outros materiais apresentaram deslocamentos máximos na vizinhança do efetuador maiores que 16 mm. Pode-se verificar que a utilização do alinhamento de pontos a partir de pontos característicos localizados fora do raio de deformação incerto permitiu medições mais corretas de deslocamentos, corrigindo-se parcialmente o erro devido ao movimento relativo do robô em relação a esses pontos.

5.9 Método de Análise Local de Deslocamentos Por Pontos Característicos (MALD-PC)

5.9.1 Prova Conceitual do MALD-PC

O conceito principal do rastreamento de pontos característicos para a identificação de materiais é exibido na Tabela 5.1 no qual diferentes geometrias globais de espumas rosas apresentam aproximadamente a mesma deformação local. Rastrear as posições antes e após a deformação de um conjunto de pontos permite identificar o material, na pior hipótese, utilizando-se mais que um valor de carga aplicada. Isso é uma consequência do fato de a deformação local ser uma propriedade do material associada ao carregamento aplicado, desde que respeite as restrições já descritas. Em outras palavras, se as coordenadas de alguns pontos forem rastreadas antes e após a aplicação de esforços, em uma região deformada, os deslocamentos em X, Y e Z podem ser comparados a dados já tabelados. Identificando-se o material. Como consequência, verifica-se a validade do MALD-PC.

5.9.2 Deslocamentos de referência para o MALD-PC

Comparando-se os deslocamentos máximos obtidos por meio da simulação de espumas rosa (28.2 mm) (Figura 4.21 (b)), cinza (18.67 mm) (Figura 4.24 (b)) e verde (24.81 mm) (Figura 4.30 (c, d)) aos deslocamentos máximos obtidos por ensaios rápidos no mundo real (22.20, 18.90 e 18) (mm) (Tabela 5.2), respectivamente, pode-se verificar que as simulações de espuma rosa e verde apresentaram 5.5 mm e 6.8 mm de erro, respectivamente, em relação ao valor medido para profundidade máxima em experimentos reais. Enquanto que a simulação para a espuma cinza apresentou menos que 1 mm de erro em relação aos valores reais de profundidade máxima. Como consequência, os deslocamentos obtidos por meio de simulação para a espuma cinza foram utilizados para identificar os objetos constituídos por qualquer tipo de espuma uma vez que o deslocamento da espuma cinza é próximo aos deslocamentos máximos das espumas rosa e verde, além das três espumas rosa, cinza e verde apresentarem raios de deformação próximos (40, 40, 35) (mm), respectivamente, os quais foram obtidos por medição precisa em experimentos reais, após a aplicação de um carregamento de 2 kgf sobre uma área circular de raio 16 mm.

A Tabela 5.8 contém os deslocamentos de referência que foram utilizados para a identificação de materiais pertencentes a categoria de espumas de baixa densidade.

Espuma Cinza										
Deslocamentos esperados em Z Teste no mundo real – Prisma Retangular					Deslocamentos esperados em X, Y, Z Simulação – Cilindro R60 P120					
Distância Radial	M1	M2	M3	Média	X	Y	Z	Ux	Uy	Uz
20	15.00	15.00	16.00	15.33	0	20	120	0	0	-15
24	12.00	12.00	12.00	12.00	0	24	120	0	0	-13
28	8.00	9.00	9.00	8.67	0	28	120	0	-2	-10
32	6.00	6.00	6.00	6.00	0	32	120	0	-3	-7
36	5.00	4.00	4.00	4.33	0	36	120	0	-3	-5
40	0	0	0	0	0	40	120	0	-3	-3
					0	44	120	0	-2	-2
					0	48	120	0	-2	-2
					0	52	120	0	-2	-1
					0	56	120	0	-2	-1
					0	60	120	0	-2	-1
					0	64	120	0	-2	0
					0	68	120	0	-2	0
					0	72	120	0	-2	0

Tabela 5.8: Experimentos reais e por simulação - Deslocamentos esperados (mm).

Comparando-se os deslocamentos obtidos pela simulação aos deslocamentos obtidos por experimentos reais, na direção Z, verifica-se que a simulação para a espuma cinza apresentou valores próximos aos obtidos em testes reais. Para pontos a distância radial de 20, 24, 28, 32, 36 e 40 (mm), os deslocamentos esperados em Z, obtidos pela simulação, foram (15, 13, 10, 7, 5, 3) enquanto que os valores obtidos por meio de testes reais foram de aproximadamente (15, 12, 9, 6, 4, 0), respectivamente.

5.9.3 Diferenciação de Materiais

O mesmo procedimento geral, para a realização dos testes de diferenciação de materiais, adotado na seção referente ao MALD-CN foi utilizado para os testes de diferenciação de materiais pelo MALD-PC. As tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os resultados dos experimentos em ambiente controlado e em experimentos por robô, utilizando-se o MALD-PC, para a identificação de espumas. Essas tabelas apresentam o número de pontos característicos localizados fora do raio de deformação incerto $Núm_PC_Externo$, dentro do raio de deformação incerto $Núm_PC_Interno$, o centro do efetuador encontrado (O_x, O_y, Z) no plano XY, a distância radial R para o centro do efetuador encontrado ou em relação ao ponto $(0, 0, Z)$, no caso de o centro do efetuador não ser encontrado, e a conclusão do algoritmo determinando se o material é uma espuma ou não. No caso de o objeto ser espuma, a distância radial R e o deslocamento Z indicam alguns pontos que estão no raio de deformação incerto. Caso contrário, indicam alguns pontos

característicos localizados fora do raio de deformação incerto ou o número de *keypoints* encontrados em relação ao número de *keypoints* esperados.

Ambiente Controlado - Identificação de espumas - Com câmera

A Tabela 5.9 apresenta a identificação de espumas pelo MALD-PC. Por meio dessa tabela, pode-se verificar que todas as espumas foram identificadas corretamente com exceção do cilindro com flocos de espuma, uma vez que não apresenta como um dos componentes espumas homogêneas rosa, cinza ou verde.

	Objetos	Legenda	Núm_PC Externo	Núm_PC Interno	Ox	Oy	R1	Z1	R2	Z2	R3	Z3	É espuma?
Quase-Homogêneos	Espuma Cinza	a	96	14	0	0	28	9	38	4	47	1	Sim
	Espuma Rosa Tronco de Pirâmide	b	80	9	0	0	35	2	42	1	45	0	Sim
	Espuma Rosa Prisma Hexagonal	c	92	26	5	0	21	12	32	6	52	1	Sim
	Espuma Rosa Prisma Retangular	d	118	18	3	0	31	4	39	1	48	1	Sim
	Espuma Verde	e	107	14	0	0	28	8	32	5	36	2	Sim
Heterogêneos	Rosa_R	f	31	3	5	15	30	6	41	1	62	1	Sim
	Cinza_R	g	51	13	16	1	28	2	34	2	41	1	Sim
	Verde_R	h	33	15	13	0	36	6	39	4	43	2	Sim
	Almofada com Fibras de Silicone	i	12	0	-	-	-	-	-	-	-	-	Não
	Almofada com Flocos de Espuma	j	30	1	-	-	62	10	64	8	65	8	Não
	Disco com Fibras de Silicone	k	53	3 < 4	-	-	-	-	-	-	-	-	Não
	Cilindro com Manta Acrílica	l	8	0 < 5	-	-	-	-	-	-	-	-	Não
	Cubo com Fibras de Silicone	m	8	0 == 0	-	-	-	-	-	-	-	-	Não
	Objeto com Ar no Interior	n	5	13	-	-	67	18	-	-	-	-	Não
	Cilindro com Flocos de Espuma	o	19	2	15	0	27	6	30	4	-	-	Sim
	Travesseiro De Algodão I	p	29	2	-	-	61	12	67	19	73	7	Não
Travesseiro De Algodão II	q	11	3	-	-	71	10	-	-	-	-	Não	

Tabela 5.9: MALD-PC - Diferenciação de materiais em ambiente controlado - Legenda refere-se a Figura 5.12 - Todas medidas estão em mm.

Embora haja presença de ruído no ambiente, mostrou-se que a identificação de materiais por meio da técnica MALD-PC apresentou mais que 94% de acerto. Os erros poderiam ser contornados, por exemplo, utilizando-se instrumentos de medição menos susceptíveis a ruído assim como mais de um valor de carga aplicada. Esse método é fortemente dependente de encontrar-se um grande número de pontos característicos

na região de deformação, quanto maior o número de *keypoints*, e maior a certeza das coordenadas em relação ao centro do efetuador, maior será a acurácia desse método.

Testes com Robô

A Tabela 5.10 apresenta a diferenciação de materiais por meio da técnica MALD-PC utilizando um robô. Por meio dessa tabela, pode-se verificar que a espuma cinza foi identificada corretamente assim como os materiais que não correspondem a espumas.

Objetos Heterogêneos	Legenda	Núm_PC Externo	Núm_PC Interno	Ox	Oy	R1	Z1	R2	Z2	R3	Z3	É espuma?
Espuma Cinza	a	22	2	2	-16	34	2	41	3	-	-	Sim
Almofada com Fibras de Silicose	f	39	8	-	-	56	25	57	21	68	21	Não
Cubo com Fibras de Silicose	g	17	4	-	-	75	10	58	20	66	13	Não
Cilindro com Manta Acrílica	h	18	3	-	-	58	8	58	11	-	-	Não
Disco com Fibras de Silicose	i	12	9	-	-	65	13	70	13	-	-	Não

Tabela 5.10: MALD-PC - Diferenciação de materiais por robô.

Verificou-se um percentual de acerto de 100% para a identificação de espumas e não-espumas. Algumas vezes, quando o robô pressiona um material ele pode se mover para trás devido a não existência de atrito suficiente com o chão, como resultado o alinhamento de nuvens de pontos passa a ser essencial. Entretanto, algumas vezes, o alinhamento de nuvens de pontos pode ser mal realizado, principalmente devido a existência de poucos característicos fora da região de deformação, o que irá produzir um alinhamento grosseiro ruim e conseqüentemente os valores de deslocamento poderão ser afetados. Além disso, o ruído nas medições do Kinect aumenta conforme a distância, o que prejudica a determinação de deslocamentos de pontos, necessitando da utilização de tolerâncias. A técnica de Centro Flutuante mostrou ser uma boa alternativa para situações em que a posição do centro do efetuador não é conhecido com grande acurácia.

5.10 Identificação de Materiais - Comparação entre Tempos de Execução

Com o objetivo de comparar o tempo necessário para a identificação de materiais pelos métodos MALD-CN, MALD-PC e o MEFI, os tempos de execução necessários para a identificação de espumas rosa, cinza e verde foram medidos. Para os testes referentes ao MALD-CN e MALD-PC, utilizaram-se espumas quase-homogêneas. Na simulação no

software de elementos finitos, determinaram-se os tempos de execução para o cálculo da deformação de um cilindro R60 P120 constituído por uma espuma homogênea em cada teste. A Tabela 5.11 apresenta os tempos de execução necessários para cada um dos métodos.

Tabela 5.11: Diferentes Espumas - Comparação entre tempos de execução.

Material	Tempo de Execução (s)			Simulação de Deformação De Um Cilindro No ANSYS
	MALD-CN Sem Alinhamento de Nuvens de Pontos	MALD-CN Com Alinhamento de Nuvens de Pontos	MALD-PC	
Espuma Cinza	1.03	1.34	1.58	139.00
Espuma Rosa	1.17	1.29	1.34	220.00
Espuma Verde	1.14	1.31	1.37	156.00

Observando a Tabela 5.11, verifica-se que para a identificação de espumas, o MALD-CN sem o alinhamento de nuvens de pontos apresentou os menores tempos de execução devido a não necessitar de etapas de detecção e descrição de *keypoints* e de alinhamento de nuvens de pontos. Da mesma forma, o MALD-CN com alinhamento de nuvens de pontos apresentou tempos de execução menores que o MALD-PC, isso se deve ao fato de o MALD-PC utilizar a técnica de **Centro Flutuante** o que aumenta o tempo de execução necessário. Os métodos MALD-CN e MALD-PC apresentaram tempos de execução inferiores a 1.6 segundos para a identificação de espumas.

De forma oposta, a simulação de deformação de um cilindro necessitou no mínimo de 139 segundos. Isso significa que se o objeto real que foi deformado apresentasse um formato cilíndrico, na melhor hipótese (que seria alguma espuma ser testada de primeira no *software* de elementos finitos), seriam necessários 139 segundos para identificar o material. Entretanto, considerando a mesma geometria e caso houvesse N materiais, supondo uma relação linear (na prática pode ser bem pior que isso), o tempo de execução poderia ser algo como 139 segundos multiplicado por N. Isso é ainda mais agravado em situações que o objeto apresente uma geometria global externa mais complexa e malhas mais refinadas, nesses casos os tempos de execução cresceriam acentuadamente para simulações em *softwares* de elementos finitos e as vantagens dos métodos implementados, em termos de tempos de execução, seriam ainda maiores. Verifica-se que os métodos MALD-CN e MALD-PC permitem a identificação de materiais por análise de deslocamentos em sistemas de tempo real crítico ou suave ao contrário do MEFI.

5.11 Discussão sobre a validade dos métodos propostos

Quanto à geometria

Os objetos devem apresentar dimensões de pelo menos o raio mínimo do cilindro e a espessura mínima, conforme afirmado pela hipótese do trabalho e validado por meio de simulações e experimentos em ambiente real. Somente para essas condições, a deformação local é constante, de forma geral considerando constantes as propriedades intrínsecas e extrínsecas dos materiais, e conseqüentemente os métodos MALD-CN e MALD-PC podem ser aplicados. O efeito das tensões residuais e da não-homogeneidade podem ser tratados como incertezas.

Quanto à homogeneidade

Os métodos MALD-CN e MALD-PC, em termos de homogeneidade, são válidos para objetos homogêneos ou quase-homogêneos de forma semelhante a maioria dos métodos de identificação de materiais apresentados na literatura, considerando as mais diversas estratégias de identificação de materiais, não apenas as baseadas em análise de deslocamentos. Além disso, ambos os métodos podem ser válidos para a identificação do material que constitui a parte interior de um objeto heterogêneo de duas camadas, sendo uma a capa e a outra uma região homogênea, desde que a rigidez da capa não seja muito maior que a rigidez do material em seu interior.

Quanto à elasticidade

Em termos de elasticidade, os métodos podem ser utilizados para identificar objetos que são constituídos por materiais elástico, viscoelástico, hiperelástico e elastoplástico. Para materiais pertencentes a categoria de plásticos, estudos posteriores serão necessários. Entretanto é provável que os métodos de análise local de deslocamentos não sejam indicados a objetos que apresentem essa categoria de material, uma vez que objetos plásticos apresentam praticamente somente deformações permanentes. Outros métodos provavelmente serão melhores para materiais plásticos.

Quanto à rigidez

Quanto menor a rigidez de um material, com menores esforços um objeto constituído por esse material sofrerá deformações elásticas e deformações visíveis, facilitando a

aplicação dos métodos MALD-CN e MALD-PC por meio de câmeras. Caso os materiais apresentem grande rigidez, eles precisarão de grandes esforços para causar uma deformação elástica, e os objetos deverão apresentar grandes valores de raio de cilindro e espessura do objeto. Como consequência, torna-se mais interessante medir a resistência à deformação plástica local por meio de métodos de medição de dureza. O procedimento utilizado nesse trabalho para aplicação de esforços deverá ser sutilmente modificado de forma a transformar o procedimento realizado em um procedimento de medição de dureza.

Quanto à dureza

A dureza é definida pela resistência a deformação permanente. No caso de materiais de baixa dureza Shore, a aplicação de pequenos esforços poderá provocar deformações permanentes. Caso os materiais apresentem durezas um pouco mais elevadas, pode-se aplicar esforços pequenos e verificar os deslocamentos, conforme os procedimentos dos métodos MALD-CN e MALD-PC do presente trabalho. Entretanto se os materiais apresentarem durezas elevadas, o procedimento para realização de testes sobre a análise da deformação local de um objeto deverá ocorrer por meio da aplicação de um esforço por um cilindro de aço associado a uma ponta cilíndrica de diamante sintético, similar ao método de medição de dureza Rockwell, uma vez que para grandes aplicações de esforços é necessário que um material seja extremamente duro, para realizar a deformação local. Nesses casos, testes em ambientes controlados como laboratórios serão necessários.

Quanto à textura

Os métodos MALD-CN e MALD-PC trabalham com qualquer tipo de objeto, desde que a capa de baixa rigidez, grande número de pontos característicos e que não absorva infravermelho seja colocada sobre o objeto analisado.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusão

O presente trabalho apresentou um estudo a respeito da deformação local de materiais com o intuito de responder ao questionamento “É possível identificar qual o tipo de material que constitui um objeto conhecendo-se apenas a curvatura local inicial e os deslocamentos de pontos após a aplicação de um esforço de módulo desconhecido?”.

Validou-se por meio de simulações e experimentos reais, utilizando materiais que sofrem grandes deformações com pequenos esforços, que os deslocamentos locais de um objeto homogêneo são aproximadamente constantes para uma dada curvatura de superfície, de forma geral considerando constantes as propriedades intrínsecas e extrínsecas dos materiais, desde que respeite o raio maciço mínimo e a espessura mínima. O efeito das tensões residuais e da não-homogeneidade podem ser tratados como incertezas.

A deformação local de um objeto é dependente do módulo do esforço aplicado e das curvas tensão×deformação de cada material, conforme demonstrado ao longo do trabalho. Em outras palavras, identificar materiais com base na análise de deslocamentos sem nenhum conhecimento a respeito do módulo do esforço aplicado é inviável. Entretanto, caso seja conhecida em que faixa de valores um esforço é aplicado, uma faixa de deformações locais esperadas seria obtida e conseqüentemente, a identificação do material seria realizada. Quanto maior o conhecimento do módulo do esforço aplicado, do histórico de carregamentos sobre um objeto o qual define as tensões residuais, da homogeneidade em termos de composição (homogêneo, quase-homogêneo ou heterogêneo de duas camadas) e da densidade de um objeto, mais precisa será a identificação de materiais. No melhor caso, o esforço aplicado é constante e apresenta módulo conhecido.

Como principais contribuições deste trabalho, dois novos métodos para a identi-

ificação de materiais, MALD-CN e MALD-PC, foram propostos e validados. Também foram realizadas uma análise de modelos de materiais hiperelásticos, de simulações por meio do Método de Elementos Finitos (MEF), uma avaliação de diversos efeitos que influenciam na deformação local de um material e experimentos de identificação de materiais.

MALD-CN e MALD-PC

Para o correto alinhamento de nuvens de pontos e a aplicação dos métodos MALD-CN (com alinhamento) e MALD-PC, um grande número de pontos característicos sobre a região de deformação real é necessário. Como consequência, foi proposto o uso de capas de baixa rigidez, com grande número de pontos característicos e que não absorvam o sinal infravermelho, sobre objetos homogêneos e heterogêneos. Adotou-se o termo quase-homogêneo para designar objetos homogêneos com esse tipo de capa.

O MALD-CN utilizou o conceito de deslocamento local máximo e apresentou duas implementações, uma sem alinhamento de nuvens de pontos e outra com alinhamento. A possibilidade de identificar materiais em superfícies sem textura é uma vantagem do MALD-CN em relação ao MALD-PC. Ambas as implementações apresentaram um desempenho de 100 % de acerto na identificação de espumas tanto em ambiente controlado como nos testes de identificação de materiais por meio de robô. Conforme demonstrado por esse trabalho, o deslocamento máximo não permite a diferenciação de todos os materiais, aplicando somente um valor de carregamento, mas associado a outras propriedades como tensões residuais, comportamento devido a fadiga, diferentes carregamentos, raio de deformação, permite uma maior acurácia na identificação de materiais. Quando houve movimento relativo, na direção Z, entre o robô e pontos localizados fora do raio de deformação incerto, utilizou-se o MALD-CN com o alinhamento entre nuvens de pontos. Esse método apresentou um pequeno tempo de execução, mostrou-se capaz de trabalhar com ambientes ruidosos, desde que o ruído não seja totalmente aleatório assim como o ruído apresentado pelo Kinect 1.0.

O método MALD-PC permitiu a identificação de materiais pela análise de deslocamentos de pontos característicos situados, após a aplicação de um esforço, dentro do círculo definido pelo raio de deformação incerto. Esse método apresentou como grande vantagem o seu tempo de execução pequeno e a capacidade de rastrear os deslocamentos de pontos, permitindo uma melhor comparação (nas direções X, Y e Z) entre os deslocamentos obtidos por experimentos reais e os dados obtidos por simulação. Apresentou acurácia superior a 94% em aquisições ruidosas, adquiridas por câmera, tanto em testes realizados em ambiente controlado como na diferenciação de materiais por

robô. A utilização do conceito de Centro Flutuante permitiu que esse método fosse aplicado em situações em que o centro do efetuador, no instante imediatamente anterior a deformação, a origem do sistema de coordenadas, não seja conhecido com grande acurácia à priori.

Ambos os métodos propostos oferecem a área de identificação de materiais, principalmente no que se refere a materiais de grande deformação com pequenos esforços, métodos de grande velocidade de processamento ao contrário do Método de Elementos Finitos Inverso e métodos de fácil aplicação em campo, em ambientes com pouco controle do processo, ao contrário dos métodos de dureza. Na área de robótica, materiais poderão ser identificados em tempo real aplicando os métodos MALD-CN e MALD-PC, sendo úteis para encontrar superfícies com propriedades específicas, permitir interações hápticas e realizar simulações à respeito da interação robô e objeto.

6.2 Trabalhos Futuros

Estudos de Modelos de Materiais Hiperelásticos: estudo da aplicação do MALD-PC para a criação de modelos de materiais de forma automática. Essa aplicação seria extremamente interessante, uma vez que os modelos de materiais propostos na literatura, muitas vezes, não ajustam corretamente curvas aos dados obtidos experimentalmente, resultando em simulações com baixa acurácia.

Imagens de Microscópio: estudo da aplicação do MALD-CN e MALD-PC para a identificação de materiais em imagens adquiridas por meio de um microscópio. Ou seja, analisando a microestrutura de um material.

Propriedades Mecânicas dos Materiais: estudo da correlação entre as deformações locais provocadas por um dado esforço sobre uma área e as propriedades mecânicas, por exemplo, a tensão de escoamento. Isso seria útil para aplicações de engenharia. Como os ensaios de dureza são semelhantes, no que se refere a análise local de deslocamentos, aos métodos propostos e por meio da dureza pode-se inferir algumas propriedades mecânicas, como a tensão de escoamento, é natural esperar que esses métodos possam estimar as mesmas propriedades.

Modelos Foto-Háptico-Realísticos: criação de ambientes virtuais com propriedades foto-realísticas e háptico-realísticas. As propriedades dos materiais poderão ser determinadas por meio da utilização de robôs e aplicação dos métodos propostos por esse trabalho. Como consequência, além da modelagem tridimensional de um ambiente

interno e dos seus materiais, as propriedades sensoriais poderão ser reproduzidas por meio de um dispositivo háptico como o *Geomagic touch*, resultando em sistemas de tele-existência de maior realismo.

Apêndice A

Resistência dos Materiais - Conceitos Fundamentais

A.1 Esforços

Os esforços (Figura A.1) são classificados como forças ou momentos. As forças podem ser divididas em força normal e força de cisalhamento. A força normal corresponde a uma força aplicada perpendicularmente em relação a uma área, podendo ser de compressão ou tração. A força de cisalhamento tende a provocar o deslizamento entre duas partes de um corpo. Já os momentos podem ser classificados como momento de torção (torque), no qual cargas externas tendem a torcer uma parte do corpo em relação a outra, ou momento fletor, no qual cargas externas tendem a fletir (dobrar) o corpo em relação a um eixo paralelo a uma seção de corte imaginária.

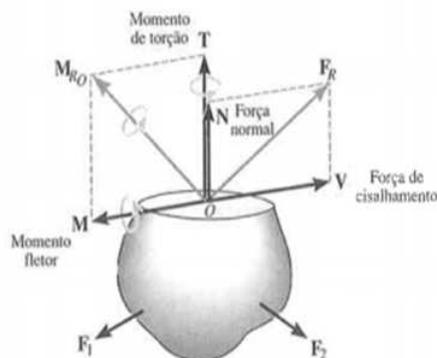


Figura A.1: Tipos de esforços. (Fonte: HIBBELER [2007])

A.2 Tensões (σ)

As tensões correspondem a razão entre as forças internas atuantes sobre uma área de um material e o módulo da área. Podem ser classificadas como tensões normais ou tensões de cisalhamento. As tensões normais atuam perpendicularmente a uma seção transversal de um objeto no sentido de esticá-lo, tração, ou no sentido de comprimi-lo, denominado compressão. Já as tensões de cisalhamento tendem a atuar em um plano paralelo a uma seção transversal de um objeto, provocando deslizamento entre duas faces de um objeto.

A.3 Deformações

As deformações correspondem a uma mudança de geometria de uma parte ou de todo um objeto devido a aplicação de esforços externos. A deformação pode ser normal ou angular dependendo do tipo dos esforços externos atuantes sobre um corpo (HIBBELER [2007]). Conforme apresentado na Figura A.2, a deformação normal resulta na mudança de comprimento do segmento AB de Δs para $\Delta s'$ enquanto a deformação por cisalhamento provoca uma alteração do ângulo entre os segmentos de reta AC e AB.

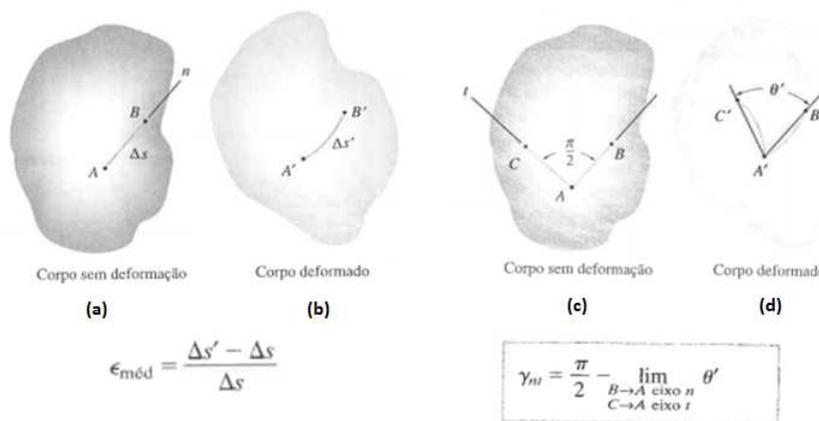


Figura A.2: Deformação normal (a, b) e deformação por cisalhamento (c, d). (Fonte: HIBBELER [2007])

Além disso, as deformações podem ser divididas em elásticas e plásticas. As deformações elásticas se caracterizam por desaparecerem quando os esforços externos deixam de ser aplicados. Já as deformações plásticas se caracterizam por permanecerem, alterando a geometria de um objeto, quando os esforços deixam de ser aplicados.

Deformação de Engenharia (ε)

A deformação de engenharia é calculada pela diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial, em uma determinada direção, dividido pelo comprimento inicial. Por exemplo, no caso dos ensaios de compressão uniaxial realizados neste trabalho (presentes no Capítulo 4), nos gráficos, o eixo horizontal corresponde a deformação de engenharia (chamada de forma simplificada por deformação). Nesses gráficos, calculou-se o valor de deformação de engenharia a cada instante pela diferença entre a espessura atual da espuma e a espessura inicial, dividido pela espessura inicial.

A.4 Deslocamentos

O deslocamento consiste na alteração da posição de um ponto, por exemplo, devido a existência de um esforço externo ou de um movimento inercial. Apesar de quase toda deformação provocar alterações nas posições iniciais e finais de um conjunto de pontos, ou seja, provocar os deslocamentos de um conjunto de pontos, é importante notar que os conceitos de deformação e deslocamento não são sinônimos.

A.5 Tipos de Carregamentos

Há três tipos de carregamentos principais denominados estático, quase-estático e dinâmico. O primeiro consiste em um carregamento no qual os esforços aumentam ou decrescem de modo extremamente lento até um valor final. Então o carregamento permanece sem variar ao longo do tempo. O carregamento quase-estático consiste em um tipo de carregamento no qual um esforço é aplicado de uma só vez. Após a aplicação, o esforço permanece constante. Já o carregamento dinâmico diz respeito a carregamentos que variam ao longo do tempo.¹

¹Azevedo: <http://www.domingosdeazevedo.com/mef/car>

Apêndice B

Medição de Dureza

A dureza pode ser definida como a resistência de um material a deformação plástica localizada (e.g., risco, penetração) (Callister & Rethwisch [2007]). Como consequência, quanto maior a dureza, maior é o esforço necessário para provocar uma deformação local permanente em um material. Um exemplo de medição de resistência ao risco é a dureza Mohls. Referente a resistência a penetração, existem diversas estratégias como Meyer, Rockwell, Brinell e Vickers. A dureza Shore pode ser utilizada como medida de resistência ao impacto. Em geral, os métodos de medição de dureza baseiam-se na aplicação de forças constantes sobre uma pequena região de um objeto por meio de um penetrador (endentador) de geometria conhecida (e.g., esférico, cônico, etc) cujo material apresenta alta dureza (Callister & Rethwisch [2007]). Aplicam-se forças maiores que 1 kgf (e.g., Meyer, Rockwell, Brinell, Vickers, Shore, dentre outros), em ensaios de macrodureza, e menores que 1 kgf, em ensaios de microdureza como Vickers e Knoop.

Alguns métodos para medição de dureza apresentam uma ou mais geometrias de penetradores, podendo ter também uma ou mais etapas de aplicação de carga como o método Rockwell. Após realizar a aplicação de esforço local, durante um período de tempo pré-determinado, medem-se algumas dimensões da região local deformada. Cada método apresenta equações distintas de medição de dureza, resultando em escalas de dureza distintas. A determinação da dureza de um material permite, muitas vezes, a identificação do material.

Cada um dos métodos de medição de dureza apresenta vantagens e desvantagens, sendo recomendados para diferentes aplicações. O método de medição de dureza Shore é recomendado para medição de dureza de materiais macios como elastômeros, outros ensaios são recomendados para materiais que apresentam durezas elevadas (e.g., Rockwell), e em situações que requeiram uma ampla faixa de medições de dureza, o

método Vickers pode ser utilizado (Rodrigues [2016]).

A maioria das estratégias de medição de dureza requerem um ensaio controlado em laboratório. Uma das exceções é o método de dureza Shore o qual pode ser realizado utilizando-se um equipamento portátil (Rodrigues [2016]). Esse método permite a medição de dureza de grande parte dos materiais que sofrem grandes deformações com pequenos esforços.

A seguir, as técnicas de medição Rockwell, Brinell e Shore serão detalhadas. É importante notar que os métodos para identificação de materiais propostos nesse trabalho, apesar de não serem estratégias de medição de dureza, apresentam algumas similaridades com essas técnicas, principalmente em relação a análise de deformação local.

B.1 Medição de Dureza - Rockwell

No teste de medição de dureza Rockwell (Figura B.1), um endentador comprime uma região de um material. O endentador pode ser esférico de aço endurecido e apresentar diâmetros de 1.588, 3.175, 6.350, ou 12.70 (mm). Para materiais mais duros, um endentador de diamante cônico é utilizado. O método Rockwell determina a dureza de um material baseando-se na diferença entre a profundidade de medição obtida por meio da aplicação de uma carga inicial e uma carga final. (Callister & Rethwisch [2007])

Existem dois tipos de testes para medição de dureza Rockwell, um é denominado Rockwell e o outro Rockwell superficial. Nos testes de medição de dureza Rockwell a carga menor aplicada é de 10 kg e a carga maior apresenta o valor de 60, 100 ou 150 kg. Para o método Rockwell superficial, a carga menor aplicada é de 3 kg e a maior pode apresentar o valor de 15, 30 ou 45 kg.

A região deformada é alterada caso o objeto testado seja muito fino, se as cargas forem aplicadas próximas a regiões de borda ou se forem aplicadas próximo a outras regiões já deformadas por outros endentadores. Para o método Rockwell, a espessura do objeto testado deve ser de pelo menos 10 vezes a profundidade máxima deformada. A precisão também é dependente da curvatura de uma superfície. (Callister & Rethwisch [2007]) O tempo de aplicação das cargas é variável, geralmente o ensaio completo demora menos que 10 segundos ¹.

¹Instron - Rockwell Hardness: <http://www.instron.us/en-us/our-company/library/test-types/hardness-test/rockwell-hardness-test>

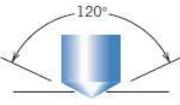
Teste	Endentador	Formato do endentador		Carga	
		Vista lateral	Vista superior		
Rockwell e Rockwell Superficial	Cone de diamante e esferas de aço			60 kg	Rockwell
				100 kg	
				150 kg	
				15 kg	Superficial Rockwell
				30 kg	
				45 kg	

Figura B.1: Método Rockwell para medição de dureza. (Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch [2007])

B.2 Medição de Dureza - Brinell

O método de medição de dureza Brinell (Figura B.2) consiste na compressão de uma região local de um material por um endentador esférico. O endentador geralmente é composto por aço endurecido e apresenta 10 mm de diâmetro. As cargas aplicadas variam entre 500 e 3000 kg e o tempo de aplicação da carga varia de 10 a 30 segundos. (Callister & Rethwisch [2007])

Após a aplicação das cargas, mede-se o diâmetro da região deformada plasticamente. Em seguida, os diâmetros da região deformada e do endentador são substituídos na equação correspondente. O medidor de dureza Brinell não é recomendado para materiais macios como espumas, elastômeros.

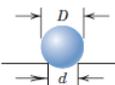
Teste	Endentador	Formato do endentador		Carga	Fórmula para o cálculo da dureza
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Esfera de aço ou carbeto de tungstênio com 10mm de diâmetro			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$

Figura B.2: Método Brinell para medição de dureza. (Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch [2007])

B.3 Medição de Dureza - Shore

O método de medição de dureza Shore (Figura B.3) baseia-se na soltura de um cilindro de aço com peso padronizado (2.5 N) de uma altura pré-determinada (256 mm). O cilindro de aço apresenta uma ponta arredondada cujo material é diamante. Após a soltura, a ponta de diamante do cilindro se choca com um corpo de prova. Quanto menor a dureza do corpo de prova, maior será o deslocamento do cilindro. Os ensaios devem ser realizados com superfícies lisas, uma vez que a rugosidade influencia na

profundidade máxima atingida, além disso, não se deve realizar vários impactos sobre o mesmo ponto. Esse método é utilizado para medição de dureza de materiais macios como elastômeros e espumas. Existem diferentes escalas de medição de dureza Shore as quais não apresentam correlação entre si, elas diferem quanto ao tipo de endentadores, molas, extensões do endentador e suportes. As escalas A e D são as mais utilizadas. (Rodrigues [2016])

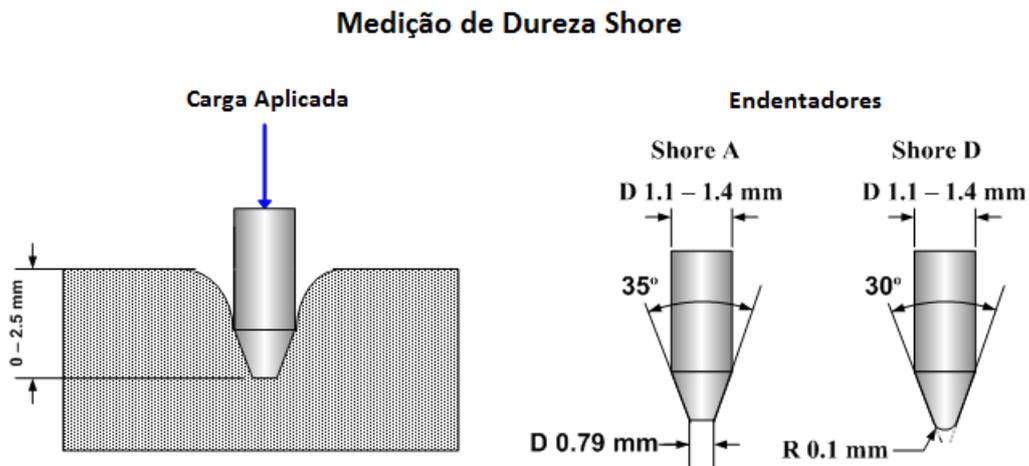


Figura B.3: Método Shore para medição de dureza.
(Fonte: Substech ²)

²Substech - Dureza Shore: <http://www.substech.com>

Apêndice C

Ensaio de compressão uniaxial

Ensaaios de compressão uniaxial correspondem a ensaios no qual um corpo de prova é posicionado sobre uma máquina e, geralmente, uma força uniformemente distribuída é aplicada sobre uma das faces do corpo de prova. Além disso, o corpo de prova apresenta restrição de movimentação somente na direção oposta a aplicação de carga, apresentando expansão lateral livre. A Figura C.1 apresenta uma imagem de uma máquina de ensaios universal Instron 5882 com um corpo de prova laranja, momentos antes do início do ensaio de compressão uniaxial.

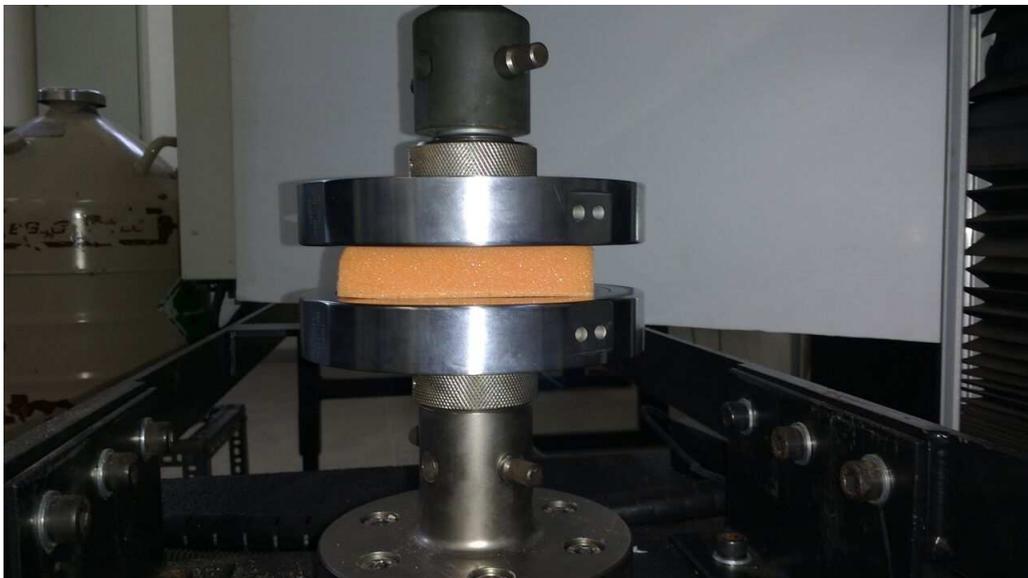


Figura C.1: Ensaio de compressão uniaxial - Corpo de prova de uma espuma laranja em uma máquina de ensaios universal Instron 5882.

Apêndice D

Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) consiste em dividir um modelo que representa um objeto em um conjunto de partes menores denominadas elementos. Existem diferentes tipos de elementos como triangulares, planos, tetraedros, dentre outros. Cada um é recomendado para situações distintas como para materiais elásticos, plásticos, hiperelásticos, situações de análise de esforços bidimensionais ou tridimensionais, dentre outras características. Cada elemento é composto por um conjunto de nós. As condições de contorno, esforços aplicados e restrições de movimento, podem ser aplicados diretamente sobre as faces de um objeto ou sobre um conjunto de nós. Além disso, o MEF necessita da criação de uma malha. Informa-se as curvas tensão×deformação em propriedades do(s) material(is) para cada objeto ou outras propriedades, dependendo da classificação quanto a elasticidade de cada material. Resolve-se então um sistema de equações do tipo $\{X\} = \{K\}/\{F\}$, obtendo-se o deslocamento X de cada um dos nós, por meio do conjunto de forças aplicadas F e da matriz de rigidez K .

Método de Elementos Finitos Inverso

De forma geral, em *softwares* de elementos finitos, por meio de esforços, restrições, modelo do objeto e propriedades do material como, por exemplo, a curva tensão×deformação, computam-se os deslocamentos de um conjunto de pontos do objeto. No caso do Método de Elementos Finitos Inverso (MEFI) não se tem as propriedades do material à priori. Como resultado, o que o MEFI propõe, geralmente, é alterar os parâmetros de entrada associados ao tipo do material (e.g., curva tensão×deformação do material) sucessivamente, computando a deformação obtida e calculando uma similaridade entre o objeto deformado na simulação e o objeto deformado no mundo real. Por último, identifica-se o material.

Apêndice E

Kinect 1.0

O Kinect 1.0 é constituído por uma câmara de intensidade, uma câmara de profundidade que é um receptor de infravermelho, um emissor de infravermelho e um conjunto de microfones (Figura E.1). O Kinect mede a profundidade por meio da comparação entre um padrão emitido no ambiente com dimensões conhecidas e a imagem de infravermelho obtida. As imagens adquiridas pelo Kinect podem ser acessadas por tópicos disponíveis no sistema operacional robótico (ROS). Existem tópicos no ROS que já disponibilizam as imagens de intensidade e profundidade com o processo de retificação realizado via *hardware*. Entretanto efeitos de distorção da câmara RGB e da câmara de profundidade não são corrigidos à priori. :

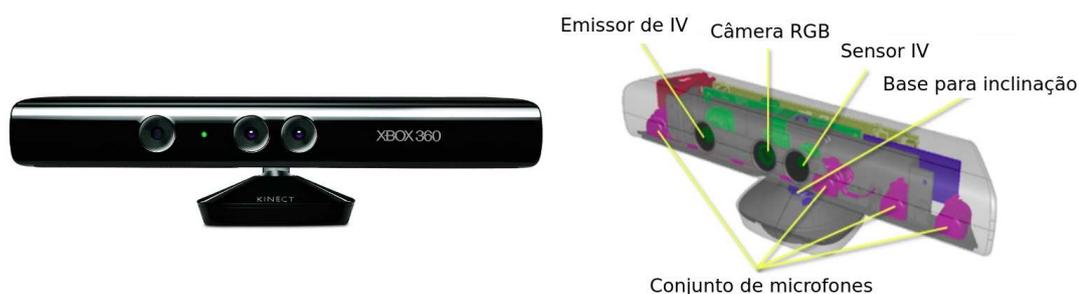


Figura E.1: Kinect 1.0 ou Kinect do XBOX 360.
(Fonte: MICROSOFT ¹)

¹MICROSOFT: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>

Apêndice F

Detector STAR

O detector STAR é uma versão modificada do detector de *keypoints* CenSurE (Agrawal et al. [2008]).¹ Dois fatores afetam principalmente a performance na identificação de pontos característicos, a estabilidade (a persistência de características ao longo da mudança de pontos de vista) e a acurácia (a localização consistente de uma característica através da mudança de ponto de vista). As classes de características são divididas em dois tipos, detectores de quinas e análise de arcos circulares, ambas são implementadas eficientemente, entretanto não são invariantes a escala ao contrário do detector CenSurE. (Agrawal et al. [2008])

O detector CenSurE apresenta algumas semelhanças com os detectores SIFT e SURF, todos eles apresentam resolução espacial em escala, operador de espaço de escala e filtragem de bordas. O detector CenSurE apresenta completa resolução espacial de forma oposta ao SIFT e SURF (ambos realizam subamostragem), utiliza o operador de Laplace *Center-surround* diferentemente do SIFT que utiliza o operador de Laplace aproximado pelo DOG e do SURF que utiliza o DOB. Além disso, o CenSurE utiliza o operador de Harris para filtragem de bordas em oposição a Hessian utilizado pelo SIFT e SURF. Quanto a invariância rotacional, o CenSurE apresenta invariância aproximada, o SIFT completa e o SURF não é invariante a rotação. CenSurE apresenta melhor rejeição de bordas por utilizar o filtro de bordas Harris ao invés do filtro Hessian. (Agrawal et al. [2008])

Para computar todas *features* com grande acurácia, o detector CenSurE requer uma sequência de passos. Primeiramente as *features* são computadas em todas as escalas para todos os pixels na imagem original, em seguida, os extremos em escala e localização são selecionados, para essas etapas realiza-se uma filtragem *center-surround*

¹Detector STAR: https://docs.opencv.org/2.4.13.2/modules/features2d/doc/common_interfaces_of_feature_detectors.html

por kernels bi-níveis os quais devem ser rotacionalmente invariantes e apresentar rápido processamento. A detecção de *features* pelo CenSurE é eficiente, distintiva, estável, apresenta grande acurácia, repetibilidade em mudanças de pontos de vista, permitindo a sua aplicação em sistemas de tempo real. (Agrawal et al. [2008])

Apêndice G

Descritor BRAND

A performance de descritores que se baseiam somente em imagens RGB como SIFT e SURF é afetada consideravelmente por variações na iluminação. Com o objetivo de reduzir a sensibilidade a variações de iluminação, o descritor BRAND propõe descrever pontos característicos por meio da combinação de imagens RGB com imagens de profundidade. Ou seja, combinam-se as informações de aparência com a informação geométrica para criar uma única descrição de uma região do objeto. O descritor BRAND é dividido em um conjunto de etapas, primeiramente o fator de escala é computado utilizando a informação de profundidade. Em seguida, esse fator é utilizado para estimar a direção dominante e na análise de *features* na vizinhança de *keypoints*, criando-se strings binárias que descrevem uma região. A direção dominante de *keypoints* é computada para uma pequena região de um objeto e considera as normais a superfície. Esse descritor apresenta como vantagens o uso de pouco espaço na memória, a necessidade de pequeno tempo de processamento e a menor sensibilidade a variações na iluminação. (Nascimento et al. [2012])

Apêndice H

Projeto e Construção de Dispositivos

Neste apêndice, a máquina para ensaios em ambientes controlados e um atuador linear, os quais foram projetados e construídos para a realização de experimentos em ambiente real, são detalhados. A máquina para ensaios em ambientes controlados foi utilizada na comprovação da hipótese desse trabalho e também para a realização de ensaios de forma menos susceptível a erros aleatórios. Já o atuador linear projetado permitiu a aplicação de esforços constantes na direção horizontal, possibilitando a realização de testes de identificação de espumas por meio do robô *TurtleBot*.

H.1 Máquina para Ensaios em Ambientes Controlados

H.1.1 Descrição

Uma máquina para ensaios em ambientes controlados foi projetada e construída com o objetivo de aplicar forças constantes sem a necessidade de realizar o controle da força aplicada. O módulo da força aplicada é determinado por meio do posicionamento de um conjunto de pesos (anilhas ou chumbadas) sobre a máquina. Esse esforço é transmitido por meio de um cano até o objeto que será comprimido. A ponta do cano que entra em contato com o objeto corresponde ao efetuator.

Além disso, a máquina permite a fixação de sensores como o Kinect 1.0. Utilizando-se essa máquina, pode-se avaliar os ruídos presentes nas imagens adquiridas, realizar testes de repetição, verificar efeitos da presença de tensões residuais,

realizar ensaios de compressão uniaxial de forma aproximada, dentre outros.

H.1.2 Projeto Preliminar e Máquina Construída

O projeto preliminar da máquina de ensaios em ambiente controlado é apresentado na Figura H.1. Essa figura apresenta as dimensões preliminares de cada um dos componentes da parte superior da máquina: suporte do disco, disco e suporte para o Kinect.

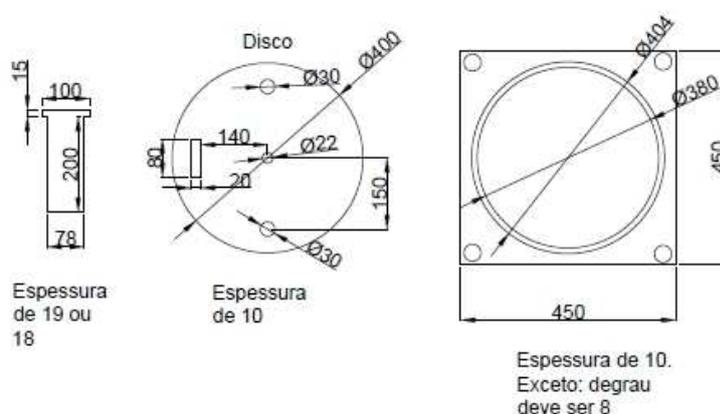


Figura H.1: Máquina de Ensaio - Projeto preliminar - Da esquerda para a direita: suporte para câmera, disco da parte superior da máquina e suporte para o disco - Dimensões em mm.

As imagens de cada um dos componentes da máquina de ensaios construída e a montagem final são apresentados na Figura H.2. O disco da mesa (Figura H.2(d)) está posicionado a 1600 mm em relação ao chão.

H.2 Atuador Linear

H.2.1 Descrição

Um movimento linear acompanhado da transmissão de uma força constante pode ser obtido por meio de um manipulador de múltiplas juntas e atuadores. O controle de movimentos do efetuador de um robô pode ser facilmente obtido. Entretanto o controle simultâneo da força exercida e do posicionamento é uma tarefa difícil de ser realizada. Alguns trabalhos como Raibert & Craig [1981] recomendam o uso de estratégias de controle híbrida. Como consequência, os atuadores lineares oferecem uma solução mais simples para controle de posicionamento e força.

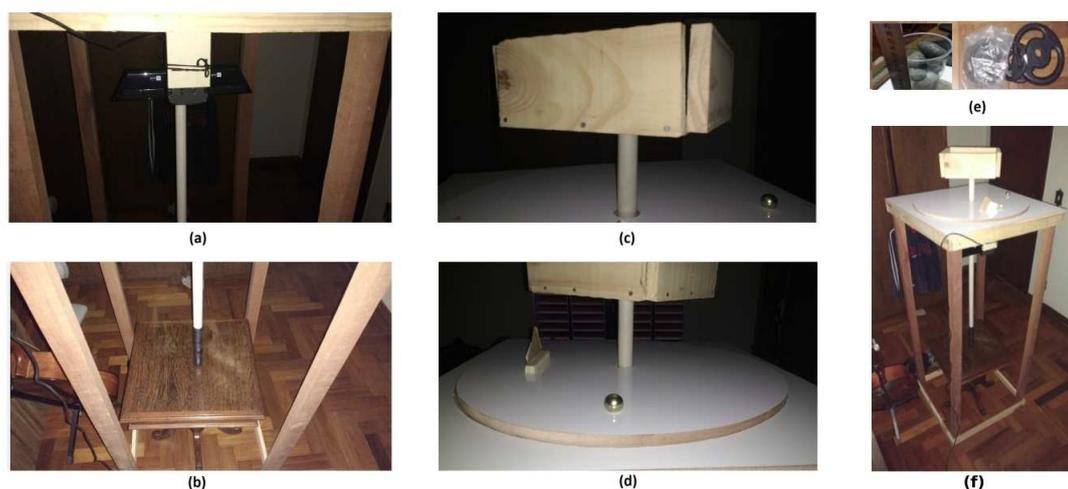


Figura H.2: Máquina de Ensaios Construída - Detalhamento - (a) Suporte e Kinect 1.0 acoplado a máquina de ensaios. (b) Ponta do cano (efetuador) para compressão de um objeto que é posicionado sobre uma mesa. (c) Caixa para colocar pesos, permitindo a seleção do esforço a ser aplicado. (d) Disco giratório sobre a mesa para permitir giro da câmera. (e) Anilhas e chumbadas que foram utilizadas para aplicação de forças desejadas. (f) Visão geral da máquina de ensaios.

Há diferentes mecanismos que podem ser associados para produzir um movimento linear. Há atuadores pneumáticos, hidráulicos, mecanismos biela-manivela, parafuso de potência, pinhão cremalheira. Atuadores lineares pneumáticos apresentam difícil controle de força durante o deslocamento. Atuadores hidráulicos podem manter a força no mesmo valor facilmente devido a uma propriedade natural de líquidos no qual a pressão é transmitida igualmente em todas as direções, entretanto caso seja necessário variar a força realizada por um atuador hidráulico, um projeto mais complexo seria necessário. O mecanismo biela-manivela apesar de transformar um movimento circular em um movimento linear, não transmite uma força constante. Como consequência há duas concepções de atuadores lineares que foram identificadas para esse trabalho, uma é composta por um parafuso de potência e um mancal com rosca interna e outra utiliza o mecanismo de pinhão-cremalheira. A cremalheira corresponde a uma engrenagem cilíndrica de dentes retos de raio infinito. Para esse trabalho, selecionou-se a concepção baseada no mecanismo pinhão-cremalheira.

O atuador linear projetado para esse trabalho é constituído de um cano de 32 mm de diâmetro e 1000 mm de comprimento. Além disso, é composto por uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e uma cremalheira, ambas com módulo 1 e material aço. Um acoplamento (flange), para o motor Dynamixel AX-12+ e a engrenagem cilíndrica de dentes retos, foi projetado e fabricado por meio de operações de usinagem. Uma rosca interna M5 foi criada no furo central do flange projetado e quatro furos de diâmetro

2.5 mm foram realizados em um diâmetro de 16 mm e com espaçamento de 90 graus. O acoplamento é fixado ao motor Dynamixel AX-12+ por meio de quatro parafusos M2, a engrenagem cilíndrica de dentes retos é fixada ao acoplamento por meio de um parafuso M5 de 25 mm de comprimento. Além disso, compõem o atuador linear um conjunto de tábuas de madeira, abraçadeiras, diversos pregos, guias de madeira para a cremalheira e para o cano, e um fixador de contra-pesos para evitar o tombamento do atuador linear para a frente. Um trava-rosca de alto torque foi utilizado para evitar que a rosca do parafuso M5, que prende a engrenagem cilíndrica de dentes retos ao flange projetado, se solte.

Especificação das engrenagens

A força transmitida por uma engrenagem cilíndrica de dentes retos é definida por $Ft = Torque/RaioPrimitivo$. O torque máximo deve apresentar o valor de $0.4 * 1.5 \text{ Nm}^1$. Com o objetivo de transmitir uma força máxima de pelo menos 10 kgf, valor que já causava mais que %60 de deformação em corpos de prova de espumas de poliuretano cuja seção transversal é de 100 x 90 (mm), necessita-se de uma engrenagem com um raio de aproximadamente 6 mm. Comercialmente, encontrou-se uma engrenagem de raio primitivo de 6 mm, atendendo aos requisitos de projeto. A cremalheira é selecionada com base no módulo da engrenagem cilíndrica de dentes retos, no presente trabalho, módulo 1. Foi adquirida uma cremalheira de 2000 mm e cortou-se um seguimento de 300 mm para utilização no atuador linear, permitindo o movimento de avanço de um cano.

H.2.2 Projeto Preliminar e Atuador Linear Construído

O projeto preliminar e o acoplamento de alta (flange) construído por meio de operações de usinagem são apresentados na Figura H.3. Por meio dele, o torque é transmitido do servomotor para a engrenagem cilíndrica de dentes retos. Em seguida, o giro da engrenagem cilíndrica de dentes retos resulta na força de transmissão da engrenagem para a cremalheira, gerando um movimento linear.

¹MaxTorque-Ax12+: <http://shervinemami.info/dynamixel.html>

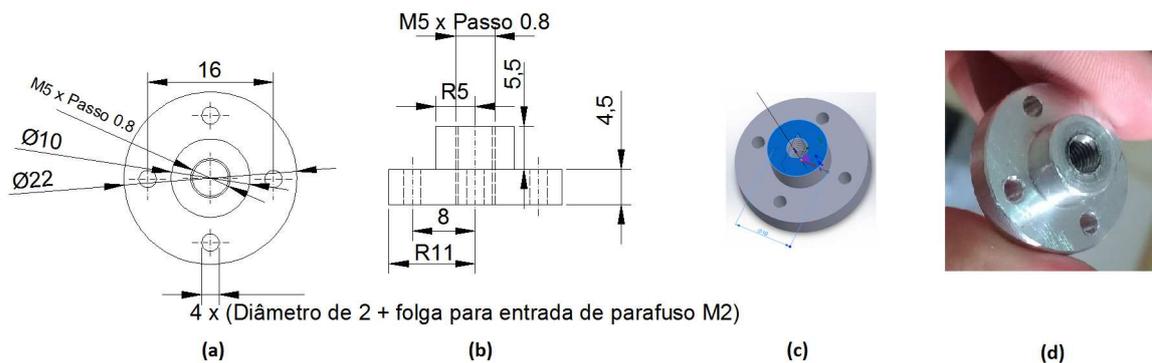


Figura H.3: Acoplamento de Alta - (a) Vista Frontal desenhada no *AutoCad*. (b) Vista Lateral desenhada no *AutoCad*. (c) Desenho do acoplamento no *SolidWorks*. (d) Flange construído. Dimensões em mm.

O projeto preliminar e o atuador linear construído, posicionado sobre o *TurtleBot*, são apresentados na Figura H.4.

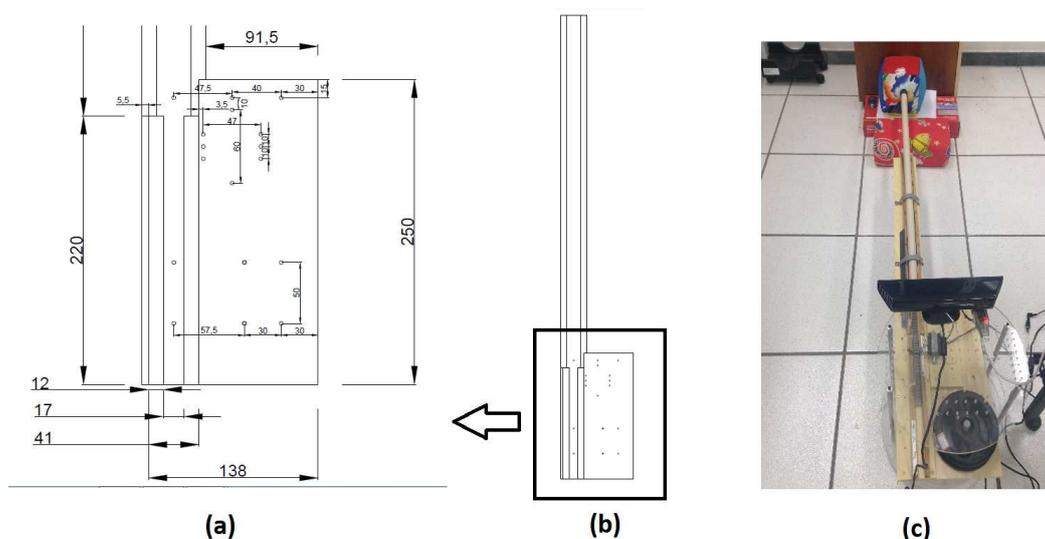


Figura H.4: Atuador Linear - (a) Projeto preliminar - Dimensões. (b) Projeto preliminar - Visão de conjunto. (c) Construção final. Dimensões em mm.

As diferentes peças que compõem o atuador linear projetado são apresentadas na Figura H.5. Dentre as peças estão a cremalheira, a engrenagem cilíndrica de dentes retos, o flange, as tábuas, o atuador Dynamixel AX-12+, o USB2 Dynamixel, guias de madeira, abraçadeira, papel *contact* para nivelar a engrenagem acoplada ao motor com a cremalheira, um trava-rosca de alto torque, elementos de fixação e ferramentas variadas.



Figura H.5: Atuador Linear Desmontado - Diversos componentes e ferramentas.

Por último, o conjunto de elementos de máquina, cremalheira e engrenagem cilíndrica de dentes retos, é apresentado na Figura H.6. A associação de ambos os elementos permite a conversão do movimento de rotação do motor Dynamixel AX-12+ em um movimento de translação do efetuator.

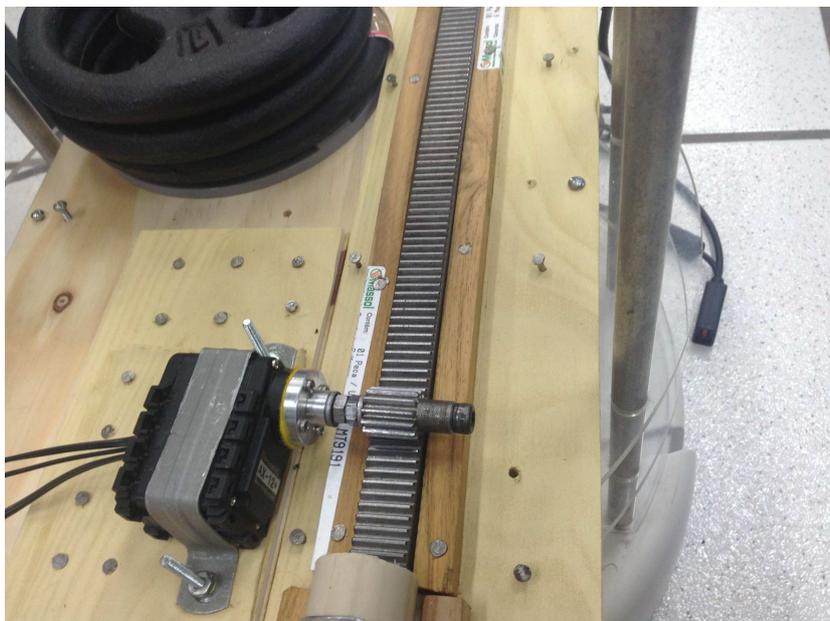


Figura H.6: Atuador Linear - Mecanismo pinhão-cremalheira para a transmissão de esforços.

H.2.3 Dynamixel AX-12+ - Controle e Medição da Força de Transmissão Resultante

No ROS, utilizou-se o módulo *joint_torque_controller* para controlar o torque do motor Dynamixel AX-12+. Deve-se observar que por meio do tópico *rostopicpub – 1/pan_controller/commandstd_msgs/Float64 – –angspeed*, em um dos parâmetros de entrada, entra-se com o valor da velocidade angular do motor, em radianos por segundo (*angspeed*), e não com o torque interno. Curvas experimentais relacionando a velocidade de rotação do motor Dynamixel AX-12+ e o torque transmitido foram obtidas no trabalho Mensink [2008]. Entretanto com o objetivo de obter com maior acurácia a força de transmissão em função da velocidade de rotação para o motor utilizado no projeto, mediu-se por meio de um transdutor de força (Figura H.7) o módulo da força transmitida pela cremalheira ao cano. Para essa medição, o atuador linear foi fixado a uma mesa e um furo foi realizado sobre o cano, permitindo que o transdutor permanecesse na horizontal e preso ao cano, medindo a força transmitida no momento do equilíbrio de forças.



Figura H.7: Atuador Linear - Experimento para medição da força transmitida (2 kgf nesse caso, *Zoom* na balança).

A Figura H.8 apresenta a curva força de transmissão em função da velocidade de rotação para o servomotor Dynamixel AX-12+.

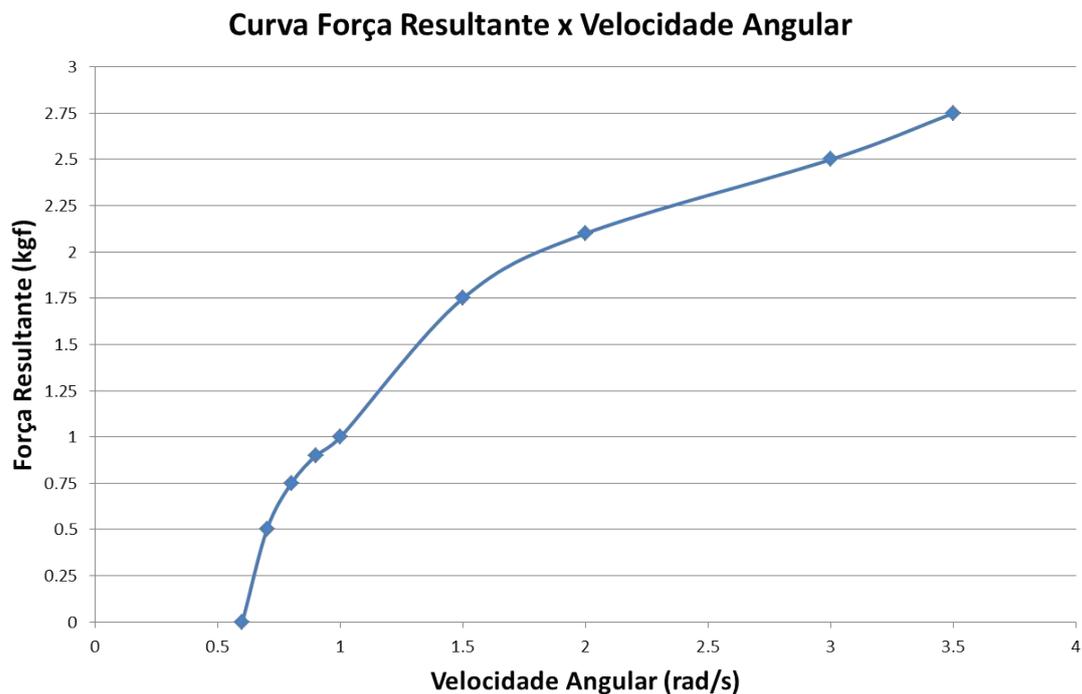


Figura H.8: Motor Dynamixel AX-12+ - Curva força de transmissão em função da velocidade de rotação.

A curva de torque resultante em função da velocidade de rotação pode ser obtida multiplicando os valores de força de transmissão pelo raio primitivo da engrenagem cilíndrica de dentes retos, utilizada no trabalho, o qual apresenta valor de 6 mm. A curva obtida apresenta o início da velocidade de rotação em 0.6 rad/s de forma semelhante a curva obtida por Mensink [2008], entretanto o perfil da curva encontrada foi distinto. Pode-se observar também que a curva foi obtida até aproximadamente a força de transmissão de módulo 2.75 kgf.

Referências Bibliográficas

- [1] Agrawal, M.; Konolige, K. & Blas, M. (2008). Censure: Center surround extremas for realtime feature detection and matching. *Computer Vision–ECCV 2008*, pp. 102--115.
- [2] Alzoubi, M.; Tanbour, E. & Al-Waked, R. (2011). Compression and hysteresis curves of nonlinear polyurethane foams under different densities, strain rates and different environmental conditions. Em *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 101--109. American Society of Mechanical Engineers.
- [3] Baumgartner, E.; Wiebel, C. B. & Gegenfurtner, K. R. (2013). Visual and haptic representations of material properties. *Multisensory research*, 26(5):429--455.
- [4] Beck, J. & Prazdny, S. (1981). Highlights and the perception of glossiness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 30(4):407--410.
- [5] Blake, A. & Bülthoff, H. (1990). Does the brain know the physics of specular reflection? *Nature*, 343(6254):165--168.
- [6] Blatz, P. J. & Ko, W. L. (1962). Application of finite elastic theory to the deformation of rubbery materials. *Transactions of the Society of Rheology*, 6(1):223--251.
- [7] Bouman, K. L.; Xiao, B.; Battaglia, P. & Freeman, W. T. (2013). Estimating the material properties of fabric from video. Em *Computer Vision (ICCV), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 1984--1991. IEEE.
- [8] Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*, volume 7. Wiley New York.
- [9] Davis, A.; Bouman, K. L.; Chen, J. G.; Rubinstein, M.; Durand, F. & Freeman, W. T. (2015). Visual vibrometry: Estimating material properties from small motions

- in video. Em *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 5335--5343.
- [10] Dupuis, R. & Aubry, E. (2008). Development and comparison of foam comprehensive law in great deformation. Em *SEM XI International Congress, Orlando*.
- [11] Fazzini, M.; Dalverny, O. & Mistou, S. (2011). Identification of materials properties using displacement field measurement. Em *Key Engineering Materials*, volume 482, pp. 57--65. Trans Tech Publ.
- [12] Fleming, R. W. (2014). Visual perception of materials and their properties. *Vision research*, 94:62--75.
- [13] Gorman, J. D.; Subotic, N. S. & Thelen, B. J. (1995). Robust material identification in hyperspectral data via multiresolution wavelet techniques. Em *icassp*, pp. 2805--2808. IEEE.
- [14] Gubicza, J.; Juhász, A.; Tasnádi, P.; Arató, P. & Vörös, G. (1996). Determination of the hardness and elastic modulus from continuous vickers indentation testing. *Journal of materials science*, 31(12):3109--3114.
- [15] Gunarathne, G. P. & Christidis, K. (2002). Material characterization in situ using ultrasound measurements. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 51(2):368--373.
- [16] Healey, G. & Slater, D. (1999). Invariant recognition in hyperspectral images. Em *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on.*, volume 1, pp. 438--443. IEEE.
- [17] Hepburn, D. & Kemp, I. (1998). Infrared spectroscopy and allied techniques. *Engineering Science & Education Journal*, 7(3):107--112.
- [18] HIBBELER, R. (2007). Resistência dos materiais. 2007. ed.
- [19] Ho, Y.-X.; Landy, M. S. & Maloney, L. T. (2006). How direction of illumination affects visually perceived surface roughness. *Journal of Vision*, 6(5):8--8.
- [20] Jakel, R. (2010). Analysis of hyperelastic materials with mechanics-theory and application examples.
- [21] Kim, J.; Marlow, P. & Anderson, B. L. (2011). The perception of gloss depends on highlight congruence with surface shading. *Journal of Vision*, 11(9):4--4.

- [22] Kimoto, A.; Sugitani, N. & Fujisaki, S. (2010). A multifunctional tactile sensor based on pvd film for identification of materials. *Sensors Journal, IEEE*, 10(9):1508-1513.
- [23] Kimoto, A.; Tsuji, S. & Shida, K. (2007). Noncontact material identification and distance measurement using effective capacitance with cds cells. *Sensors Journal, IEEE*, 7(10):1440--1446.
- [24] Kirschmann, A. (1895). *Der Metallglanz und die Parallaxe des indirecten Sehens*. Verlag von Wilhelm Engelmann.
- [25] Marlow, P. J.; Kim, J. & Anderson, B. L. (2012). The perception and misperception of specular surface reflectance. *Current Biology*, 22(20):1909--1913.
- [26] Mensink, A. (2008). Characterization and modeling of a dynamixel servo. *Trabajo Individual de Investigación en el Electrical Engineering Control Engineering de la University of Twente*.
- [27] Nascimento, E. R.; Oliveira, G. L.; Campos, M. F. M.; Vieira, A. W. & Schwartz, W. R. (2012). Brand: A robust appearance and depth descriptor for rgb-d images. Em *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 1720--1726. IEEE.
- [28] Pagliari, D. & Pinto, L. (2015). Calibration of kinect for xbox one and comparison between the two generations of microsoft sensors. *Sensors*, 15(11):27569--27589.
- [29] Raibert, M. H. & Craig, J. J. (1981). Hybrid position/force control of manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 103(2):126--133.
- [30] Rodrigues, L. E. M. J. (2016). Notas de aula da disciplina de ensaios mecânicos de materiais.
- [31] Rojicek, J. (2010). Identification of material parameters by fem. *Modern Machinery Science Journal*.
- [32] Rusinkiewicz, S. & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the icp algorithm. Em *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on*, pp. 145--152. IEEE.
- [33] Shahzad, M.; Kamran, A.; Siddiqui, M. Z. & Farhan, M. (2015). Mechanical characterization and fe modelling of a hyperelastic material. *Materials Research*, 18(5):918--924.

- [34] Sharan, L.; Rosenholtz, R. & Adelson, E. H. (2008). Eye movements for shape and material perception. *Journal of Vision*, 8(6):219--219.
- [35] Slater, D. & Healey, G. (1999). Material classification for 3d objects in aerial hyperspectral images. Em *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on.*, volume 2, pp. 268--273. IEEE.
- [36] Syllebranque, C. & Boivin, S. (2008). Estimation of mechanical parameters of deformable solids from videos. *The Visual Computer*, 24(11):963--972.
- [37] Van Den Broek, W.; Wienke, D.; Melssen, W. & Buydens, L. (1998). Plastic material identification with spectroscopic near infrared imaging and artificial neural networks. *Analytica Chimica Acta*, 361(1):161--176.