

Convênio no. 01.0037.00/2014

SICONV no. 814255

Título do Projeto:

**DESENVOLVIMENTO DE MICROATUADOR
ELETROTERMOMECÂNICO E INTEGRAÇÃO DE
SISTEMA DE CONTROLE PARA MANIPULAÇÃO DE
MICROELEMENTOS**

**IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Núcleo de Bionanomanufatura
Laboratório de Micromanufatura / LMI
BIONANO**

RESUMO

O presente documento trata do relatório final das atividades realizadas no projeto intitulado “DESENVOLVIMENTO DE MICROATUADOR ELETROTERMOMECÂNICO E INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE PARA MANIPULAÇÃO DE MICROELEMENTOS”, sendo este dividido em cinco macro-atividades ou Metas, de acordo com a proposta inicial deste trabalho: (1) projeto e fabricação do microatuador eletrotermomecânico, (2) desenvolvimento de controladores e integração do sistema de micromanipulação, (3) validação do sistema de micromanipulação, (4) aplicação do sistema de manipulação, (5) capacitação e divulgação de resultados. Considera-se que estas atividades foram executadas e concluídas dentro do planejado.

O texto a seguir é composto por doze seções, sendo a primeira uma introdução contendo descrição detalhada dos objetivos e metas propostas, as seções 2 a 5 referentes à Meta 1, as seções 6 a 8 referentes à Meta 2, as seções 9, 10 e 11 referentes às Metas 3, 4 e 5, respectivamente, e finalmente, a seção 12 referente às conclusões finais.

Este trabalho foi desenvolvido por pesquisadores e estagiários do Laboratório de Micromanufatura do IPT, em parceria com professores e alunos da Escola Politécnica da USP, e com a startup SCINTECH.

PALAVRAS-CHAVE

Microatuadores eletrotermomecânicos, micropinças, fabricação a laser, sistema de micromanipulação, controladores.

SUMÁRIO

	P.
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos do projeto.....	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 Metas e etapas	3
1.3 Escopo deste relatório.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (META 1).....	8
2.1 Micropiças	8
2.1.1 Tipos de micropiças.....	11
2.2 Introdução ao Método de Otimização Topológica (MOT).....	16
2.3 Microusinagem a laser	18
3 METODOLOGIA PARA PROJETO E FABRICAÇÃO DO MICROATUDOR ELETROTERMOMECÂNICO (META 1).....	20
3.1 Materiais.....	20
3.2 Equipamentos.....	21
3.3 Projeto das micropiças e placas de circuito impresso (PCIs).....	22
3.4 Fabricação.....	23
3.4.1 Etapa de usinagem a laser.....	23
3.4.2 Tratamento superficial.....	29
3.4.3 Montagem da pinça na PCI.....	31
3.5 Arranjo experimental para caracterização.....	32
3.5.1 Procedimentos de caracterização	35
3.6 Micromanipulação	37
4 EXECUÇÃO, TESTES E OTIMIZAÇÃO DOS MICROATUADORES ELETROMECCÂNICOS (META 1).....	39
4.1 Projeto das micropiças e PCIs.....	39
4.2 Fabricação.....	41
4.2.1 Microusinagem a laser	41
4.2.2 Eletropolimento da pinça	41

4.2.3	Montagem das pinças na PCI.....	43
4.3	Caracterização das micropinças.....	46
4.3.1	Avaliação do processo de fabricação	51
4.4	Micromanipulação com micropinças fabricadas	56
4.5	Resultados do MOT.....	58
5	SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS REFERENTES À META 1.....	62
6	SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E MANIPULAÇÃO DE PARTÍCULAS (META 2) ...	63
6.1	Análise dos microelementos e adequação do ambiente para manipulação	66
6.1.1	Esferas de Estanho-prata	67
6.1.2	Estruturas deformáveis em PDMS (Polidimetilsiloxano).....	67
6.1.3	Estruturas deformáveis produzidas com impressora 3D:	69
6.1.4	Micropartículas deformáveis de Alginato de Cálcio	72
6.1.5	Células	73
6.2	Estratégias de atuação e sensoriamento	74
6.2.1	Micropinças e sensoriamento de força	74
6.2.2	Sistema de visão	76
6.2.3	Integração do sistema de visão e de manipulação de micropartículas.....	77
6.2.4	Aquisição e processamento de imagem	81
6.2.5	Manipulação	86
7	MODELAGEM E CONTROLE DO SISTEMA DE MICROMANIPULAÇÃO DE MICROELEMENTOS (META 2)	87
7.1	Modelagem e identificação.....	87
7.2	Projeto de controladores	90
7.3	Implementação	92
8	SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS REFERENTES À META 2.....	93
9	TESTE E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE MICROMANIPULAÇÃO (META 3).....	94
10	APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO FUNCIONAL DO SISTEMA DE MICROMANIPULAÇÃO (META 4)	96
10.1	Manipulação de partículas biopoliméricas.....	96
10.2	Manipulação de células	98
10.3	Caracterização de MEMS (Nova aplicação).....	102

11 PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO E DIVULGAÇÃO DO PROTÓTIPO DE MANIPULAÇÃO (META 5).....	105
11.1 Capacitação.....	105
11.2 Divulgação.....	105
11.3 Aplicação.....	106
12 CONCLUSÕES FINAIS.....	107
AGRADECIMENTO.....	109
EQUIPE TÉCNICA.....	110
APOIO ADMINISTRATIVO.....	110
RECURSOS FINANCEIROS.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
ANEXO A.....	118

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 1 – Etapas de desenvolvimento do projeto proposto.....	7
Figura 2 – Caracterização de uma nanomola no interior de um MEV (FEMTOTOOLS, 2014).....	9
Figura 3 - Imagem de microscópio de uma pinça e bactérias <i>Staphylococcus aureus</i> de diâmetro aproximadamente igual a 600 nm que foram posicionadas no substrato na forma da letra J. Os pontos escuros na imagem são bactérias fora do plano focal (JERICHO et al., 2004).....	9
Figura 4 - Reprodução da imagem de uma micropinça na montagem de uma “super” ponta de um microscópio de força atômica com nanotubo de carbono (SARDAN et al., 2008).....	10
Figura 5 - Imagens em MEV de micropinças de silício policristalino manipulando uma engrenagem também de silício policristalino (KELLER, 1998).....	10
Figura 6 – (a) Modelo de uma micropinça eletrostática com sensor de força integrado (BEYELER et al., 2007). (b) Micropinça eletrostática <i>FT-G100 Femto Tools</i>	12
Figura 7 - Princípio de funcionamento de um cristal piezelétrico quando energizado.....	13
Figura 8 - Exemplo de uma micropinça piezelétrica (JERICHO et al., 2004).....	14
Figura 9 – O atuador feito em silício policristalino mostrado na Figura 8 (JERICHO et al., 2004).....	14
Figura 10 - Modelo de micropinça ETM. Dimensões em μm (BORDATCHEV; NIKUMB, 2005).....	15
Figura 11 - Atuador U (COMTOIS; BRIGHT, 1996).....	16
Figura 12 - Exemplo de aplicação do MOT, mostrando o processo iterativo de otimização.	17
Figura 13 - Máquina de prototipagem rápida <i>LPKF ProtoLaser U3</i> semelhante à utilizada na fabricação das micropinças.....	23
Figura 14 - Conteúdo de arquivos do tipo <i>.dxf</i> utilizados para confecção da PCI (a) e da micropinça (b).....	24
Figura 15 - (a) Caminho do laser na usinagem da pinça. (b) Detalhe, mostrando o arredondamento de cantos internos; nesse caso, a linha vermelha é o contorno nominal externo da pinça.....	24
Figura 16 – (a) Posição da mesa após equipamento ser referenciado. (b) Posição da mesa para colocar peça a ser usinada.....	25
Figura 17 - Folha de aço fixada sobre placa de alumina perfurada, posicionada sobre mesa do equipamento.....	26
Figura 18 - Laminado de <i>FR4</i> fixado a vácuo na mesa da máquina da LPKF.....	27
Figura 19 - Criação de faixas de cobre no material laminado. Essas são removidas posteriormente, expondo o <i>FR4</i> . As estruturas de cobre resultantes são então usadas na fixação das pinças.....	28

Figura 20 - Alguns dos arquivos de ferramentas de usinagem disponíveis na biblioteca do equipamento.....	29
Figura 21 - Esquema da célula de <i>electropolishing</i> montada.....	30
Figura 22 - PCI de <i>FR4</i> usinada na máquina da <i>LPKF</i> para uma micropinça <i>W</i> , mostrando as trilhas de cobre.....	31
Figura 23 – Posicionamento da micropinça na placa. É possível distinguir a região das âncoras, regiões de aço sobre a placa.....	32
Figura 24 – Posicionamento final da pinça. Novamente, é possível distinguir a região das âncoras, regiões de aço sobre a placa.....	32
Figura 25 - Esquema do arranjo experimental inicial usado no projeto.....	33
Figura 26 - Esquema do arranjo experimental atual.....	34
Figura 27 - Bancada utilizada para a caracterização.....	34
Figura 28 - Posicionamento da micropinça com relação à mesa do microscópio para realização do experimento de manipulação.....	38
Figura 29 - Visualização de micropinças e do material a ser manipulado no microscópio.....	39
Figura 30 - Micropinças projetadas. Pinça <i>W</i> , otimizada para níquel de 25 μm de espessura; pinça <i>U2</i> , não otimizada, em aço inoxidável de 76 μm ; pinça <i>PEIXE</i> , não otimizada, em aço inoxidável de 76 μm	40
Figura 31 - Leiaute produzido em <i>AutoCAD</i> , dimensões em mm. Pinça (<i>W</i> , nesse caso) é posicionada do lado direito.....	41
Figura 32 - Pinça <i>W</i> cortada à partir de folha de aço inoxidável <i>AISI 301</i> com 76 μm de espessura. a) Vista superior; b) vista inferior; c) imagem em <i>MEV</i>	42
Figura 33 - Pinça <i>W</i> da Figura 32 após eletropolimento (4,21 A/dm^2 e 20 min). a) Vista superior; b) vista inferior; c) imagem em <i>MEV</i>	42
Figura 34 - a) Imagem da micropinça após a microusinagem a laser; b) imagem da micropinça após o eletropolimento.....	42
Figura 35 - a) Imagem da ponta após a microusinagem a laser; b) imagem da ponta após o eletropolimento.....	43
Figura 36 - Conjunto final montado para uma micropinça <i>W</i>	44
Figura 37 - Modelos de micropinças adicionais montados no trabalho.....	44
Figura 38 - Ponta da micropinça <i>PEIXE</i> . Imagem obtida através de microscopia eletrônica.....	44
Figura 39 - Região das guelras da micropinça <i>PEIXE</i>	45
Figura 40 - Imagem térmica da micropinça <i>PEIXE</i>	45
Figura 41 - Deslocamento x Potência aplicada à micropinça <i>W</i>	47
Figura 42 - Resistência x Potência aplicada à micropinça <i>W</i>	47
Figura 43 - Deslocamento x Potência aplicada à micropinça <i>U2</i>	48
Figura 44 - Resistência x Potência aplicada à micropinça <i>U2</i>	48
Figura 45 - Deslocamento x Potência aplicada à micropinça <i>PEIXE</i>	49

Figura 46 - Resistência x Potência aplicada à micropinça PEIXE.	49
Figura 47 - Comparação de deslocamento x potência para as micropinças apresentadas.	50
Figura 48 - Comparação de resistência x potência para as micropinças apresentadas.	50
Figura 49 - Projeto original (a) e modificado (b) da pinça U2. Com o novo projeto, tem-se uma pinça mais longa e uma menor abertura, possibilitado o fechamento para dimensões abaixo de 200 μm.	51
Figura 50 - Pinças fabricadas, montadas e caracterizadas sem atuação prévia. A coluna da direita mostra as pinças atuadas.	53
Figura 51 - Comparação de deslocamento e resistência x potência para as micropinças do tipo U2 apresentadas, caracterizadas sem atuação prévia.	54
Figura 52 - Comparação de deslocamento x potência para as micropinças do tipo U2 estudadas, caracterizadas após 10 atuações e uma caracterização prévia.	55
Figura 53 - Comparação de deslocamento x potência para as micropinças do tipo U2 estudadas, caracterizadas após 20 atuações e dois procedimentos de caracterização prévios.	55
Figura 54 - Manipulação de uma esfera de rubi de 150 μm de diâmetro pela micropinça PEIXE.	57
Figura 55 - Manipulação de um fio de cabelo.	57
Figura 56 – a) Domínio de projeto considerado, mostrando condições de contorno (a condição de convecção natural considerada foi omitida no desenho, para manter a clareza). O comprimento e a largura correspondem aos valores de U2. Constante da mola $k_s = 4000\text{N/m}$. b) Malha de elementos finitos empregada. Foram usados 4473 elementos finitos retangulares de 4 nós. Alguns símbolos de condições de contorno são mostrados.	58
Figura 57 - a) Resultado da otimização. b) Resultado após pós-processamento. A distribuição de temperaturas, obtida por elementos finitos, é mostrada.	59
Figura 58 - a) Resultado da otimização minimizando-se as temperaturas. b) Resultado após pós-processamento. A distribuição de temperaturas, obtida por elementos finitos, é mostrada.	61
Figura 59 - a) Resultado da otimização minimizando-se as temperaturas. Mudança de parâmetros com relação ao resultado da Figura 58 foi realizada. b) Resultado após pós-processamento. A distribuição de temperaturas, obtida por elementos finitos, é mostrada.	61
Figura 60 - Sistema de identificação e manipulação de partículas (IeMP).	64
Figura 61 - Diagrama de blocos do sistema IeMP.	65
Figura 62 - Nova configuração do sistema de identificação e manipulação de partículas (IeMP).	66
Figura 63 - Esferas rígidas de liga SnAg3.5.	67
Figura 64 – Molde em FR4 fabricado a laser, com largura aproximada dos canais de 70 micrometros.	68

Figura 65 – Molde em LTCC (superior) e estrutura de canais moldada em PDMS (inferior). Largura do canal e distância entre canais são apresentadas na Figura 66	68
Figura 66 – Canais do molde em LTCC (esquerda) e estruturas moldadas em PDMS (direita).	69
Figura 67 – Conjunto de equipamentos para impressão 3D (FormLabs 2): (a) Cura; (b) Limpeza; (c) Impressão; (d) Cartucho com material polimérico flexível.	70
Figura 68 – (a) Projetos das estruturas para impressão 3D; (b) Estruturas fabricadas na impressora FormLabs 2; (c) Perfil das estruturas impressas na FormLabs 2.	71
Figura 69 – Método de produção de micropartículas de alginato por microfluídica de gotas usando gelificação pelo método CLEX.....	72
Figura 70 - Células de camundongo tipo nctc-929.	73
Figura 71 - Comparação da força Gravitacional com as diversas forças de adesão em função do raio do objeto (LU et al., 2006).	74
Figura 72 - Micropinça utilizada (superior) e princípio de atuação e sensoriamento de força (inferior), (BEYELER, 2007).	75
Figura 73 - Algoritmo de processamento de imagens: detecção de partículas (dimensões em μm)	77
Figura 74 - Modelagem mecânica de partículas através das características do contorno deformado (NELSON, et al., 2005).	77
Figura 75 - Painel frontal do sistema de imagem e manipulação de partículas.....	79
Figura 76 - Seleção de partículas. a) Menu ao clicar sobre da partícula; b) Opções do menu.	80
Figura 77 - Diagrama em bloco do subVI de Aquisição e Processamento de Imagem. ...	83
Figura 78 - Etapas de Processamento de Imagem.	84
Figura 79 - Mascaramento utilizado para o reconhecimento da pinça: a) Parte superior; b) Parte inferior.....	84
Figura 80 – Diagrama representando o sistema modelado.....	88
Figura 81 – Diagrama de Blocos do Sistema de Controle de Força.....	91
Figura 82 – Manipulação automática de partículas rígidas (Imagem e Vídeo).....	94
Figura 83 – Sequenciamento de micropartículas: escrita “I” “P” “T” (Imagem e Vídeo)....	95
Figura 84 – Manipulação Célula Animal (Imagem e Vídeo).....	95
Figura 85 – Manipulação de micropartículas de Alginato de Cálcio (Imagem e Vídeo). Superior: sem aplicação de tensão (força) na microgarra. Inferior: aplicação de aproximadamente 110V.	97
Figura 86 – Manipulação célula humana tumoral (Imagem e Vídeo).Superior: Pinça em processo de fechamento mas sem deformar a célula. Inferior: Pinça deformando a célula.	99
Figura 87 – Manipulação de esferoides vegetais - células em estrutura 3D (Imagem e Vídeo). Superior: micropinça em aproximação para captura das células. Inferior: Micropinça atuando sobre um esferoide.....	100

Figura 88 – Estrutura celular de células animais e vegetais
<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/diferencas-entre-celula-animal-vegetal.htm>
..... 101

Figura 89 – Conglomerado de células (esquerda) e esferoides de células (direita), sendo este último desejável para a formação de tecidos celulares. 101

Figura 90 – Dispositivo MEMS eletrotérmico. (a) Atuador na posição zero de referência; (b) Atuador sob ação de torque causado pela tensão aplicada aos terminais; (c) *Die* fabricado com diversos dispositivos MEMS, incluindo o atuador testado neste projeto.. 102

Figura 91 – Caracterização de atuador MEMS (Imagem e Vídeo). Superior: Probe próxima do atuador. Inferior: Probe aplicado força da ordem de centenas de μN no atuador. 104

Figura 92 – Abstract do trabalho apresentado no VETOMAC. 106

RELATÓRIO TÉCNICO FINAL Nº 158 715-205

Projeto MCTI:

DESENVOLVIMENTO DE MICROATUADOR ELETROTERMOMECÂNICO E INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE PARA MANIPULAÇÃO DE MICROELEMENTOS

1 INTRODUÇÃO

Microsistemas Eletromecânicos MEMS (*Micro Electrical Mechanical Systems*), representam uma classe de dispositivos que combinam funções mecânicas e eletrônicas em escalas micrométricas, para a implementação de sensores e atuadores. O mercado global de MEMS foi de US\$ 13 bilhões em 2017 e tem previsão de atingir US\$ 25 bilhões em 2022 (YOLE, 2017).

Dentre os microatuadores, destacam-se as plataformas de microposicionamento. Estas encontram aplicações em micro-nanomanipulação, detecção de micro-forças, construção de sistemas de microvarredura ópticos e de dispositivos de armazenagem, e têm como princípios de transdução mais comuns a atuação eletroestática, piezelétrica ou térmica.

Além de MEMS (SILVA, 2004; JIA e XU, 2013; BEYELER et al. 2007; CHRONIS e LEE, 2005; RUBIO et al., 2009), os sistemas de micromanipulação integram as seguintes tecnologias mecatrônicas (FUKUDA et al., 2013): sistemas de controle (XU, 2013; FERREIRA e APHALE, 2011), sistemas microrrobóticos (KAWAHARA e ARAI, 2013; VALDASTRÍ et al., 2006) e sistemas de visão e medição (BECATTINI et al., 2013; ANIS et al., 2009). Adicionalmente, outras tecnologias como a microfluidica, *Bio-Micro Electro Mechanical Systems* (BioMEMS), BioSensores e Sistemas On-Chip (KOHLEK e HENKEL, 2005) podem ser acoplados a sistemas de micromanipulação ampliando seu potencial de aplicação.

Um dos grandes desafios da técnica está na manipulação de microelementos compostos de materiais deformáveis. Existem limitações nos sistemas de controle para a adaptabilidade ao meio e aos elementos flexíveis, sejam estes, organismos biológicos ou

partículas poliméricas, devido à complexidade de sua dinâmica em escalas micro e nanométricas para medição e controle de precisão. Adicionalmente, são encontradas deficiências na integração e controle dos dispositivos como microatuadores, microposicionadores e sensores que possam realizar ações de caracterização mecânica, classificação e movimentação de um microelemento isolado, com precisão e proteção do elemento.

Neste projeto de pesquisa propõe-se o desenvolvimento de microatuadores eletrotermomecânicos (ETM), bem como de um Sistema de Controle Mecatrônico, os quais serão integrados para manipulação de microelementos deformáveis, da ordem de 1-100 μm de diâmetro, cujo padrão morfológico varia segundo as características próprias ou do ambiente. Objetiva-se a realização de tarefas de caracterização mecânica, classificação, e movimentação em nano e micro posicionamento destes microelementos deformáveis. O Sistema de Controle será aplicado a um nanoposicionador robótico comercial, a microatuadores eletrotermomecânicos fabricados, e a microatuadores eletrostáticos comerciais que também serão empregados em testes do sistema. A validação dos resultados será realizada em função do desempenho do sistema de controle, junto com a verificação das características do elemento a ser manipulado, as quais estão relacionadas no modelo do estimador.

1.1 Objetivos do projeto

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolvimento e integração de um microatuador eletrotermomecânico e um sistema de controle mecatrônico para nanoposicionamento e micromanipulação de elementos deformáveis, realizando tarefas controladas e automáticas como caracterização mecânica, classificação e movimentação em escala micrométrica e nanométrica.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Projetar e fabricar um microatuador eletrotermomecânico para micromanipulação de elementos deformáveis da ordem de 1-100 μm de diâmetro,

utilizando algoritmos de otimização topológica, materiais em substratos metálicos e processos de microusinagem.

2. Integrar um sistema de micromanipulação com desenvolvimento de programas de controle, a fim de manipular elementos deformáveis, com tarefas automáticas e controladas em posicionamento e força de retenção do microelemento, através da criação de um estimador, modelagem dinâmica e estratégias de controle adaptativas.

3. Testar e validar o sistema de micromanipulação para elementos deformáveis, analisando o desempenho dos microatuadores, do sistema robótico e dos controladores, com o intuito de garantir a manipulação em tarefas controladas e automáticas de caracterização mecânica, retenção e movimentação do elemento.

4. Aplicar o protótipo funcional de micromanipulação com micropartículas poliméricas e células, realizando ações básicas de caracterização da membrana, retenção e movimentação.

5. Promover programa de capacitação e divulgação para pesquisadores, professores, estudantes, técnicos, estagiários e empresas a fim de disseminar o conhecimento e aprendizagem do protótipo de micromanipulação.

1.2 Metas e etapas

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam as metas e etapas propostas no projeto, tal como incluídas no SICONV (Portal de Convênios do MCTIC).

Tabela 1 – Meta 1 e suas respectivas Etapas propostas no projeto.

Meta	Etapas/Fase	Especificação	Unidade de Medida
1. Projeto e fabricação do microatuador eletrotermomecânico	1.1. Revisão bibliográfica	Revisão da literatura abordando os diferentes trabalhos em fabricação de microatuadores eletrotermomecânicos, estratégias de fabricação, topologias, tipos de materiais utilizados	Relatório com a principal revisão da literatura
	1.2. Seleção e compra de materiais: insumos e substratos metálicos.	Compra de materiais para fabricação do microatuador segundo as características de contomo para manipulação de microelementos como partículas poliméricas ou células	Lista de materiais para fabricação do microatuador anexando cotações das empresas e procedimento de compra.
	1.3. Estudo de topologias do microatuador e definição de estratégias de fabricação.	Pesquisa das topologias para fabricação do microatuador, a fim de manipular elementos com alta sensibilidade entre 1-100um, por meio de operação termica com controle de tensão entre 1-200Vcc. Utilizando Método de Otimização Topologica e fabricação por microusinagem a laser.	1. Tabela com topologias para microatuadores que atingem as especificações do projeto. 2. Informe com estratégias de fabricação especificando procedimentos e equipamento.
	1.4. Fabricação de microatuadores em diferentes configurações.	Fabricar o microatuador considerando diversas topologias de configuração.	Microatuadores fabricados segundo as topologias especificadas.
	1.5. Teste e otimização dos microatuadores	Avaliação do microatuador é realizada para análise do comportamento das características estáticas e em regime quase estacionário, que consiga manipular elementos de 1-100um. A caracterização do produto resultante do processo de microfabricação será feita com recursos de medição tridimensional baseados em princípios ópticos e tácteis, respeitando a limitação física imposta pelas geometrias do produto gerado.	1. Protocolo de avaliação para as características funcionais do dispositivo. 2. Lista de parâmetros e simulações de otimização da topologia.

Tabela 2 – Meta 2 e suas respectivas Etapas propostas no projeto.

Meta	Etapa/Fase	Especificação	Unidade de Medida
2. Desenvolvimento do software de controle e integração do sistema de micromanipulação	2.1 Análise dos microelementos e adequação do ambiente para manipulação.	Adaptação dos microelementos e seu ambiente, que corresponde as micropartículas poliméricas, e células no ambiente líquido de cultivo.	1. Protocolo de avaliação para as condições dos ambientes para manipulação das partículas e células (temperatura, pH, humidade)
	2.2. Configuração do sistema de sensoriamento: Sistema de microscopia ótica e sensores.	Corresponde ao sistema de visualização e medição dos microelementos obtendo informações da deformação, morfologia e localização.	1. Imagens dos microelementos através do microscópio ótico. 2. Tabela de medições das dimensões e geometrias de cada microelemento. 3. Programas de processamento de imagem para definir padrões de geometria e localização do elemento. 4. Tabela de medições dos parâmetros de deformação do microelemento.
	2.3. Modelagem dinâmica, e simulação dos microatuadores, robô e microelemento	Nesta etapa será realizada a modelagem dinâmica dos microatuadores, do robô e do microelemento em software de simulação.	1. Modelos dos microatuadores eletrostáticos e eletrotermomecânicos. 2. Modelos dos microelementos 3. Modelo do robô de nanoposicionamento.
	2.4. Projeção, simulação e programação dos Controladores	Nesta etapa será realizada a projeção e programação dos controladores, implementados em software especializado, que permitirá controlar os parâmetros do robô nanoposicionador e dos microatuadores, para a manipulação controlada dos elementos.	1. Tabela dos parâmetros projetados para cada controlador. 2. Informe com a simulação e análise do comportamento dos controladores. 3. Programas de software com implementação dos controladores clássico PID com feedforward e adaptativo.
	2.5 Integração dos dispositivos de micromanipulação.	Nesta etapa será realizada a integração do sistema robótico com: sensores, microatuadores, sinais de comunicação, unidade de controle e potência, sistema de visão, programas de supervisão e ambiente.	1. Protocolo de configuração do robô de nanoposicionamento. 2. Protocolo de funcionamento e adaptação dos microatuadores eletrostáticos (comerciais) e eletrotermomecânicos (fabricados nas etapas anteriores) com o robô de posicionamento. 3. Protocolo de Teste dos sensores de força dos microatuadores, unidade de controle e potência. 4. Interface de comunicação e supervisão. 5. Protocolo de funcionamento da integração do micromanipulador com o sistema de visão
	2.6 Criação do estimador para os modelos dinâmicos e controladores	Nesta etapa será realizada a caracterização mecânica de diversos microelementos para criar o estimador a fim de complementar os modelos dinâmicos	Tabela com parâmetros estimados e modelos atualizados.
	2.7 Ajuste e atualização dos controladores segundo os parâmetros estimados	Nesta etapa será realizada os ajustes nos parâmetros de controle segundo as informações da estimação	Controladores em software atualizados.

Tabela 3 – Meta 3 e suas respectivas Etapas propostas no projeto.

Meta	Etapas/Fase	Especificação	Unidade de Medida
3. Teste e validação do sistema de micromanipulação	3.1 Testes para validar o desempenho funcional do sistema integrado de manipulação	Nesta etapa será validado o desempenho do sistema de micromanipulação, verificando as características de funcionamento e interfaces de integração dos dispositivos com os programas de controle.	Informe das medições, resultados e gráficos que representam o desempenho geral do sistema de micromanipulação.
	3.2 Testes para validar o desempenho da micromanipulação em microelementos com diversos parâmetros de deformação.	Nesta etapa será validado o desempenho do sistema de micromanipulação na manipulação de microelementos com diferentes parâmetros de deformação.	Informe com resultados e gráficos que representam o desempenho do sistema de micromanipulação para microelementos com diversos parâmetros de deformação.
4. Validação do protótipo funcional do sistema de micromanipulação	4.1 Validação da manipulação com partículas poliméricas	Nesta etapa será validado o desempenho do sistema de micromanipulação para aplicação com partículas poliméricas em suspensão.	1. Informe com resultados e gráficos que representam o desempenho do sistema de micromanipulação para partículas poliméricas.
	4.2 Validação da manipulação com células	Nesta etapa será validado o desempenho do sistema de micromanipulação para aplicação com células de tipo Fígado Humano Sk-Hep. .	1. Informe com resultados e gráficos que representam o desempenho do sistema de micromanipulação para células
	4.3 Realimentação e ajustes no sistema de micromanipulação	Nesta etapa será realizada a realimentação para otimizar os parâmetros de controle, ajustes nas interfaces e nos dispositivos do sistema completo de micromanipulação.	1. Tabela com ajustes de parâmetros em controladores, interfaces de comunicação, microatuadores, sistema de visão e robô de posicionamento. 2. Redação de relatórios com as informações do sistema de micromanipulação.
	4.4 Protótipo funcional de sistema de micro manipulação	Nesta etapa será finalizado o sistema de micromanipulação como protótipo funcional.	1. Protocolo de funcionamento das ações de controle do protótipo funcional.
5. Programa de capacitação e divulgação do protótipo de manipulação	5.1 Organização e desenvolvimento de capacitação	Nesta etapa serão organizadas as atividades de capacitação e materiais para disseminação do sistema de micromanipulação.	1. Seminário de capacitação em IPT. 2. Seminário de capacitação na USP.
	5.2 Participação de eventos nacionais e internacionais	Nesta etapa serão desenvolvidos os materiais para participação de eventos e publicações.	1. Congresso nacional 2. Congresso internacional 3. Publicação

1.3 Escopo deste relatório

O projeto proposto para “Desenvolvimento de Microatuador Eletrotermomecânico e Integração de Sistema de Controle para Manipulação de Microelementos” foi dividido nas seguintes macro atividades (ou Metas), como apresentado no item 1.2 e ilustrado na **Figura 1**: (1) projeto e fabricação do microatuador eletrotermomecânico, (2) desenvolvimento de controladores e integração do sistema de micromanipulação, (3) teste e validação do sistema, (4) aplicações em partículas poliméricas e células, e (5) disseminação através de participação em eventos e capacitação de pessoas.

Neste relatório, as atividades desenvolvidas, referentes às Metas (1) a (5), estão descritas nas seções 2 a 11, da seguinte forma:

- Seções 2 a 5: Meta 1;
- Seções 6 a 8: Meta 2;
- Seção 9: Meta 3;
- Seção 10: Meta 4;
- Seção 11: Meta 5.

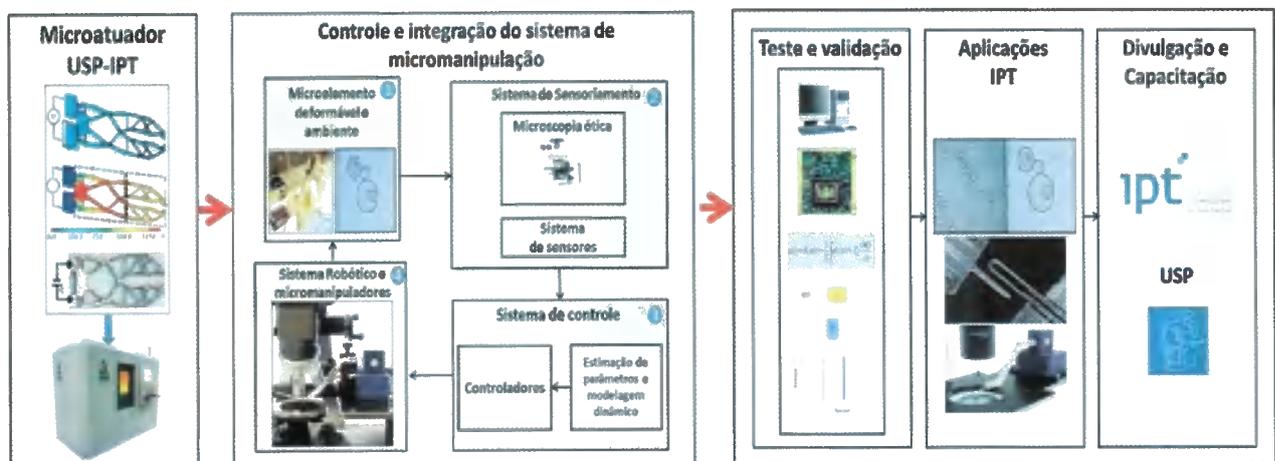


Figura 1 – Etapas de desenvolvimento do projeto proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (META 1)

A seguir é apresentada uma revisão da literatura abordando diferentes trabalhos voltados para a fabricação de microatuadores (Etapa 1.1 da Meta 1, conforme Tabela 1).

2.1 Micropinças

Atualmente existe a necessidade de manipulação de objetos em escala nano e micrométrica com acurácia e precisão, sendo difícil o fazer com ferramentas macroscópicas. Microatuadores são desenvolvidos para auxiliar na manipulação de tais objetos, como nanofibras, micropartículas e micropeças. Outra área de aplicação é a medicina, onde pode-se realizar caracterização celular, manipular vasos sanguíneos (WIERZBICKI et al., 2006), nervos e até mesmo bactérias individuais (JERICHO et al., 2004).

Nesse trabalho, são empregadas micropinças ou microgarras com aberturas da ordem de micrometros. Tais pinças são normalmente abertas e se fecham quando aplicada excitação elétrica. Na sequência, são mostradas algumas aplicações de micropinças em geral.

Na **Figura 2**, apresenta-se uma nanomola fixada na ponta de uma micropinça eletrostática (com sensor de força integrado) usando deposição induzida por feixe de elétrons. Quando a micropinça é fechada e aberta, a nanomola é comprimida e tensionada, respectivamente. Simultaneamente, a força aplicada é medida e, correlacionando-a com a deformação observada no microscópio eletrônico de varredura (MEV), a relação entre força e deformação da nanomola é determinada (FEMTOTOOLS, 2014).



Figura 2 – Caracterização de uma nanomola no interior de um MEV (FEMTOTOOLS, 2014).

Na **Figura 3**, mostra-se uma micropinça piezelétrica aplicada à manipulação de bactérias *Staphylococcus aureus*. A letra J é formada com bactérias para demonstrar a capacidade da manipulação da micropinça.



Figura 3 - Imagem de microscópio de uma pinça e bactérias *Staphylococcus aureus* de diâmetro aproximadamente igual a 600 nm que foram posicionadas no substrato na forma da letra J. Os pontos escuros na imagem são bactérias fora do plano focal (JERICHO et al., 2004).

Na **Figura 4**, está ilustrada uma micropinça eletrotermomecânica (ETM) fabricada em silício policristalino, prendendo um nanotubo de carbono e o colocando na ponta de prova de um microscópio de força atômica com o intuito de melhorar a resolução do aparelho.

and place.

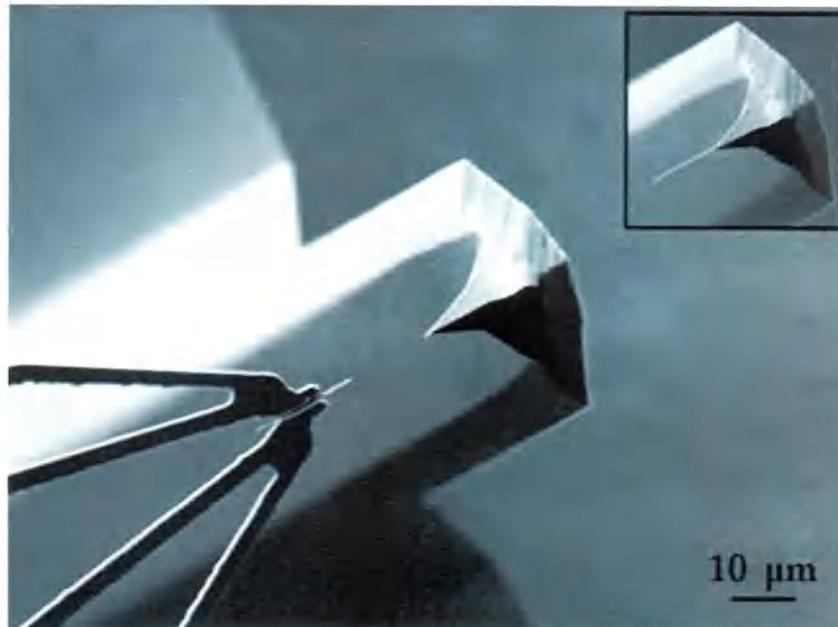


Figura 4 - Reprodução da imagem de uma micropinça na montagem de uma “super” ponta de um microscópio de força atômica com nanotubo de carbono (SARDAN et al., 2008).



Figura 5 - Imagens em MEV de micropinças de silício policristalino manipulando uma engrenagem também de silício policristalino (KELLER, 1998).

Várias são as técnicas de fabricação de microatuadores ou micropinças, as quais variam com o princípio de atuação empregado, o que, por sua vez, limita o tipo de material utilizado.

Microatuadores piezelétricos são usualmente compostos de liga PZT. Esses materiais são frágeis, caros e difíceis de moldar na sua geometria final ou de projeto,

tornando sua fabricação relativamente cara. Atuadores eletrostáticos, por sua vez, são frequentemente fabricados com silício, normalmente combinados com outros elementos, requerendo processos de fabricação típicos de componentes semicondutores, tais como fotolitografia, oxidação e deposição. Dispositivos de ligas de níquel e titânio com memória de forma requerem um ambiente de fabricação altamente controlado, pois o titânio reage facilmente com elementos indesejados, como o oxigênio.

Os atuadores ETM são, basicamente, metálicos ou de silício policristalino. Os de silício policristalino são fabricados mediante técnicas de sala limpa, como corrosão, por exemplo. Já os metálicos são fabricados basicamente mediante eletrodeposição e usinagem a laser. No caso do silício, há empresas fabricantes, como a *CMC Microsystems* (www.cmc.ca). Por outro lado, o silício não é o material mais apropriado para uso em microatuadores, como analisou JONSMANN (1999).

Ressalta-se que o projeto de atuadores pode ser facilmente adaptado para aberturas menores ou maiores. O fato de uma abertura da pinça ser bem maior que do corpo a ser manipulado não configura necessariamente um problema, pois a geometria da ponta da pinça pode, via de regra, ser alterada sem modificação significativa do seu desempenho (SARDAN et al., 2008). Como parâmetro de desempenho da pinça, deseja-se que o seu deslocamento (fechamento) para uma dada potência de excitação seja elevado.

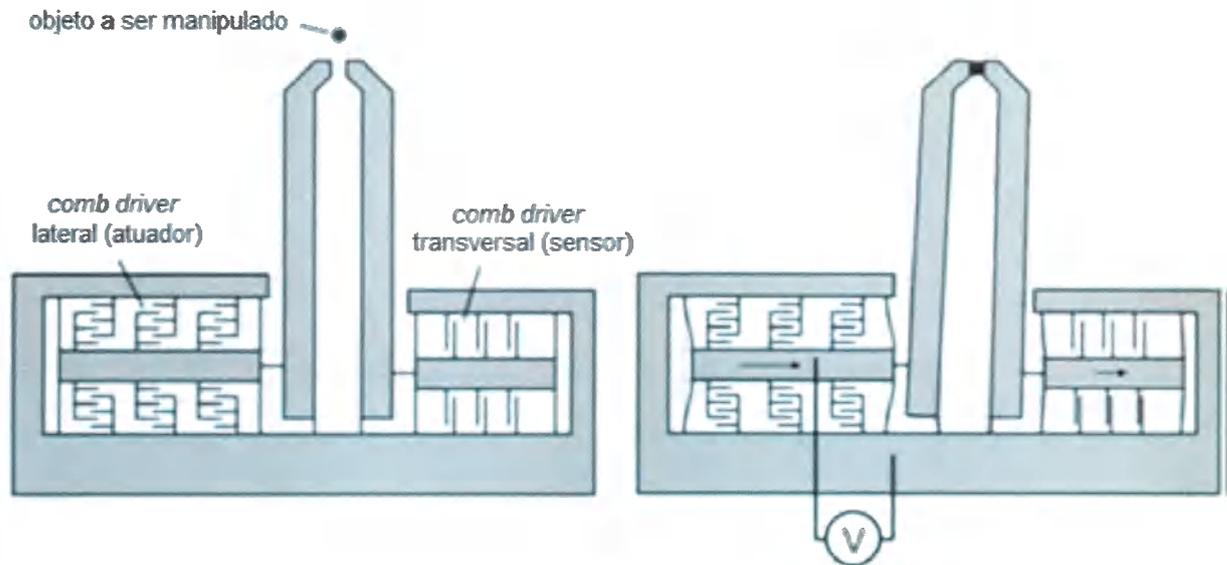
2.1.1 Tipos de micropinças

Diversos tipos de micropinças têm sido desenvolvidos. A seguir, são descritos seus principais princípios de atuação.

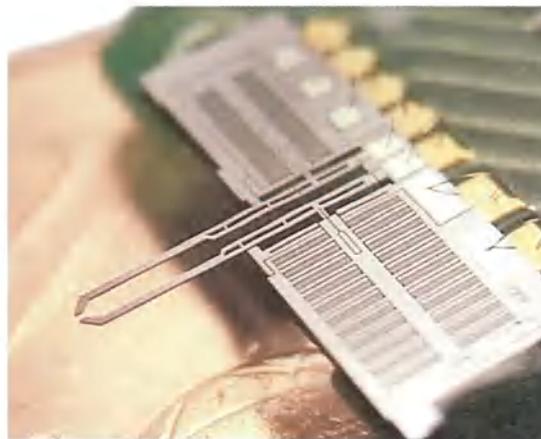
2.1.1.1 Princípio eletrostático

Atuadores eletrostáticos têm amplo uso na área de MEMS. Têm como princípio de funcionamento a atração eletrostática causada pela aplicação de uma diferença de potencial entre duas placas paralelas. As placas são arranjadas em *comb drivers*. Esses podem ser de deslocamento paralelo ou lateral (*lateral comb driver*), ou deslocamento transversal (*transverse comb driver*). Na Figura 6a, é apresentado um modelo de

micropinça de *comb driver* lateral (à esquerda dos braços da pinça). O braço direito da pinça está acoplado a um *comb driver* transversal, o qual serve como sensor de força.



(a)



(b)

Figura 6 – (a) Modelo de uma micropinça eletrostática com sensor de força integrado (BEYELER et al., 2007). (b) Micropinça eletrostática FT-G100 Femto Tools.

Aplicando-se uma tensão ao *comb driver* da esquerda, tem-se o deslocamento do braço correspondente (conforme a Figura 6a) e, caso haja um objeto sendo agarrado, esse causará um deslocamento no braço da direita, que, por sua vez, aproximará as placas do *comb driver* correspondentes. Isso fará com que a capacitância entre as placas se altere, permitindo medir com precisão, através da variação na capacitância, a força aplicada ao objeto. A Figura 6b mostra a pinça comercial.

A atuação eletrostática pode prover grandes deslocamentos sem histerese. O arranjo lateral promove maior resolução, enquanto que o transversal promove maior deslocamento (YUKUN e QINGSONG, 2013). Como desvantagem do princípio, a tensão elétrica de atuação pode chegar à marca dos 150 V.

2.1.1.2 Princípio piezelétrico

A atuação piezelétrica se baseia na deformação de cristais piezelétricos causada pela aplicação de tensão elétrica ao material. O cristal comporta-se conforme mostrado na **Figura 7**. Materiais piezelétricos possuem como características a precisão no deslocamento e uma grande força de saída, além de uma rápida resposta (YUKUN e QINGSONG, 2013). Sua tensão de atuação pode atingir 70 V (JERICHO et al., 2004).

Um exemplo de pinça é mostrado na **Figura 8**, onde é indicada a região em que se encontra o material piezelétrico. Um dos lados da vara cilíndrica é colado em uma das faces do material piezelétrico, e o outro lado da vara é colado na barra de ativação mostrada na **Figura 8** e na **Figura 9**. Conforme a polaridade da tensão aplicada ao cristal piezelétrico é alterada, esse irá se expandir ou contrair. Conseqüentemente, devido à transferência desse movimento para a vara e para a barra de ativação, a micropinça irá abrir ou fechar, respectivamente.

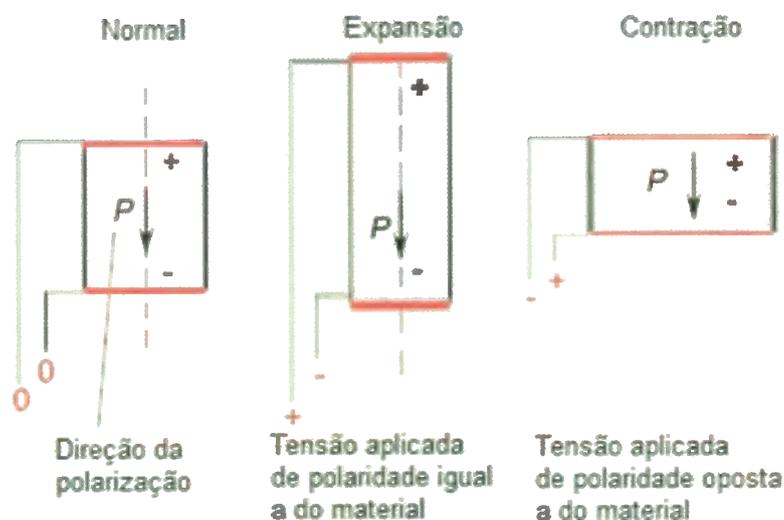


Figura 7 - Princípio de funcionamento de um cristal piezelétrico quando energizado.

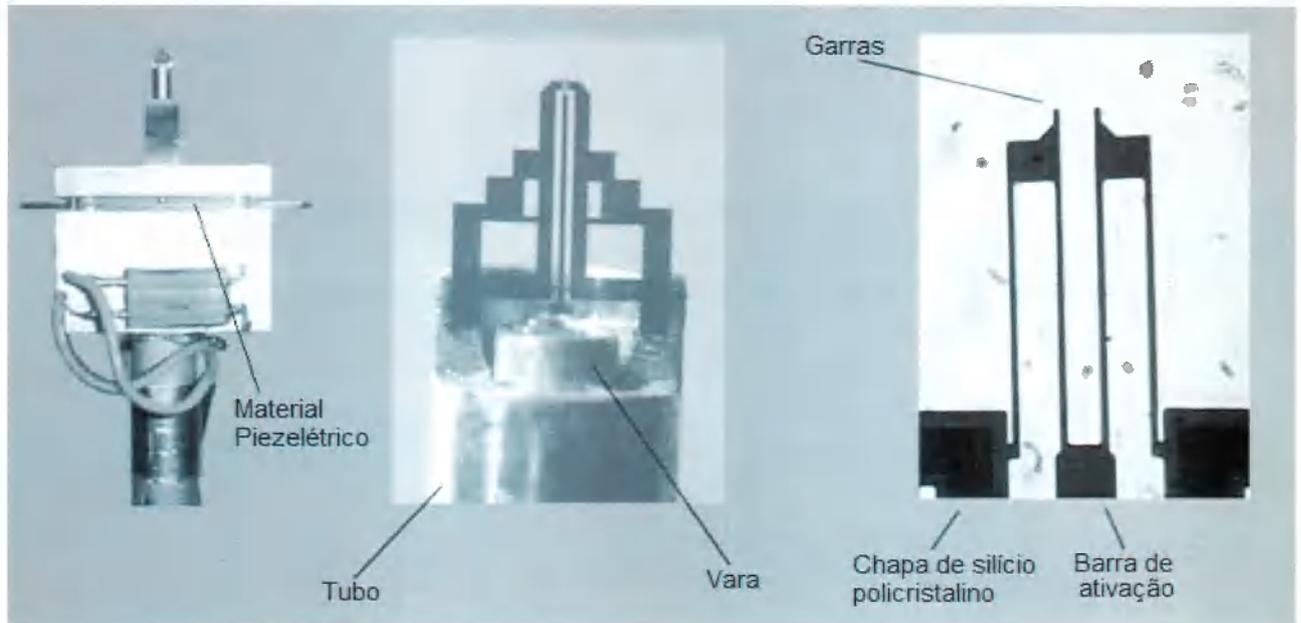


Figura 8 - Exemplo de uma micropinça piezelétrica (JERICHO et al., 2004).

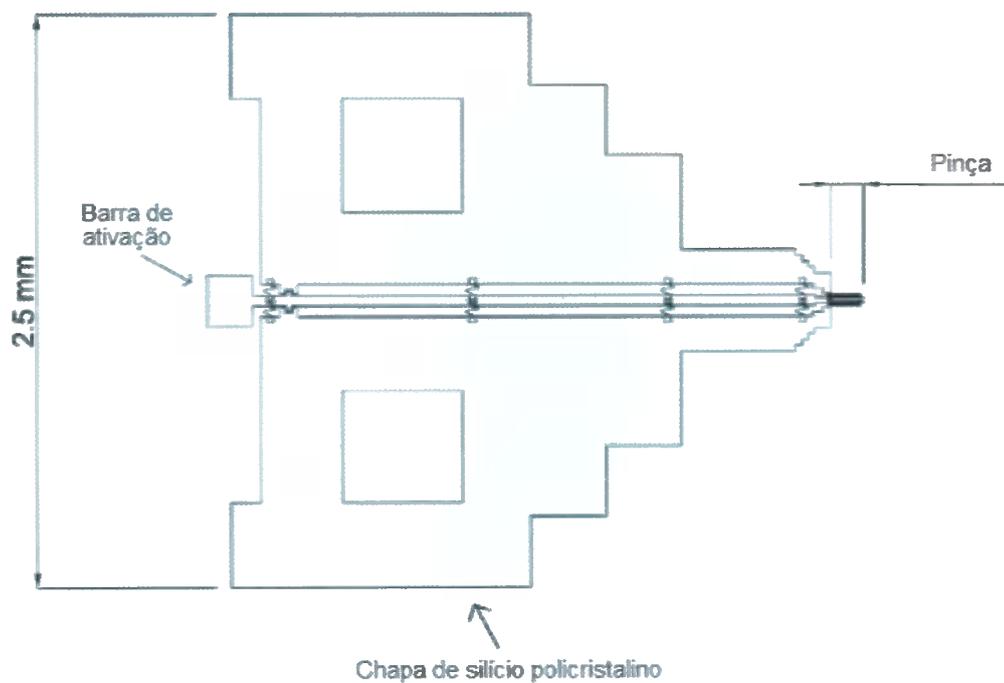


Figura 9 – O atuador feito em silício policristalino mostrado na Figura 8 (JERICHO et al., 2004).

2.1.1.3 Princípio ETM

As micropinças ETM possuem como características grandes deslocamentos de saída com baixas tensões de atuação (de alguns volts), porém com altas correntes (podendo ultrapassar 1 A). A Figura 10 ilustra um exemplo deste tipo de micropinça.

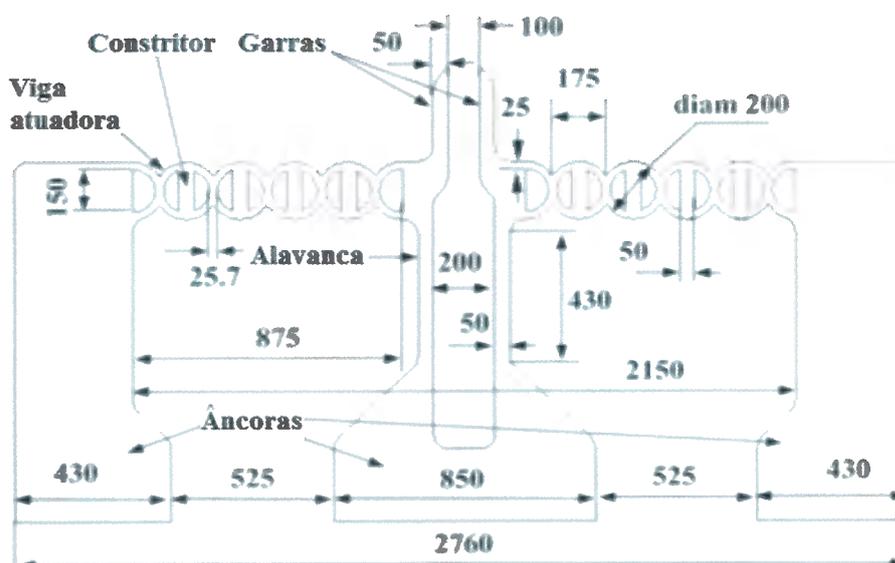


Figura 10 - Modelo de micropinça ETM. Dimensões em μm (BORDATCHEV; NIKUMB, 2005).

O princípio de atuação das micropinças ETM é o deslocamento causado pela dilatação térmica, devido ao aumento de temperatura gerado pela corrente elétrica (efeito Joule) de operação. Um problema desse tipo de atuação são as elevadas temperaturas nas extremidades da pinça, podendo inviabilizar aplicações biológicas (como células vivas).

O atuador ETM em “U” (ou simplesmente atuador U) é constituído de duas barras ligadas em uma das extremidades, sendo uma mais espessa que a outra, conforme exemplificado na Figura 11.

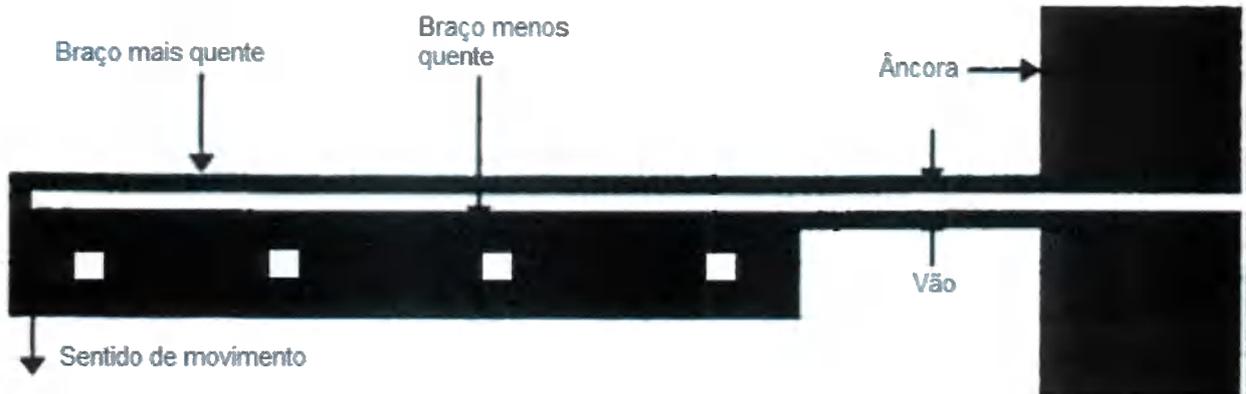


Figura 11 - Atuador U (COMTOIS; BRIGHT, 1996).

Tem-se assim, no braço mais fino, uma resistência elétrica maior que no braço mais espesso. Aplicando-se uma diferença de potencial entre os dois braços, tem-se, segundo a lei de Ohm, uma queda de tensão maior no braço mais fino, o que acarretará seu maior aquecimento e dilatação, produzindo movimento na direção e sentido indicados na Figura 11.

2.2 Introdução ao Método de Otimização Topológica (MOT)

O MOT é uma ferramenta sistemática de projeto que se utiliza do método de elementos finitos, algoritmos de otimização e o conceito de modelo de material, para determinar a configuração (geometria) ótima de uma estrutura, sujeita a restrições de projeto. Tem sido largamente aplicado nos últimos anos no projeto da topologia de partes mecânicas com alta rigidez e baixo peso nas indústrias automotiva e aeronáutica (BENDSØE e SIGMUND, 2003).

Na Figura 12, mostra-se o processo iterativo de otimização considerando-se as condições de contorno apresentadas e a maximização da rigidez da estrutura ao carregamento mostrado, sendo que o volume total de material é restringido. As condições de contorno devem ser definidas para cada projeto. Note-se que o resultado final não é intuitivo.



Figura 12 - Exemplo de aplicação do MOT, mostrando o processo iterativo de otimização.

Essencialmente, a Otimização Topológica (OT) distribui material no interior de um domínio fixo de projeto discretizado em elementos finitos, que permanecerá fixo durante o processo de otimização (BENDSØE e KIKUCHI, 1988). Isso significa que existem elementos finitos que representam tanto a presença quanto a ausência de material, ou elementos com propriedade igual à do material base e elementos com propriedade próxima de nula (propriedade nula é evitada, pois causa singularidade das matrizes de elementos finitos). Porém, o MOT admite “materiais intermediários”, gerados ao longo do processo iterativo de otimização, como mostrado na **Figura 12** (regiões cinza). Isso é realizado porque o problema discreto de distribuição de material (sem elementos com “materiais intermediários”) é mal-posto, ou seja, não apresenta solução única, necessitando de restrições de complexidade, tais como restrição de perímetro ou filtro para ser resolvido (HABER et al., 1996). O material assume valores intermediários de acordo com uma “lei de mistura” definida, chamada modelo de material. Assim, as variáveis de projeto seriam as variáveis que definem a mistura de material em cada ponto do domínio. Os dois principais tipos de modelos de material são baseados nos métodos da homogeneização (SUZUKI e KIKUCHI, 1991) e de densidade (BENDSØE e SIGMUND, 1999).

No caso dos métodos de densidade, destaca-se o modelo *SIMP* (*Simple Isotropic Material with Penalization*), onde a propriedade (C) do material em cada elemento do domínio é dada por (BENDSØE e SIGMUND, 2003):

$$C(x)=[\rho(x)]^p C_0; \quad \rho_{min} \leq \rho(x) \leq 1 \quad (1)$$

Na equação (1) C_0 é a propriedade de um material base utilizado no projeto (por exemplo, módulo de *Young*), $\rho(x)$ é a variável de projeto, interpretada como uma função de distribuição da “densidade” no interior de um domínio (chamada de pseudo-densidade na

área de MOT), p é um coeficiente de penalização que procura recuperar a natureza discreta do problema e ρ_{min} é um valor próximo de zero. Neste trabalho, será usado modelo baseado no *SIMP*.

2.3 Microusinagem a laser

Nessa seção, descreve-se o processo de microusinagem a laser de forma generalizada. Detalhes sobre o trabalho realizado são descritos nas seções sobre a metodologia empregada e resultados obtidos.

A usinagem a laser é um processo de remoção de material, embora lasers também sejam utilizados para fundir materiais, como no caso do pó impresso na impressão 3D.

Há diversos tipos de lasers, que podem ser categorizados em função da fonte de luz, como lasers de feixes pulsados e contínuos. O primeiro é o tipo empregado no desenvolvimento em questão. Como o nome sugere, o laser pulsado remove material através de pulsos de curta duração (ordem de nanosegundos, para o equipamento deste projeto) e alta frequência (ordem de kilohertz). Na prática, a usinagem é feita sobrepondo um grande número de passes do feixe para criar as mais variadas geometrias, como canais, furos passantes e rebaixos.

A microusinagem a laser envolve uma série de procedimentos que se distinguem pelas geometrias criadas e pela maneira de retirar material (CHEN e DARLING, 2012). Se o material usinado é atravessado pelo feixe, tem-se o corte a laser. Se não é atravessado, tem-se ablação a laser, com a particularidade de que todo o material retirado deixa o substrato pelo mesmo lado de incidência do feixe. Por fim, tem-se a furação.

A remoção de material pode envolver processos químicos e térmicos, dependendo de como a radiação laser emitida interage com o material (CHEN e DARLING, 2012). Para comprimentos de onda maiores, a energia do fóton é insuficiente para dar origem a um processo químico, apenas aquecendo o substrato. Em intensidades suficientemente elevadas, no entanto, pode-se derreter o material e então vaporizá-lo. Além de fusão seguida de vaporização, alguns materiais podem até mesmo sublimar. Em comprimentos de onda menores, a energia do fóton pode alcançar o nível necessário para quebrar ligações químicas do substrato. Para a maioria dos polímeros orgânicos, esse processo

de fotólise produz principalmente H₂O e CO₂. Em qualquer caso, o aquecimento é reduzido, o que traz vantagens. Processos químicos (ou fotoquímicos) e térmicos são dois extremos e representam idealizações. A microusinagem a laser pode frequentemente envolver uma combinação de ambos independentemente do material.

Inerente a qualquer caso de microfabricação a laser é a formação momentânea de uma névoa próxima ao local de usinagem. Esta consiste de uma pequena pluma de material ejetado que pode ser formada totalmente de material vaporizado (mais comum), ou conter também partículas (“cavacos”) com dimensões da ordem de micrometros. Dependendo do tempo entre pulsos, a radiação do pulso subsequente pode ionizar parte do material vaporizado, gerando plasma. Tanto a pluma quanto o plasma interagem com o feixe subsequente, obstruindo sua passagem (desvio e absorção podem ocorrer). Por sorte, o plasma geralmente se dispersa a tempo e o restante do material causa atenuação desprezível. Na prática, pelo que se pôde depreender da revisão bibliográfica realizada, o sintoma mais comum da obstrução é a redução da profundidade de usinagem (CHEN e DARLING, 2012).

Feixes com comprimentos de onda maiores se traduzem em diâmetros de spot entre 50 µm e 150 µm, aproximadamente. Feixes com comprimentos de onda menores geralmente são absorvidos mais próximo à superfície para a maioria dos materiais, onde o processo de usinagem deve ocorrer. Comprimentos de onda pequenos, aliados a larguras de pulso pequenas, geram usinagens mais limpas em metais, cerâmicas, vidros e polímeros. Além disso, pulsos curtos ou de curta duração podem produzir aquecimento próximo do adiabático, o que permite que as temperaturas subam rapidamente e que o efeito seja bem localizado, ou seja, com pouco efeito às áreas vizinhas. A alta intensidade de energia também é importante nesse caso. Pulsos curtos (menores que 1 µs) são ainda necessários para permitir que o plasma formado se dissipe entre pulsos. Por fim, para pulsos ainda mais curtos, a interação entre o feixe e o material é quase independente do comprimento de onda (OXFORD LASERS LTD, 2010). Essas informações são relevantes na seleção do equipamento de usinagem.

3 METODOLOGIA PARA PROJETO E FABRICAÇÃO DO MICROATUADOR ELETROTERMOMECÂNICO (META 1)

Neste item será descrita a metodologia empregada para execução das Etapas 1.2 à 1.5 referentes à Meta 1, conforme Tabela 1.

3.1 Materiais

Os principais materiais empregados na fabricação e montagem das micropinças são relacionados a seguir:

- Fabricação: Folha de aço inoxidável (AISI 301): 51 mm x 1,5 m x 0,076 mm; composição do aço AISI 301: carbono: $\leq 0,15$ %; manganês: ≤ 2 %; nitrogênio: $\leq 0,1$ %; fósforo: $\leq 0,045$ %; silício: ≤ 1 %; enxofre: $\leq 0,03$ %; cromo: 16 % – 18 %; níquel: 6 % – 8 %;

Na Tabela 4, são mostradas propriedades de alguns materiais possíveis de serem usados em microatuadores ETM, onde t_f é a temperatura de fusão, α é o coeficiente de dilatação linear, c_T é a condutividade térmica, ρ é a resistividade elétrica, β é coeficiente de variação da resistividade com a temperatura, e ΔL é a porcentagem de dilatação linear de um material sob uma variação de temperatura de 20 °C até sua temperatura de fusão.

Optou-se pelo aço inoxidável AISI 301 com 76 μm (a rigor, 3 mil) de espessura, por este possuir propriedades adequadas para um microatuador ETM (como alto coeficiente de expansão térmica e alto ponto de fusão), aliado ao fato de ser encontrado de forma fácil e barata no mercado nacional.

- Fixação: Laminado de FR4 (fibra de vidro + epóxi) e cobre de 1,62 mm de espessura total. O FR4, comumente utilizado em placas de circuito impresso (PCIs) é envolvido por duas finas camadas externas de cobre, criando uma estrutura em “sanduíche”.
- Tratamento superficial: Ácidos fosfórico (85 % w/w), sulfúrico (97 % w/w), cítrico, fluorídrico e nítrico.

Tabela 4 - Propriedades de materiais (LIDE, 2016; AK STEEL CORPORATION, 2012; UNITED PERFORMANCE METALS, 2014; EFUNDA, INC., 2014; MEMS AND NANOTECHNOLOGY EXCHANGE, 2014; JLC ELECTROMET PVT. LTD., 2014; GOODFELLOW, 2016).

	t_F [°C]	Coefficiente de dilatação linear a 25 °C, α [$10^{-6} K^{-1}$]	$c_T(27\text{ °C})$ [$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Resistividade elétrica (20 °C), ρ [$\mu\Omega.cm$]	Coefficiente de variação da resistividade (20 – 100) °C, β [$10^{-3} K^{-1}$]	ΔL [%]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de escoamento [MPa]
Al	660	23,1	237	2,7	3,9	1,463	70	7-11
Cu	1085	16,5	401	1,7	4	1,745	128	100
Ni (Ni200)	1455	13,4	90,7	7,1	4,4	1,795	190- 220	150-480
Aço Inox AISI 301	1399	17	15,3 (obtido por extrapolação)	72	1,04	2,277	193	205-965

3.2 Equipamentos

- Computadores para projeto via MOT.
- Máquina de usinagem a laser para prototipagem rápida *LPKF U3 ProtoLaser*:
 - Comprimento de onda (λ): 355 nm (UV-A);
 - Potência: < 6 W;
 - Mínimo diâmetro do feixe: 15 μm ;
 - Frequência dos pulsos: 25 kHz - 200 kHz.
- Fonte DC ajustável manualmente *Minipa MPL-3303*:
 - Máxima tensão: 32 V;
 - Máxima corrente: 3,14 A.
- Fonte de alimentação DC *BK Precision 9116*:
 - Máxima tensão: 150 V;
 - Máxima corrente: 30 A.
- Placa de aquisição de dados *National Instruments NI USB-6251*:

- Entradas Analógicas: 16;
- Resolução: 16 bits;
- Taxa de amostragem: 1,25 MS/s.
- Microscópios: *Zeiss Axio Scope A1* e *Keyence VHX-600*.
- Ferro de solda *Weller-WES D51*.
- Câmera de infravermelho *FLIR*, modelo *FLIR T400 western* (Software de tratamento de dados: *FLIR Quickreport* versão 1.2). Este equipamento foi emprestado do Laboratório de Equipamentos e Máquinas (LEME) do IPT para a realização de atividades referentes à caracterização das micropiças fabricadas no LMI.

3.3 Projeto das micropiças e placas de circuito impresso (PCIs)

Neste trabalho, utilizou-se o MOT para auxílio no projeto da geometria das micropiças, ferramenta esta capaz de determinar geometrias ótimas, geralmente não intuitivas, considerando-se uma série de requisitos de projeto, conforme já descrito.

A geometria gerada pelo MOT foi obtida considerando-se a maximização do deslocamento do atuador (pinça) ETM flexível, restringindo-se a corrente elétrica imposta ao mesmo. Adicionalmente, em uma segunda atividade de otimização, minimizou-se a temperatura nas extremidades da micropiça, além de se considerar a restrição de corrente e a otimização do deslocamento (resultados são mostrados na seção 4.5). A otimização deu origem a uma geometria que deve ser pós-processada e convertida em um arquivo de *AutoCAD* (.*dwg*) para fabricação.

As Placas de Circuito Impresso (PCIs), descritas anteriormente, são usadas para fixação das pinças, o que promove a ancoragem mecânica das mesmas e permite a integração do atuador com os sistemas de excitação elétrica e medição/caracterização empregados no trabalho. Nessas condições, a geometria de PCI deve se basear na geometria da pinça. A fixação envolve processo de montagem detalhado na seção 3.4.3.

3.4 Fabricação

3.4.1 Etapa de usinagem a laser

3.4.1.1 Máquina de usinagem e setup inicial

O equipamento de usinagem empregado, o *LPKF ProtoLaser U3* (Figura 13), é uma máquina de prototipagem rápida de circuitos impressos, com comprimento de onda do laser de 355 nm e diâmetro do feixe no foco de 15 µm. Possui computador dedicado com dois *softwares* utilizados na usinagem: o *CircuitCAM* e o *CircuitMaster*.

De posse do desenho do projeto em arquivo de *AutoCAD*, exporta-se o mesmo em formato *.dxf* para o *CircuitCAM*, onde é realizada a simulação do caminho da ferramenta (feixe do laser), tanto no caso da usinagem das pinças, quanto das PCIs. O conteúdo de arquivos *.dxf* é mostrado na Figura 14. O caminho da ferramenta considerado na usinagem da pinça é mostrado na Figura 15. O caminho da ferramenta da PCI não é apresentado, por simplicidade.



Figura 13 - Máquina de prototipagem rápida *LPKF ProtoLaser U3* semelhante à utilizada na fabricação das micropinças.

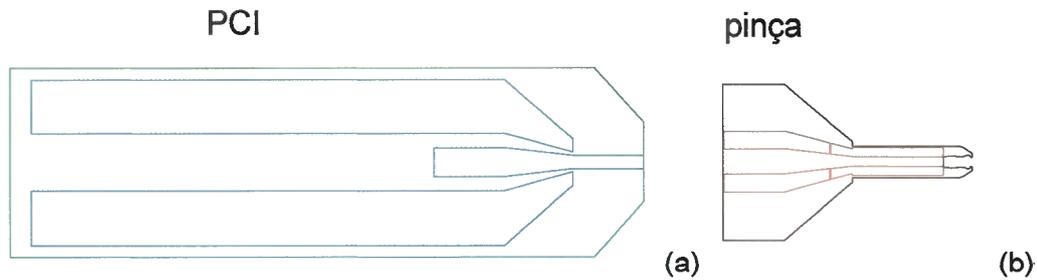


Figura 14 - Conteúdo de arquivos do tipo *.dxf* utilizados para confecção da PCI (a) e da micropinça (b).

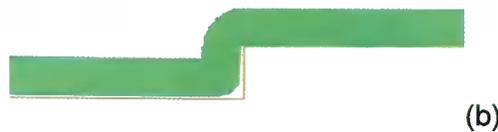
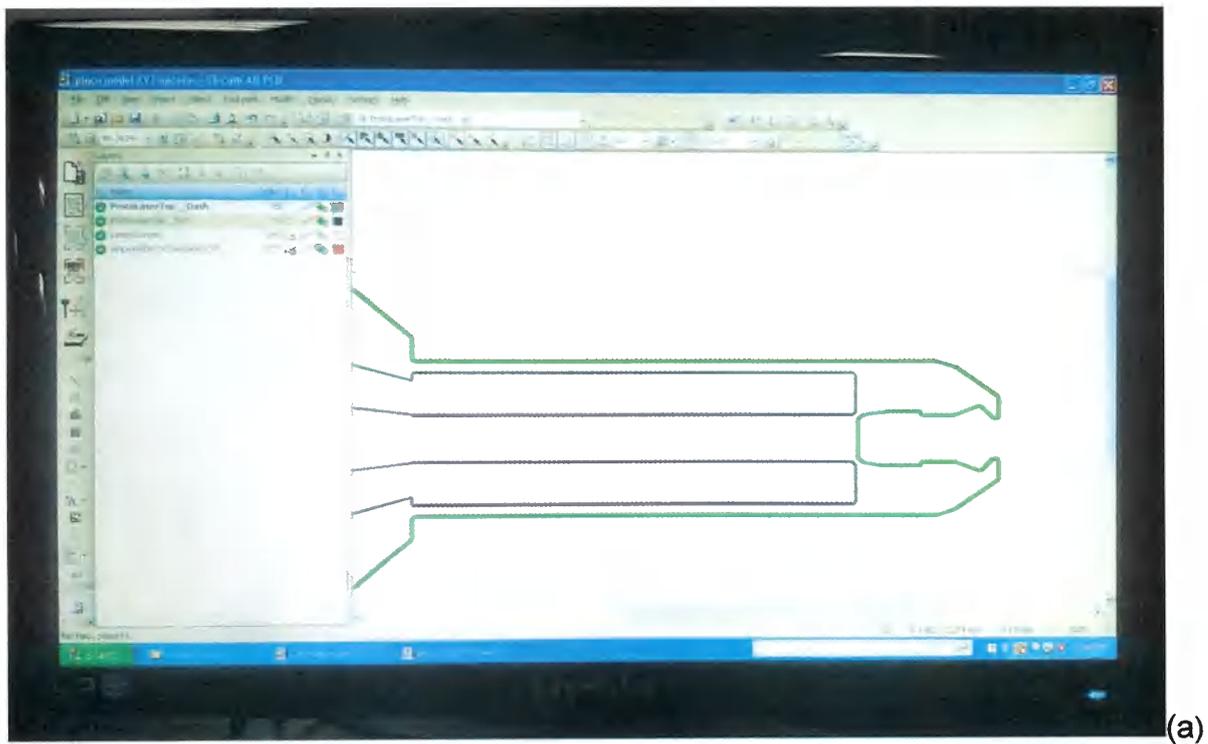


Figura 15 - (a) Caminho do laser na usinagem da pinça. (b) Detalhe, mostrando o arredondamento de cantos internos; nesse caso, a linha vermelha é o contorno nominal externo da pinça.

Ao final da simulação, um arquivo com informação do caminho de ferramenta é exportado para o *software CircuitMaster* que controla o equipamento de usinagem. Ao

inicializar o *CircuitMaster*, o equipamento é referenciado e, em seguida, entra em modo de espera, quando comandos diversos podem ser realizados. Nesse ponto, são atribuídos parâmetros de usinagem, os quais podem ser definidos para cada trecho do caminho de ferramenta. Os parâmetros também podem ser ajustados posteriormente.

3.4.1.2 Fixação da matéria prima e determinação da referência

A primeira ação é posicionar a mesa do equipamento de tal forma a torná-la acessível (vide Figura 16). O *CircuitMaster* disponibiliza essa função.



Figura 16 – (a) Posição da mesa após equipamento ser referenciado. (b) Posição da mesa para colocar peça a ser usinada.

No caso da pinça, fixa-se a folha de aço com aproximadamente 1 cm x 2 cm sobre placa de alumina perfurada especialmente desenvolvida para o projeto (vide Figura 17). A folha é limpa com papel comum e álcool isopropílico, sendo sua fixação realizada com fita crepe comum. Essa placa protege a mesa do equipamento (composta de material polimérico), e ainda permite que o vácuo seja parcialmente transferido para a folha de aço. A não utilização da placa causa danos à mesa do equipamento, reduzindo sua vida útil.



Figura 17 - Folha de aço fixada sobre placa de alumina perfurada, posicionada sobre mesa do equipamento.

Após o posicionamento da placa de alumina na máquina e o acionamento do sistema de filtragem em potência máxima, o qual gera vácuo na mesa, a folha se aproxima da placa de alumina. Deve-se procurar então por ondulações visíveis da folha de aço. Em caso positivo, deve-se desligar o vácuo, retirar a placa, e proceder com nova montagem. O processo é repetido até que não seja obtida melhoria significativa nas ondulações (ou seja, sempre há ondulações, sendo possível apenas redução de quantidade e tamanho). Todo o procedimento é realizado com luvas nitrílicas.

No caso da PCI, não é utilizada a placa de alumina, pois a usinagem dá-se na superfície (como será descrito na seção seguinte) e não se procura por ondulações na superfície do laminado de *FR4* (requisitos de projeto são menos severos nesse caso). O laminado fixado à vácuo diretamente na mesa da máquina é mostrado na **Figura 18**.

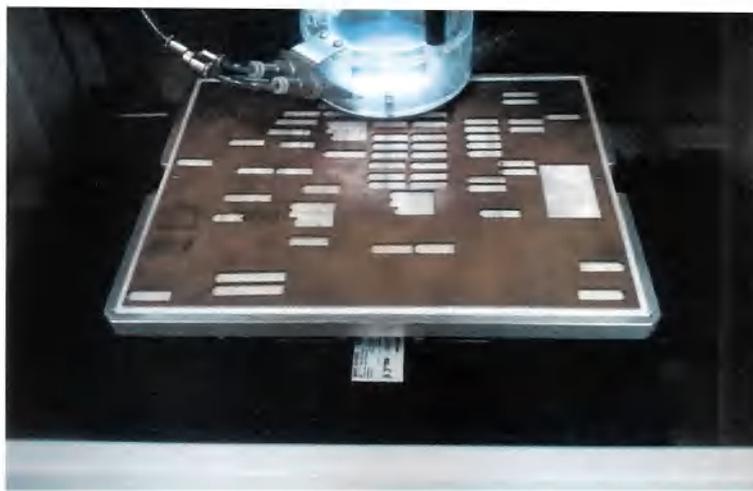


Figura 18 - Laminado de *FR4* fixado a vácuo na mesa da máquina da LPKF.

Ao final da fixação do material a ser usinado, determina-se um ponto de referência sobre o mesmo. Primeiramente, habilita-se a função *auto focus* do *CircuitMaster*, a qual busca o melhor foco para a imagem mostrada pela câmera do equipamento. Então, determina-se a coordenada *z* de referência como sendo um ponto da superfície da matéria prima.

3.4.1.3 *Obtenção dos parâmetros de usinagem e biblioteca de parâmetros*

Na usinagem a laser, é necessário o conhecimento de propriedades do material, para a determinação de valores de parâmetros de usinagem preliminares (potência, frequência, repetições, velocidade do feixe, profundidade do feixe, etc.) e para verificação de adequação do equipamento disponível. Por exemplo, considerando-se o processo térmico de usinagem, quanto mais alto o ponto de fusão do material, maior será a quantidade de energia usada para efetuar a remoção de material (o que pode implicar na necessidade de mais potência). Outra forma de determinar parâmetros preliminares é através de modelos matemáticos dos fenômenos envolvidos na usinagem. Basicamente, os fenômenos ótico e térmico e a interação entre eles são considerados nos modelos. Os fabricantes das máquinas fornecem parâmetros para alguns tipos de materiais, de espessuras específicas. Neste trabalho, dados do fabricante da LPKF foram tomados como base para o ajuste fino dos parâmetros. Na **Tabela 5** são apresentados parâmetros



para usinagem do material estrutural empregado nas micropiças. Cada geometria de micropiça necessitou de pequenos ajustes de valores. No processo de usinagem, optou-se por procedimento em que o foco penetra no material e este é removido em vários passes (ablação), buscando-se obter uma melhor qualidade de acabamento (uma alternativa seria aumentar a potência para atingir a mesma profundidade final).

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem da micropiça. A posição 0 é a coordenada z do ponto de referência.

Frequência (kHz)	125
Potência (W)	1,3
Velocidade do feixe (mm/s)	275
Posições do foco (μm)	0 a 76; passo = 4
Repetições	500 por passo

No caso da PCI foram criados rebaixos no material, expondo o *FR4*, como esquematizado na **Figura 19**. Para destacar a PCI do restante do laminado de *FR4*, foi realizada uma etapa de corte.

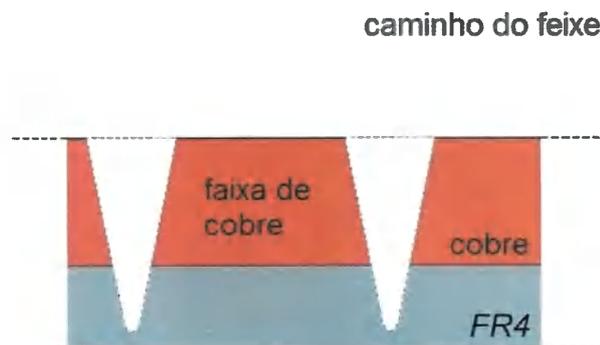


Figura 19 - Criação de faixas de cobre no material laminado. Essas são removidas posteriormente, expondo o *FR4*. As estruturas de cobre resultantes são então usadas na fixação das piças.

A **Figura 20** mostra arquivos de ferramentas de usinagem da biblioteca disponível, incluindo os gerados neste projeto para o aço e *FR4* após ajustes. Alguns desses são fornecidos pela *LPKF* para materiais e dimensões específicas, como mencionado anteriormente. Cada arquivo contém parâmetros de usinagem, como potência e frequência.

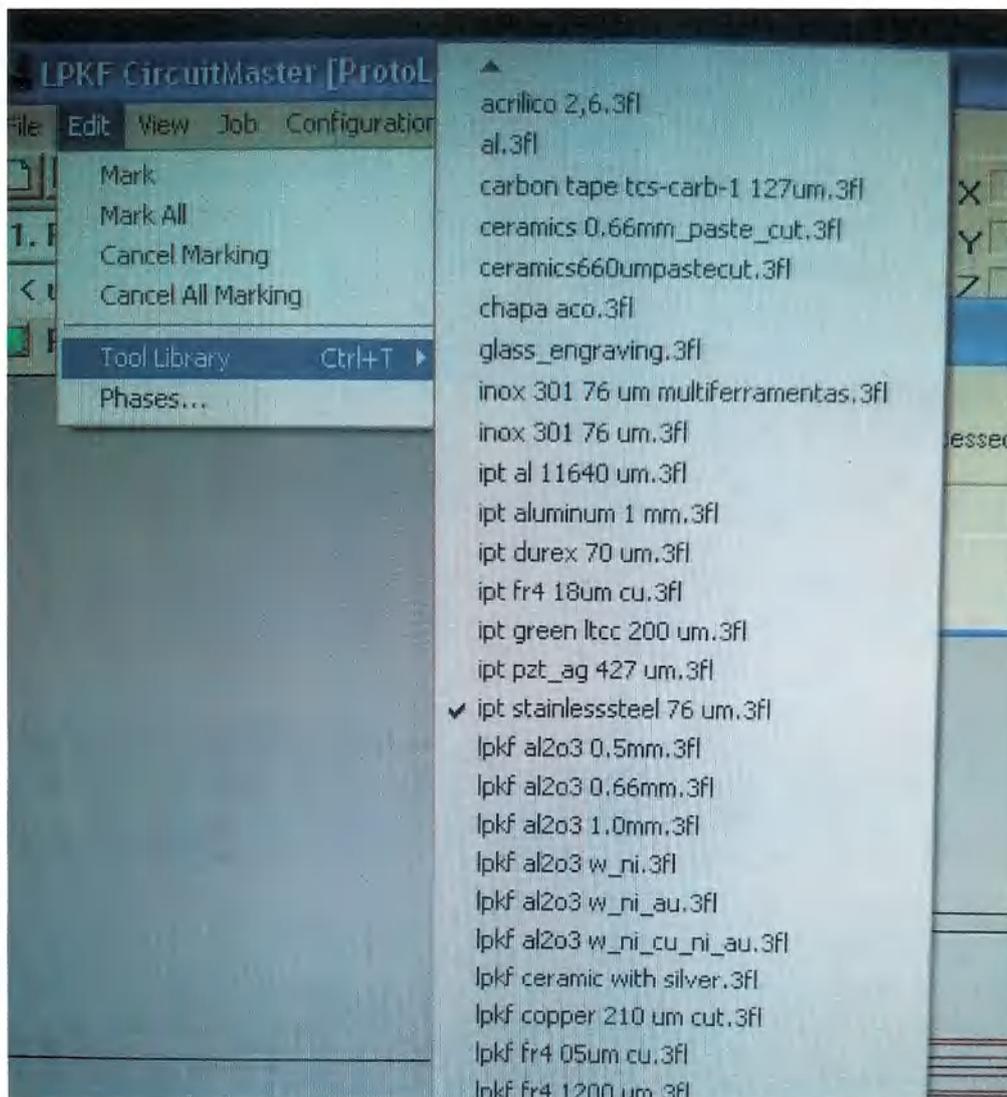


Figura 20 - Alguns dos arquivos de ferramentas de usinagem disponíveis na biblioteca do equipamento.

3.4.2 Tratamento superficial

A fim de remover os óxidos incrustados (regiões mais escuras vistas na micropiçã da Figura 32a), e as rebarbas que surgem no processo de usinagem, foram realizados dois tratamentos superficiais para o aço, sendo então comparados seus resultados.

O primeiro tratamento testado (*pickling*) consiste em mergulhar a micropiçã em uma solução de 20 % HNO₃ + 3 % HF a 55 °C por cerca de 2 min.

O segundo tratamento testado (eletropolimento ou *electropolishing*) foi realizado de acordo com a norma ASTM B912-02 (2013), e consiste em mergulhar a micropiçã em

circular uma corrente elétrica pela micropinça, pelo eletrólito e por um eletrodo de cobre.

Dentre os dois tratamentos, o segundo foi escolhido para ser detalhadamente avaliado neste trabalho por permitir melhor controle do processo de remoção de óxidos incrustados e rebarbas.

Após a fabricação, a micropinça é destacada e limpa em álcool isopropílico, e então é realizado o eletropolimento aplicando-se uma densidade de corrente de magnitude $4,21 \text{ A/dm}^2$ por aproximadamente 20 min. Na **Figura 21**, está um esquema da célula e do procedimento de eletropolimento realizado.

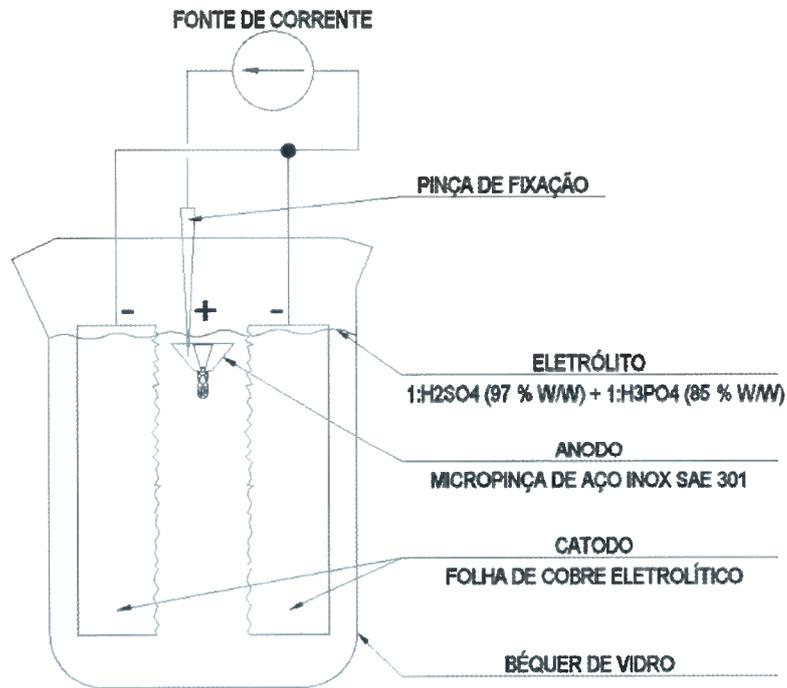


Figura 21 - Esquema da célula de *electropolishing* montada.

Em seguida, a micropinça é mergulhada rapidamente em ácido nítrico (20 % w/w) e sequencialmente em água a fim de se retirar qualquer resto de eletrólito, o qual poderia causar, futuramente, pontos de corrosão no material.

3.4.3 Montagem da pinça na PCI

Após usinagem da PCI, é realizada a limpeza das trilhas com produto específico *LPKF* a fim de remover oxidações do cobre (vide **Figura 22**). O uso do produto envolve uma série de cuidados, conforme descrito no *Material Safety Data Sheet* fornecido pelo fabricante. Em seguida, a placa é lavada com álcool isopropílico e jateada com ar pressurizado. Aplica-se então solda nas trilhas, de modo a formar uma fina camada que protegerá o cobre da oxidação. Uma pequena quantidade de estanho é concentrada na base das trilhas para facilitar a posterior soldagem dos cabos à placa (lado esquerdo da **Figura 22**).



Figura 22 - PCI de *FR4* usinada na máquina da *LPKF* para uma micropinça *W*, mostrando as trilhas de cobre.

Após a fabricação das pinças ou após a etapa de eletropolimento (a realização da montagem não está condicionada ao eletropolimento), as mesmas são mergulhadas em álcool isopropílico, e então é aplicada, uma pequena quantidade de ácido fosfórico (85 % w/w), previamente absorvido pela ponta de um palito, nas âncoras da micropinça. O objetivo é a retirada da camada de passivação para a aplicação de solda (*Sn-Pb*). As âncoras são estruturas usadas, basicamente, no engaste das pinças, como mostradas em detalhes na **Figura 23** e na **Figura 24**. Após a aplicação de solda (com ferro aquecido a 350 °C), etapa esta realizada sob microscópio, a pinça deve ser mergulhada em água destilada para remover resquícios de ácido fosfórico, em seguida em álcool isopropílico para remover vestígios de água, e finalmente seca com leve jato de nitrogênio.

O passo seguinte consiste em alinhar e fixar a micropinça à PCI também com o auxílio de um microscópio. O lado em que foi aplicado o estanho estará em contato com as trilhas da PCI (**Figura 23**). Com a micropinça posicionada, deve-se encostar levemente a ponta do ferro de solda sobre as duas trilhas da placa. O estanho que se encontra depositado nas âncoras das micropinças atingirá o ponto de fusão, juntamente com o

estanho sobre as trilhas. Então, com a ajuda de um gancho de dentista, posiciona-se a pinça (Figura 24) e, ao mesmo tempo, pressiona-se cada uma das âncoras.



Figura 23 – Posicionamento da micropinça na placa. É possível distinguir a região das âncoras, regiões de aço sobre a placa.



Figura 24 – Posicionamento final da pinça. Novamente, é possível distinguir a região das âncoras, regiões de aço sobre a placa.

Terminado esse procedimento, soldam-se pedaços de fio de cerca de 3 cm a cada uma das trilhas na extremidade da placa oposta à micropinça. Na ponta livre de cada fio são então soldados bornes, de forma a facilitar a conexão elétrica posterior do conjunto com equipamentos utilizados na sua caracterização.

3.5 Arranjo experimental para caracterização

Dentro da atividade de “testes de desempenho do microdispositivo” proposta, deve-se realizar uma etapa de caracterização mecânica e elétrica dos dispositivos fabricados, ou seja, determinar a correspondência entre potência aplicada e deslocamento livre, e entre potência e resistência elétrica. A curva gerada pode ser utilizada no controle aberto da pinça.

Para esta etapa de caracterização, o conjunto (pinça e PCI) montado foi colocado sob o microscópio e, inicialmente, conectado a uma fonte de tensão em série com um resistor. A visualização e medição do deslocamento da micropinça foi realizada através do software de captura de imagem *AxioVision*, do fabricante do microscópio (*ZEISS*).

O resistor citado foi confeccionado com um fio de *constantan* (liga que apresenta baixo coeficiente de variação da resistividade com a temperatura) enrolado em um tubo de papelão, e caracterizado através de aplicação de corrente e medição de sua resistência. Obteve-se o valor de $(2,52 \pm 0,09) \Omega$.

Medindo-se com uma placa de aquisição de dados (*NI USB-6251*) as tensões elétricas da fonte e do resistor, calcula-se a tensão da micropinça, sua corrente, sua potência e sua resistência. Na **Figura 25**, é apresentado um esquema do arranjo experimental empregado. Deve-se notar que, a rigor, esta-se medindo a resistência da pinça, das trilhas da PCI de *FR4*, bornes, cabos de conexão elétrica e regiões de solda. Via de regra, porém, essas últimas são menores que a resistência da pinça. De qualquer forma, para simplificar, denomina-se a soma dessas resistências (as quais estão de fato em série) de “resistência da pinça” no restante do documento.

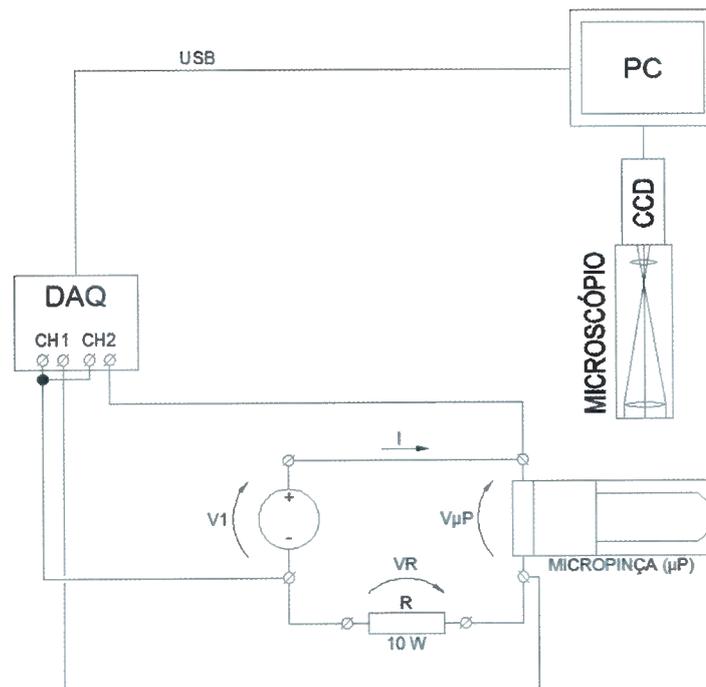


Figura 25 - Esquema do arranjo experimental inicial usado no projeto.

Ao longo do projeto, foi possível a aquisição de uma fonte de alimentação mais moderna (*BK PRECISION 9116*), e eliminou-se o uso do resistor e da placa de aquisição. Isso porque a própria fonte mede a tensão e corrente em seus terminais, e porque ela suporta a baixa resistência da pinça, não necessitando da resistência adicional para proteção. A fonte ainda pode ser controlada através do *LabVIEW*. O novo esquema usado para a caracterização das micropinças é mostrado na **Figura 26**. A bancada é mostrada na **Figura 27**. Descrevem-se, neste relatório, resultados obtidos com ambos os esquemas citados.

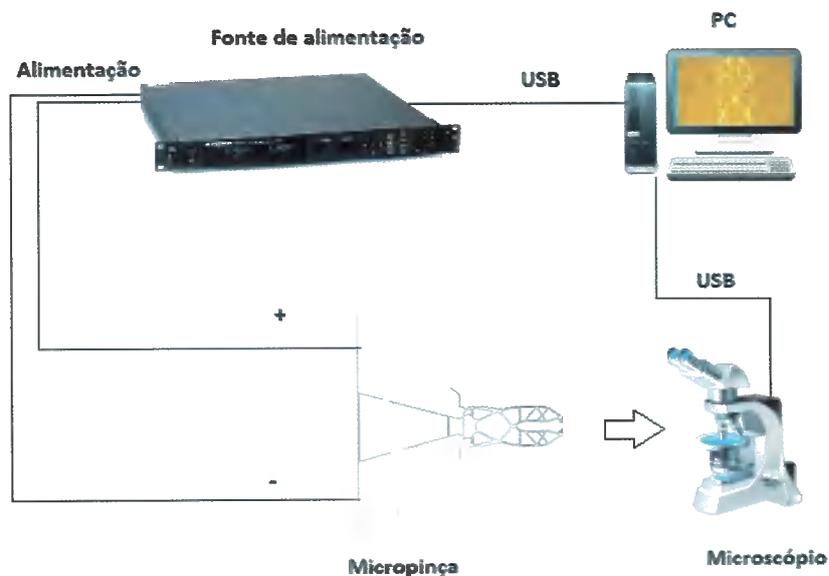


Figura 26 - Esquema do arranjo experimental atual.

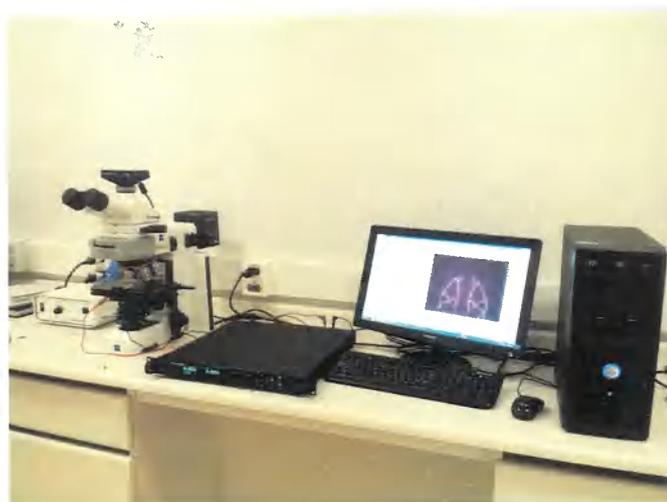


Figura 27 - Bancada utilizada para a caracterização.

3.5.1 Procedimentos de caracterização

Foram desenvolvidos dois procedimentos de caracterização específicos, os quais são descritos a seguir.

3.5.1.1 Procedimento 1 (inicial)

Ajusta-se a tensão da fonte de modo a obter passos de aproximadamente 100 mA indo de 0 A até o limite de corrente que a fonte consegue fornecer (3,14 A) ou até alguma estrutura da micropiça começar a incandescer.

A cada passo de 100 mA, esperam-se alguns segundos para que a micropiça atinja um estado estável e então captura-se a imagem da piça mostrada no software do microscópio, após ajuste do foco. Imediatamente, aciona-se o programa *LabVIEW*, que captura em menos de 20 ms, 100 medidas de tensão tanto do canal 1 (que mede a tensão do resistor) quanto do canal 2 (que mede a tensão da fonte). Com as 100 medidas de cada canal, calculam-se média e desvio-padrão para serem utilizados em cálculos posteriores. As diversas fotos capturadas pelo software do microscópio (uma por passo) são salvas e, posteriormente, com a ajuda de ferramentas do próprio software, mede-se para cada foto, a distância entre braços (abertura) da piça, além de se estimar a incerteza associada ao processo de medição. A incerteza nesse caso está relacionada à resolução da imagem usada no cálculo da abertura. Não foi considerado nenhum outro tipo de efeito. Aberturas, por sua vez, são usadas no cálculo dos deslocamentos.

As incertezas-padrão combinadas (BARATTO et al., 2012), calculadas para as grandezas: resistência elétrica, potência elétrica e deslocamento total da piça, são obtidas considerando-se hipótese de tensão e corrente elétrica não correlacionadas, e aberturas não correlacionadas. As incertezas-padrão combinadas são as incertezas atribuídas às grandezas resistência, potência e deslocamento neste trabalho. Ainda com relação ao cálculo, foram usados apenas termos (derivadas) de primeira ordem na expansão em série de Taylor das funções potência e resistência. Nessas condições, as incertezas-padrão combinadas podem ser calculadas usando a seguinte equação:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

onde f é uma função das variáveis medidas (por exemplo, f pode ser um deslocamento, dado pela diferença entre duas aberturas diferentes), $u(x_i)$ é uma incerteza-padrão e x_i é uma estimativa para uma variável medida (exemplo: abertura). A incerteza-padrão referente às aberturas medidas está relacionada à resolução da imagem usada no cálculo da abertura, como mencionado. As incertezas-padrão referentes à tensão e à corrente na pinça são obtidas utilizando-se as 100 medidas de tensão no resistor de *constantan* e na fonte (e os desvios-padrão correspondentes), a estimativa de resistência do resistor dada no início da seção 3.5, e a própria equação (2). Ou seja, as incertezas-padrão referentes à tensão e à corrente na pinça são incertezas-padrão combinadas das tensões na fonte e no resistor de *constantan*, e da resistência do resistor e tensão no mesmo, respectivamente.

As estimativas da potência, resistência e do deslocamento são obtidas considerando-se valores médios (exemplo: considerou-se a média das tensões elétricas multiplicada pela média das correntes correspondentes como a estimativa da potência).

3.5.1.2 Procedimento 2 (atual)

No procedimento 2 o ajuste de corrente é realizado através do programa em *LabVIEW*. Além disso, os incrementos são ajustados de acordo com as necessidades do experimento. O limite de corrente é determinado aumentando-se seu valor até se detectar uma redução significativa (perceptível) do aumento do deslocamento da pinça com o aumento de potência aplicada. Isso geralmente ocorre após o encandecer de alguma estrutura da micropinça.

A cada incremento ou passo, deve-se aguardar 15 min (temperatura entre 18 °C e 28 °C), pois este é o tempo para estabilização da fonte conforme informado pelo fabricante. Após o tempo de estabilização, deve-se capturar a imagem da micropinça uma série de vezes (com o melhor ajuste de foco possível), registrar os valores de tensão, corrente, resistência e potência elétrica, e em seguida efetuar um novo incremento na corrente. Fixa-se, para o cálculo da média (estimativa) e desvio-padrão da abertura, um número de 10 medidas nas imagens, para cada valor de corrente elétrica aplicada. Quanto aos valores de tensão e corrente, considera-se apenas um valor medido para cada grandeza (o valor do mostrador após a estabilização da fonte). O nível de incerteza

de medição nesse caso é obtido como explicado no parágrafo seguinte. Resistência e potência são calculadas com base na tensão e na corrente.

Novamente, as estimativas de incertezas referentes à resistência elétrica, à potência elétrica e ao deslocamento total da pinça são dadas pelas incertezas-padrão combinadas. As incertezas-padrão combinadas são, mais uma vez, obtidas considerando-se hipótese de grandezas não correlacionadas. Ainda, foram usados apenas termos (derivadas) de primeira ordem na expansão em série de Taylor das funções potência e resistência. Assim, utiliza-se a equação (2) no cálculo. As incertezas-padrão referentes à tensão e corrente são agora calculadas com base no erro máximo, obtido do manual do fabricante da fonte (tempo de estabilização e *range* de temperaturas devem ser observados, como já explicado).

As incertezas-padrão das aberturas são agora estimadas como os desvios-padrão referentes às 10 medidas obtidas. Desta forma, tanto efeitos de temperatura quanto aleatórios estão incluídos na estimativa da incerteza da abertura.

Vale ressaltar que neste caso e no procedimento 1, a estimativa da incerteza, calculada sem usar fator multiplicador ou fator de abrangência (BARATTO et al., 2012), objetiva estabelecer um intervalo de confiança de aproximadamente 68 % para cada mensurando.

3.6 Micromanipulação

A etapa consiste em manipular microelementos através do fechamento das micropinças, mudando a posição desses elementos em relação a sua posição original, nos eixos x e y.

Para a escolha da micropinça deve-se considerar o tipo do material a ser manipulado (estrutura rígida ou deformável), como também o ambiente em que se encontra este material (meio líquido ou gasoso).

Definidos os parâmetros iniciais e escolhida a micropinça adequada parte-se para o processo de micromanipulação, o qual é visualizado através do microscópio. Deve-se posicionar a micropinça, fixada em um suporte através da PCI e já com o esquema

elétrico conectado, de forma que esta possa ter contato com as partículas que estão sendo observadas no microscópio (vide **Figura 28** e **Figura 29**). Nesta primeira fase do trabalho, optou-se por manter a pinça fixa, e movimentar a mesa do microscópio com seus fusos de posicionamento micrométrico, aproximando-se então as partículas e micropinça. Tal procedimento resultou em maior precisão se comparado a movimentação da micropinça para alcançar as partículas (o que teria que ser realizado manualmente). Assim, pode-se constatar o movimento da mesa com relação ao material pinçado. Esse teste simples comprova a possibilidade de manipulação.

A cada agarre de elemento e movimentação do mesmo, medem-se todos os parâmetros da micropinça, como tensão, corrente e potência dissipada, para verificação do comportamento das micropinças durante o processo. Os resultados relevantes são então relatados.

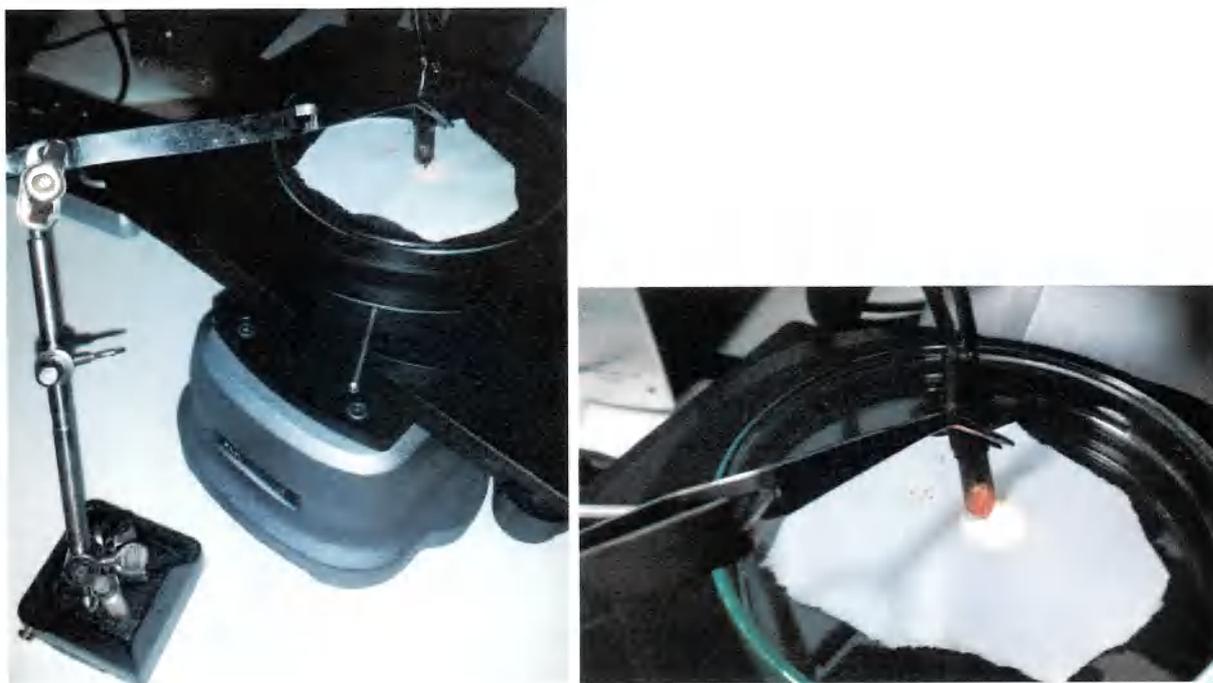


Figura 28 - Posicionamento da micropinça com relação à mesa do microscópio para realização do experimento de manipulação.

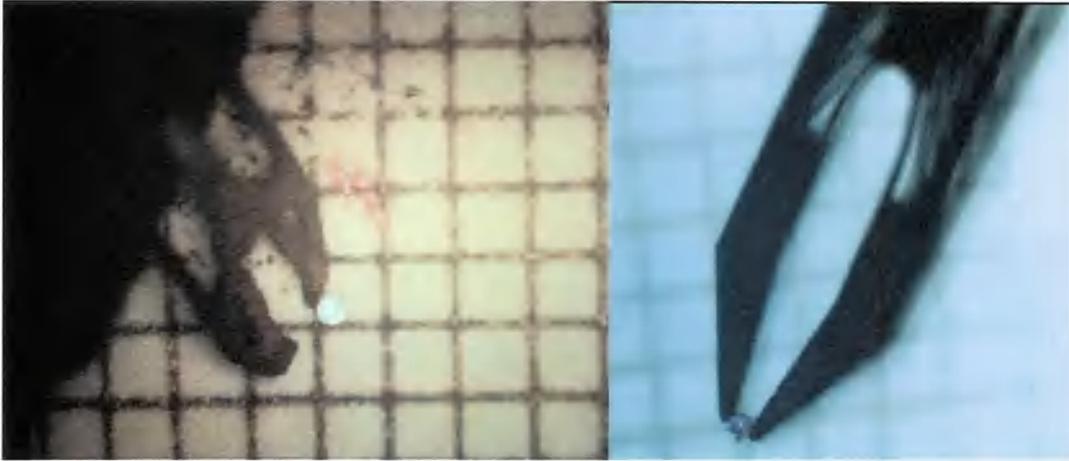


Figura 29 - Visualização de micropinças e do material a ser manipulado no microscópio.

4 EXECUÇÃO, TESTES E OTIMIZAÇÃO DOS MICROATUADORES ELETROMECHANICOS (META 1)

Neste item serão descritos os resultados obtidos na execução das Etapas 1.2 à 1.5, referentes à Meta 1, conforme Tabela 1.

4.1 Projeto das micropinças e PCIs

A **Figura 30**, apresenta as três pinças montadas e caracterizadas no projeto. O primeiro desenho se refere à micropinça W, descrita na literatura (RUBIO et al., 2009) e obtida via MOT para o níquel (em outras palavras, esta geometria não foi determinada no projeto). O segundo é a micropinça U2, criada a partir de duas formas simetricamente espelhadas de um atuador U com o formato das garras (pontas) de uma micropinça W. Já o terceiro é a micropinça PEIXE, recebendo este nome por ter estruturas semelhantes a guelras, sendo uma evolução da U2. As geometrias U2 e PEIXE foram criadas neste trabalho sem utilização do MOT.

A evolução para a geometria PEIXE deu-se com o intuito de se obter uma temperatura menor na extremidade da micropinça, já que a ponta da micropinça U2 caracterizada ao longo do tempo, apresentou escurecimento devido às altas

temperaturas. Adicionalmente, verificou-se a necessidade de uma pinça que fechasse completamente. Propôs-se então (1) alongar as articulações de U2, (2) diminuir a abertura da micropinça ao mesmo tempo em que se alterava a geometria de sua ponta, e (3) adicionar estruturas que interligassem os braços quentes à âncora central de modo a desviar a corrente elétrica (e o fluxo de calor), evitando assim o aquecimento excessivo da região próxima a ponta.

Na **Figura 30**, ainda pode-se observar interligações transversais entre as âncoras, cuja função é aumentar a rigidez do conjunto, diminuindo a chance de danos ocorridos após a microusinagem a laser ou mesmo na montagem. Terminada a montagem da micropinça em sua respectiva placa, essas interligações são retiradas com a ajuda de um estilete.

Como nota, o projeto via MOT realizado neste trabalho é discutido após a apresentação dos resultados de caracterização, para facilitar comparações.

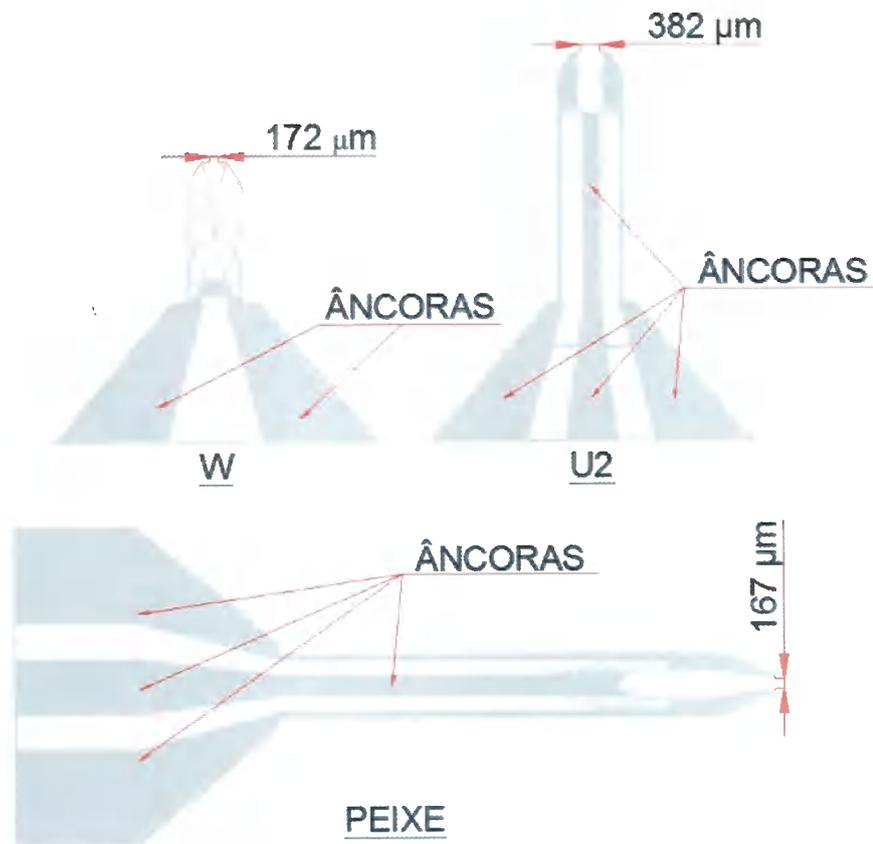


Figura 30 - Micropinças projetadas. Pinça W, otimizada para níquel de 25 µm de espessura; pinça U2, não otimizada, em aço inoxidável de 76 µm; pinça PEIXE, não otimizada, em aço inoxidável de 76 µm.

O projeto de uma PCI, nesse caso para a pinça W, é mostrado na **Figura 31**.



Figura 31 - Leiaute produzido em *AutoCAD*, dimensões em mm. Pinça (W, nesse caso) é posicionada do lado direito.

4.2 Fabricação

4.2.1 Microusinagem a laser

Na **Figura 32**, é mostrada uma das micropinças em aço após a fabricação a laser. Vários testes de parâmetros de usinagem foram realizados até que se chegasse a esse resultado, como mencionado. Nesses testes, ora o material não era atravessado pelo feixe, ora muita energia era concentrada, danificando ou mesmo rompendo alguma viga constituinte.

Ainda na **Figura 32**, é possível verificar diferenças entre as vistas superior e inferior, ou faces de entrada e saída do laser. Essa é uma característica da usinagem a laser, o que pode ser suavizado otimizando-se parâmetros de operação. Nota-se o escurecimento em grande parte da pinça, indicando oxidação. Uma possibilidade não considerada nesta análise é o fato da energia fornecida ser suficiente para alterar a microestrutura do material.

A PCI fabricada para a pinça W, de acordo com o projeto mostrado na **Figura 31**, está apresentada na **Figura 22**.

4.2.2 Eletropolimento da pinça

O eletropolimento cumpriu o objetivo de retirar óxidos incrustados na superfície e suavizar rebarbas. A **Figura 33** mostra a micropinça da **Figura 32** após o procedimento. Na **Figura 34** e na **Figura 35**, são mostradas imagens de microscopia eletrônica antes e depois do eletropolimento.

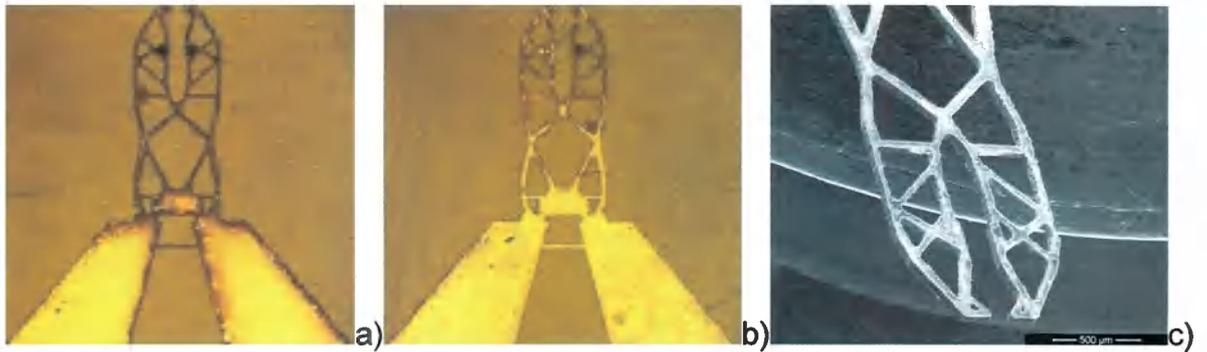


Figura 32 - Pinça W cortada à partir de folha de aço inoxidável AISI 301 com 76 µm de espessura. a) Vista superior; b) vista inferior; c) imagem em MEV.

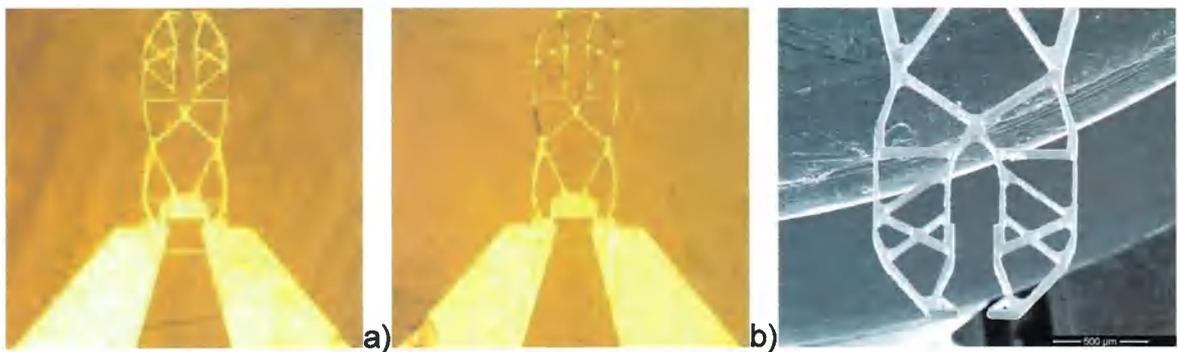


Figura 33 - Pinça W da Figura 32 após eletropolimento (4,21 A/dm² e 20 min). a) Vista superior; b) vista inferior; c) imagem em MEV.

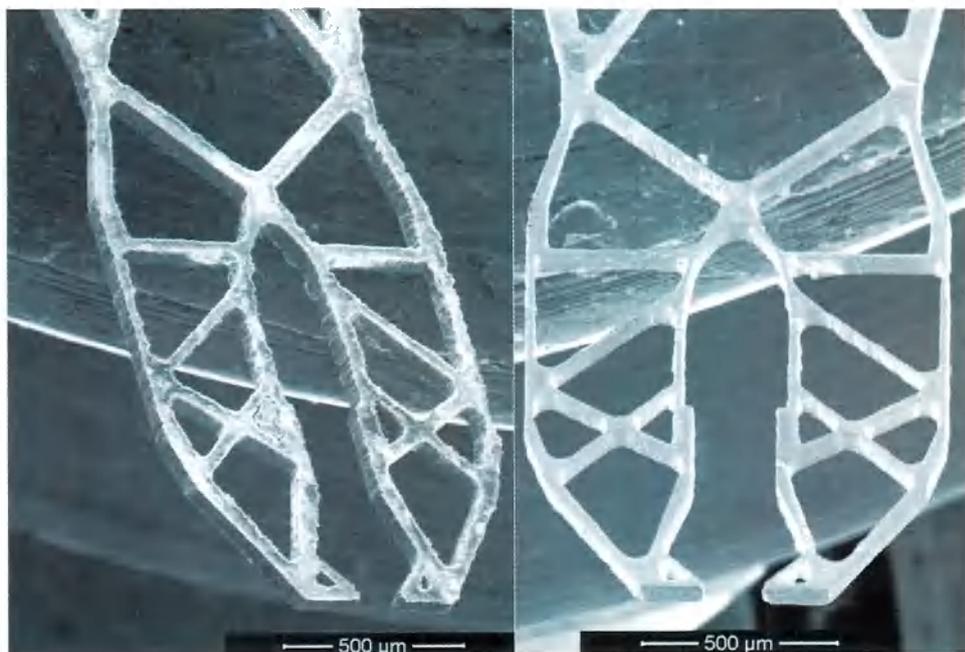


Figura 34 - a) Imagem da micropinça após a microusinagem a laser; b) imagem da micropinça após o eletropolimento.

Na **Figura 34a** são observados óxidos e rebarbas. Na **Figura 34b**, nota-se que os cantos vivos foram eliminados, assim como algumas rebarbas, e praticamente todo óxido foi removido. Porém, a ponta foi levemente corroída devido à alta densidade de corrente nessa região. Assim, após o eletropolimento, é necessária a verificação das dimensões das estruturas. Caso necessário, o projeto deve ter suas dimensões alteradas de modo a compensar a perda de material



Figura 35 - a) Imagem da ponta após a microusinagem a laser; b) imagem da ponta após o eletropolimento.

4.2.3 Montagem das pinças na PCI

A **Figura 36** apresenta foto do conjunto montado de uma micropinça W sobre lâmina retangular de vidro, usada para facilitar a observação sob o microscópio. Na **Figura 37**, pode-se verificar modelos de micropinças adicionais montados, utilizando-se o procedimento relatado neste relatório. Nas pinças mostradas, não foi realizado eletropolimento. Na **Figura 38**, é mostrado o detalhe da ponta da micropinça PEIXE montada em PCI.

A **Figura 39**, apresenta em destaque a região das “guelras”. As interligações nessa região foram projetadas para terem 30 µm de largura. Eletropolimento não foi utilizado neste caso.

Na **Figura 40**, é mostrada uma imagem térmica da micropinça PEIXE em sua máxima potência de operação obtida com a câmera de infravermelho da FLIR. A medida de temperatura indicada na extremidade da pinça é de aproximadamente 90 °C. Ressalta-se que as medidas de temperatura poderiam, em princípio, ser utilizadas no ajuste do modelo de elementos finitos, desde que verificadas e aceitas as incertezas de medição.

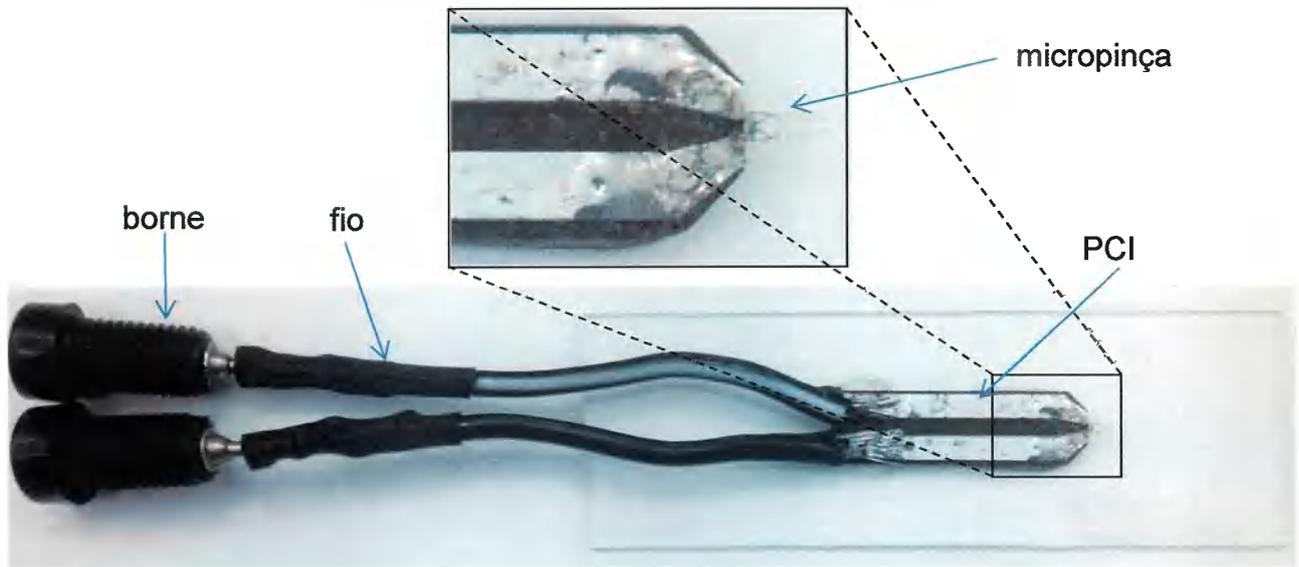


Figura 36 - Conjunto final montado para uma micropinça W.



Figura 37 - Modelos de micropinças adicionais montados no trabalho.



Figura 38 - Ponta da micropinça PEIXE. Imagem obtida através de microscopia eletrônica.

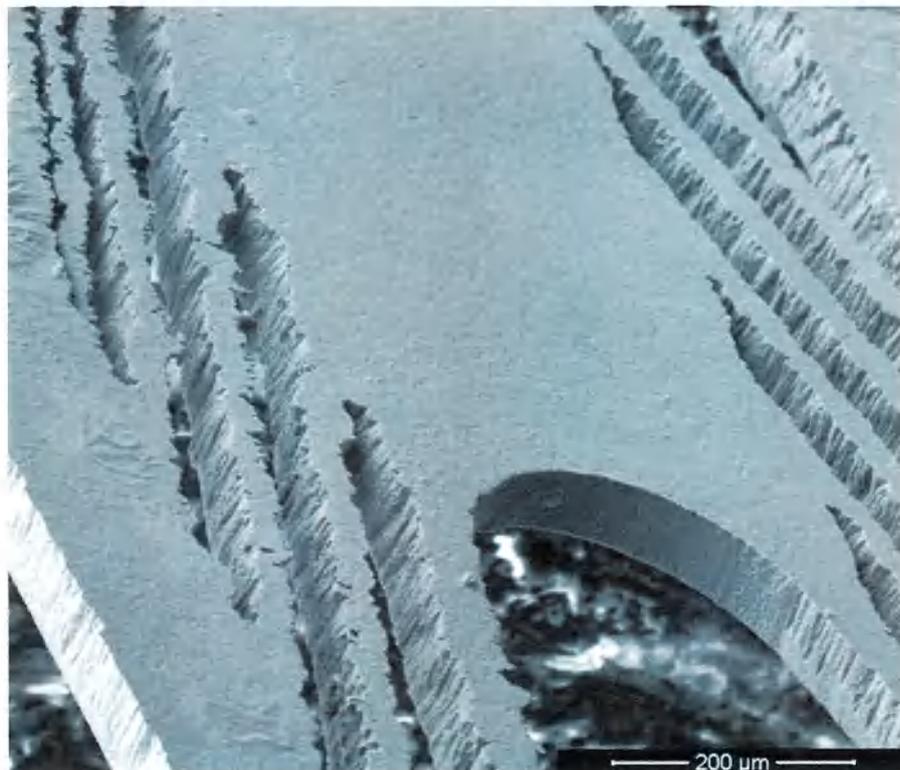


Figura 39 - Região das guelras da micropinça PEIXE.

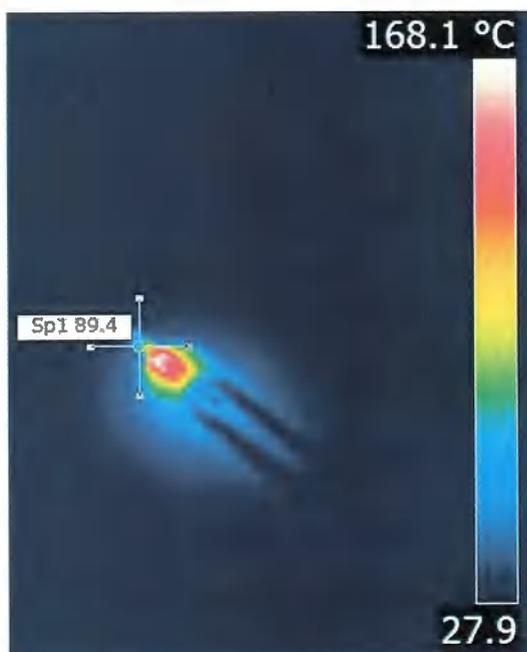


Figura 40 - Imagem térmica da micropinça PEIXE.

4.3 Caracterização das micropiças

Para a obtenção dos resultados apresentados a seguir, utilizou-se o procedimento 1 de caracterização, discutido na seção 3.5.1.1. Nos gráficos da **Figura 41**, **Figura 43** e **Figura 45**, observam-se os deslocamentos livres de cada micropiça em função da potência consumida. As resistências elétricas das pinças em função da potência consumida são apresentadas na **Figura 42**, **Figura 44** e **Figura 46**. Barras de incerteza são mostradas. Esses gráficos correspondem às curvas características das micropiças. Para as micropiças W, U2 e PEIXE, verificou-se correntes experimentais máximas de aproximadamente 3,14 A, 900 mA e 800 mA, respectivamente.

Observa-se em todos os gráficos que os ajustes de curva estão próximos dos valores experimentais (dentro das incertezas). Dessa forma, as equações correspondentes são boas candidatas à utilização para controle em malha aberta das micropiças (levando-se em conta a incertezas associadas). Porém, algumas condições devem ser respeitadas: a temperatura ambiente deve ser próxima à do momento da caracterização ($\sim 24,5$ °C), e o ambiente de operação deve estar livre de fluxos de ar direcionados às pinças. Caso contrário, a dissipação térmica da micropiça é alterada e, conseqüentemente, suas curvas características.

No gráfico da **Figura 47** observam-se as diversas curvas características das micropiças fabricadas. As curvas demonstram que a micropiça PEIXE apresentou a maior relação deslocamento/potência e, conseqüentemente, melhor desempenho. Ressalta-se novamente que a pinça W foi projetada mediante otimização considerando-se o níquel como material.

Observa-se nos gráficos de comparação de resistências (vide **Figura 48**) que a micropiça W apresentou a menor resistência média. Isso pode ocasionar correntes elevadas, não sendo desejável na eletrônica. Já a micropiça U2 foi a que apresentou a maior resistência média e também a maior variação de resistência. Esta última não representa um problema *a priori*. O efeito disso, no caso em questão, é uma variação maior de tensão elétrica.

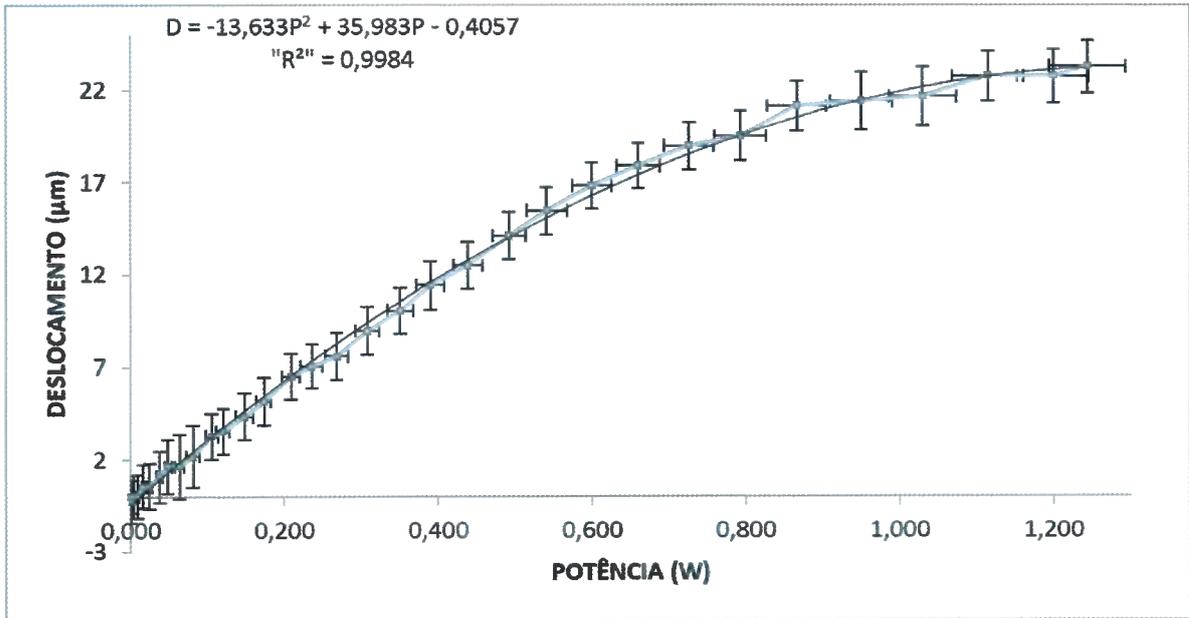


Figura 41 - Deslocamento x Potência aplicada à micropinça W.

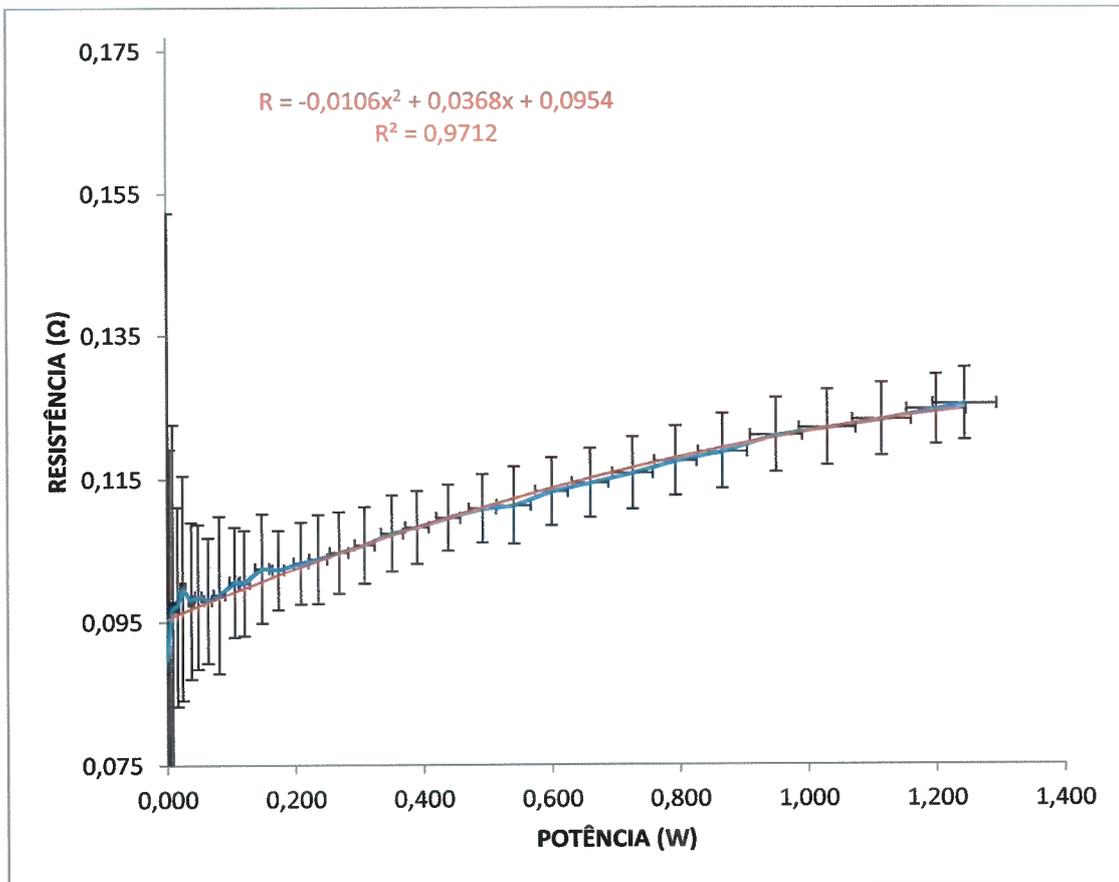


Figura 42 - Resistência x Potência aplicada à micropinça W.

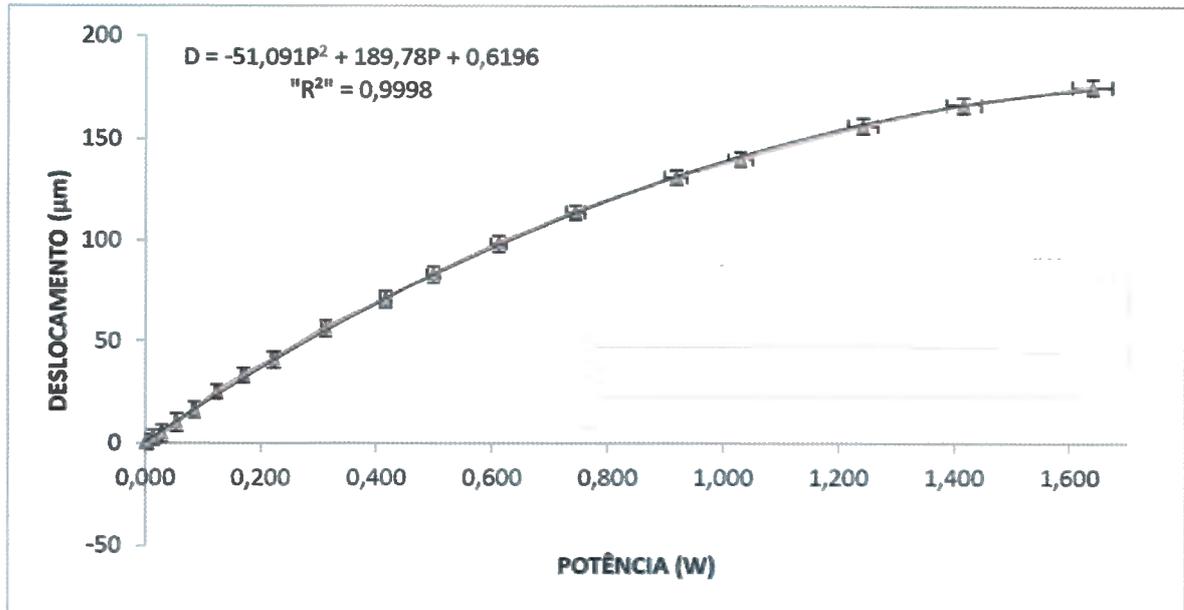


Figura 43 - Deslocamento x Potência aplicada à micropiçã U2.

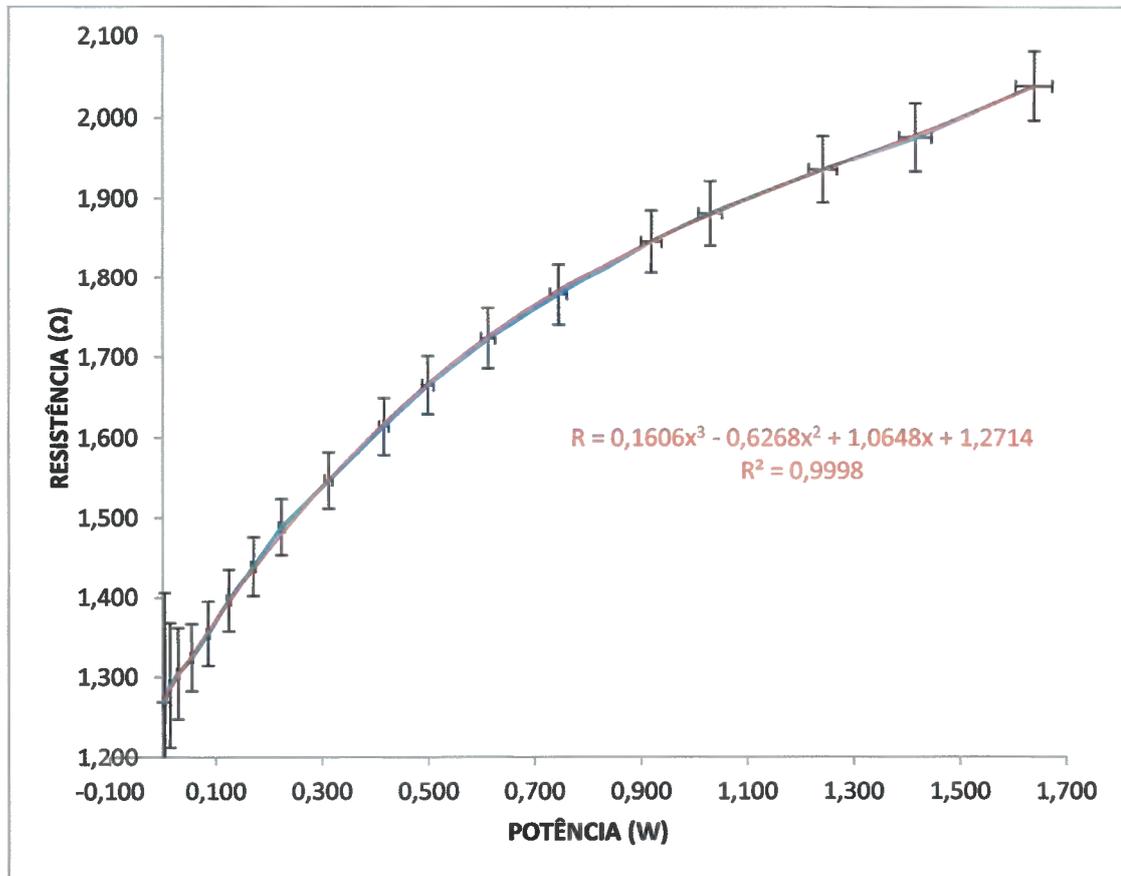


Figura 44 - Resistência x Potência aplicada à micropiçã U2.

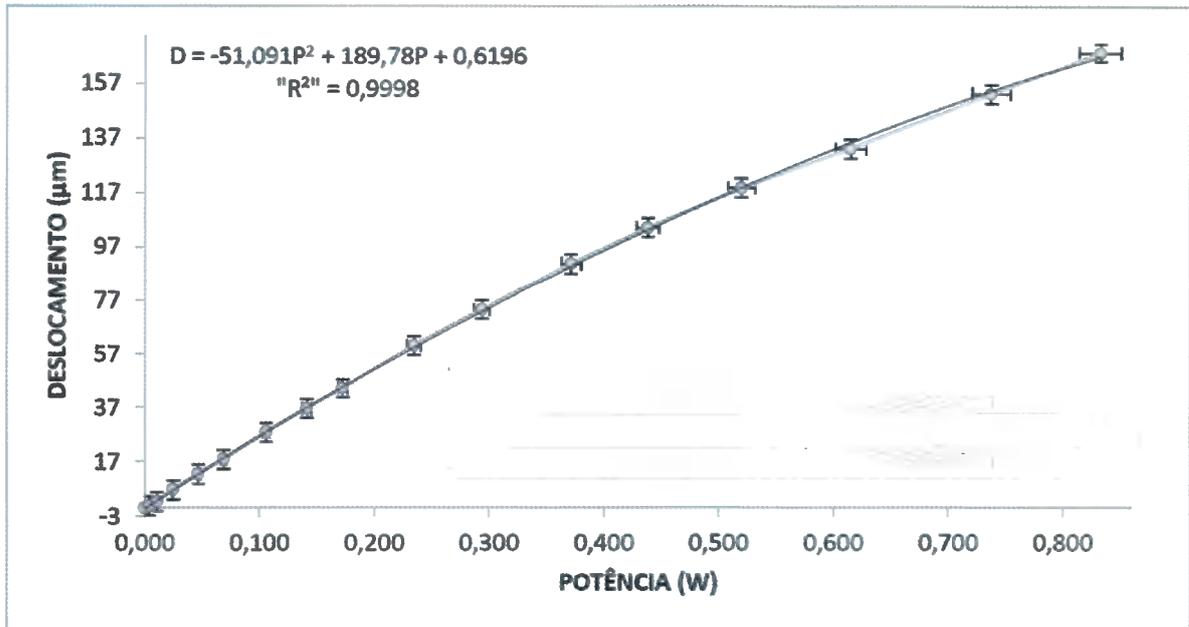


Figura 45 - Deslocamento x Potência aplicada à micropinça PEIXE.

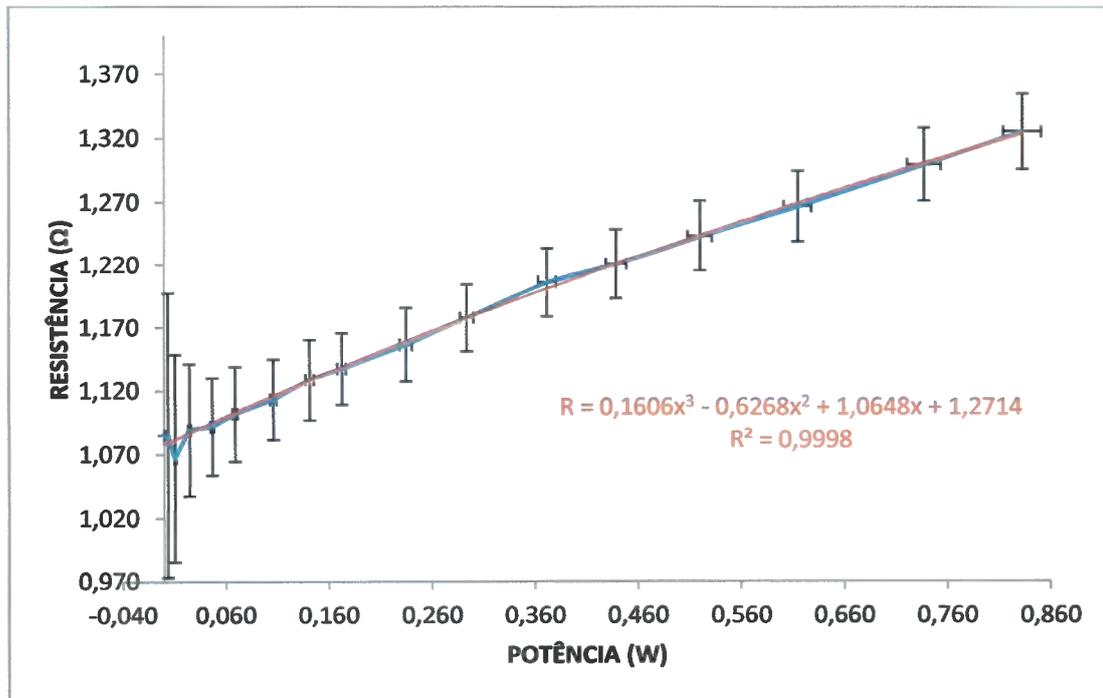


Figura 46 - Resistência x Potência aplicada à micropinça PEIXE.

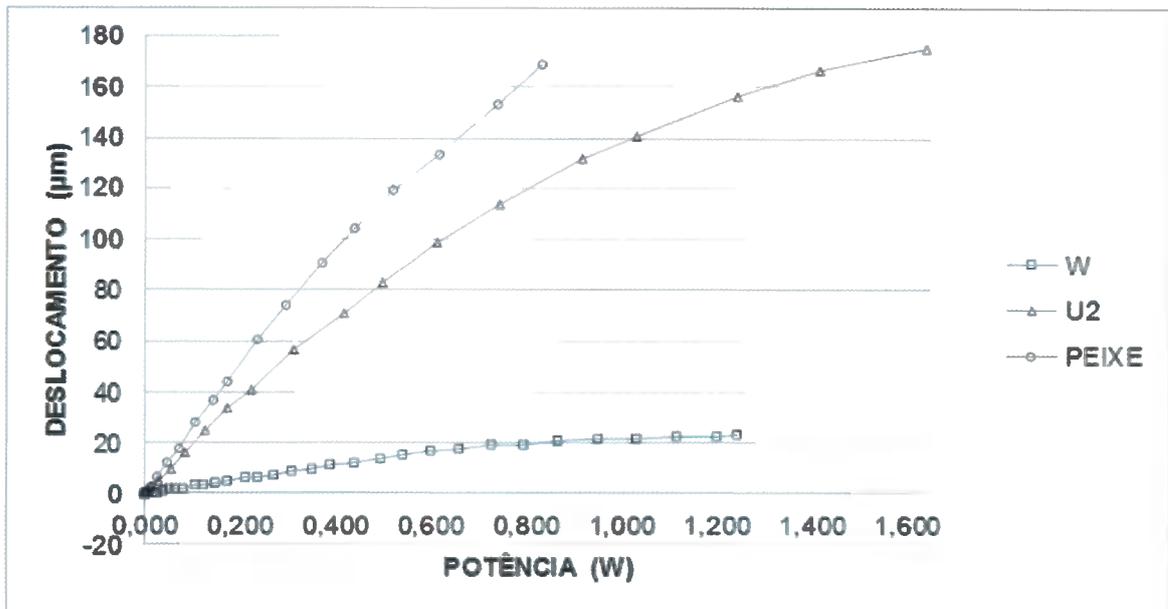


Figura 47 - Comparação de deslocamento x potência para as micropiças apresentadas.

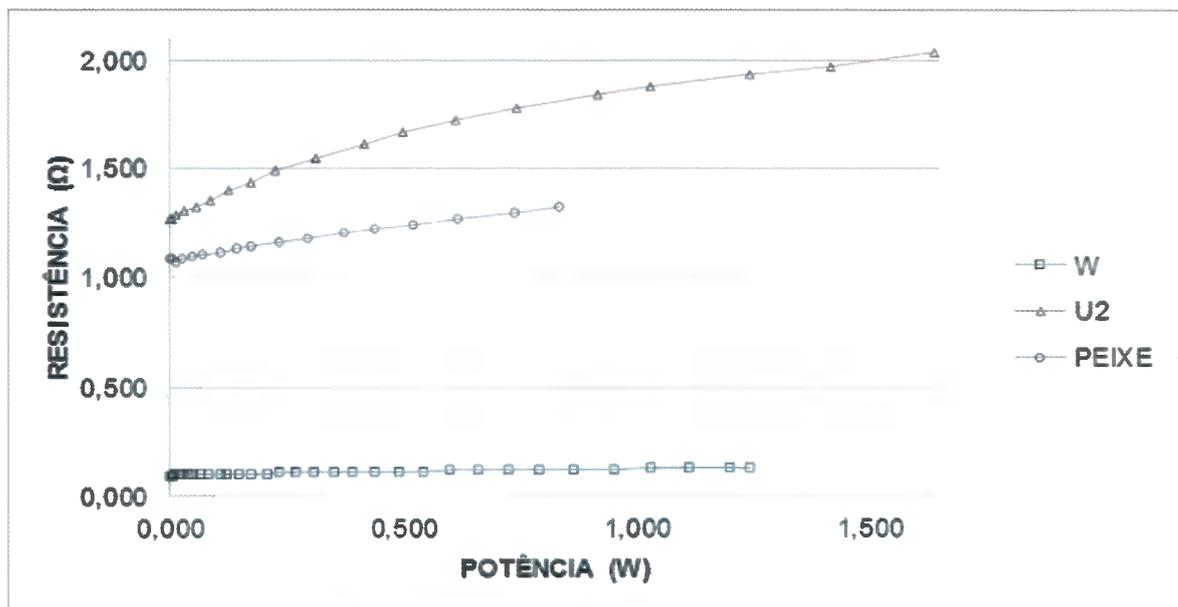
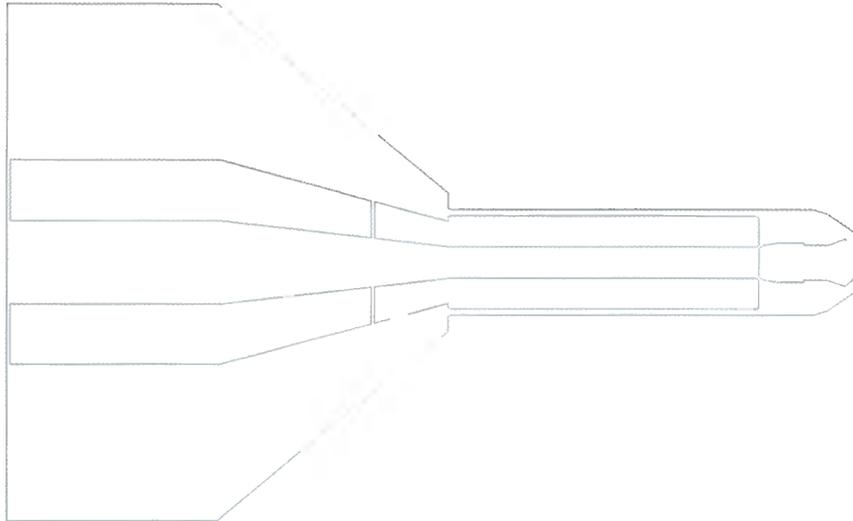


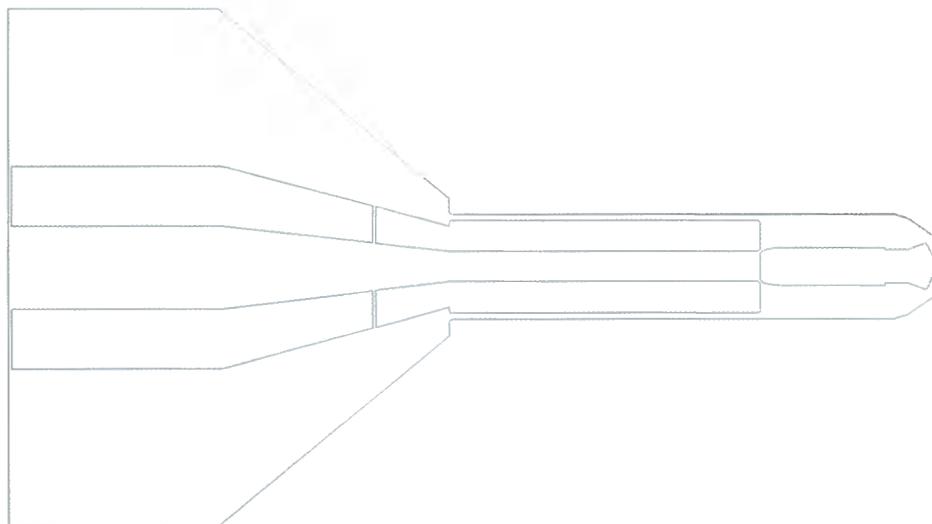
Figura 48 - Comparação de resistência x potência para as micropiças apresentadas.

Como nota, a micropiça W caracterizada está limitada a manipular objetos com dimensões entre aproximadamente 150 µm e 172 µm; a U2, por outro lado, está limitada a manipular objetos de 207 µm a 382 µm, aproximadamente; a PEIXE, por fim, está limitada a manipular desde corpos com dimensões sub-micrométricas até corpos com dimensões próximas de 167 µm. Porém, modificações em suas geometrias podem ser

realizadas para que cada pinça possa então, em princípio, manipular corpos com outras dimensões. De fato, uma modificação simples do desenho da pinça U2 pode ser proposta para se manipular objetos menores (vide **Figura 49**).



(a)



(b)

Figura 49 - Projeto original (a) e modificado (b) da pinça U2. Com o novo projeto, tem-se uma pinça mais longa e uma menor abertura, possibilitado o fechamento para dimensões abaixo de 200 μm .

4.3.1 Avaliação do processo de fabricação

Para avaliação do processo de fabricação, utilizou-se o procedimento 2 de caracterização (vide seção 3.5.1.2), usando a nova fonte de tensão adquirida, eliminando o resistor intermediário (vide o início da seção 3.5 para uma discussão sobre a questão do resistor). Além disso, os parâmetros do laser foram alterados para acelerar o processo de

fabricação (aumento da potência; redução do número de passos; redução da velocidade do feixe). Foram fabricadas e montadas cinco micropiças U2. Optou-se pela U2 por ser mais resistente a problemas de fabricação. Como nota, não foi utilizado o procedimento de eletropolimento nesta etapa.

A caracterização foi iniciada com duas das piças fabricadas, as quais haviam sido atuadas previamente, (ou seja, foram fechadas e abertas algumas vezes antes da caracterização). A terceira piça a ser caracterizada não sofreu atuação prévia. Como foram observadas diferenças de aproximadamente 70 μm nos deslocamentos finais entre as duas primeiras piças e a terceira, optou-se pelo seguinte procedimento de avaliação:

- i. Levantamento das curvas de caracterização de três piças fabricadas e montadas sem serem previamente atuadas.
- ii. Obtenção das referidas curvas de duas delas após dez atuações seguidas até próximo do fundo de escala (fechamento com 1.6 W e depois abertura), não sendo esperado o tempo de estabilização da fonte. Após a caracterização, o mesmo procedimento foi repetido para cada piça, estando então as mesmas sujeitas a 20 atuações nesta segunda etapa do procedimento (sem contar os procedimentos de caracterização).

As três piças caraterizadas sem atuação prévia, denominadas U2_02, U2_03 e U2_04 de acordo com a ordem de fabricação, são apresentadas na **Figura 50**, e rendem as curvas de deslocamento e resistência mostradas na **Figura 51**.

Os deslocamentos são mais próximos para potências baixas (até 0,4W aproximadamente). As aberturas iniciais resultantes são substancialmente diferentes entre si (391 μm , 341 μm e 413 μm), e também quando comparadas à abertura nominal de 382 μm . Tais diferenças são originadas no processo de usinagem a laser e principalmente na montagem, uma vez que a piça está sujeita à deformação durante o procedimento que é manual.

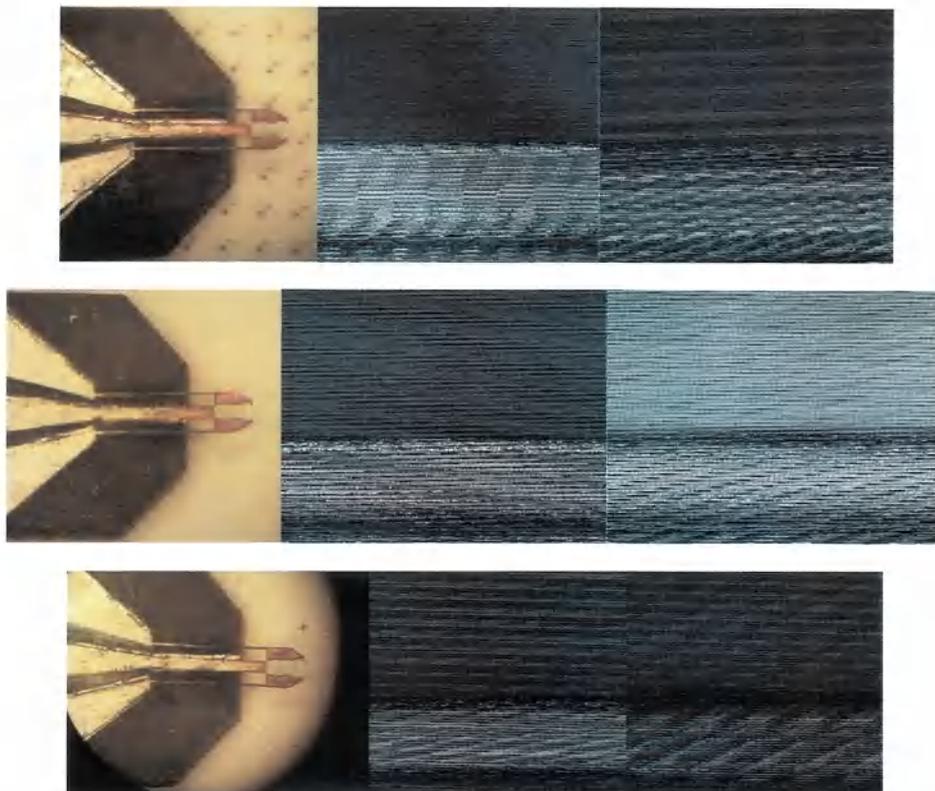


Figura 50 - Pinças fabricadas, montadas e caracterizadas sem atuação prévia. A coluna da direita mostra as pinças atuadas.

Quanto ao deslocamento próximo ao fundo de escala, região mais crítica do ponto de vista de discrepâncias, verificou-se que a maior diferença de deslocamento entre as pinças é de 17 μm (aproximadamente 10% do deslocamento máximo). As micropinças comerciais capacitivas da FemtoTools (2015), por exemplo, também apresentam ganhos (desempenho) individualizados.

Em relação à variação do deslocamento para pinças atuadas previamente, a **Figura 52** mostra os resultados de caracterização de duas das pinças estudadas, atuadas dez vezes após a primeira caracterização. Na **Figura 53**, tem-se os resultados de caracterização das mesmas duas pinças, atuadas dez vezes adicionais (após a segunda caracterização). Nota-se que, supostamente, sempre há alguma diferença entre as pinças, ainda que relativamente pequena. Os resultados referentes a deslocamentos próximos do fundo de escala (deslocamentos máximos) e aberturas iniciais para ambas (vide **Tabela 6**) sugerem que as duas pinças sofrem um processo de aumento de abertura

inicial e deslocamento máximo, e uma redução posterior. Em termos práticos sugere-se atuação da pinça algumas vezes antes de sua aplicação final, apesar dos dados não serem conclusivos quanto a um possível processo de acomodação das pinças.

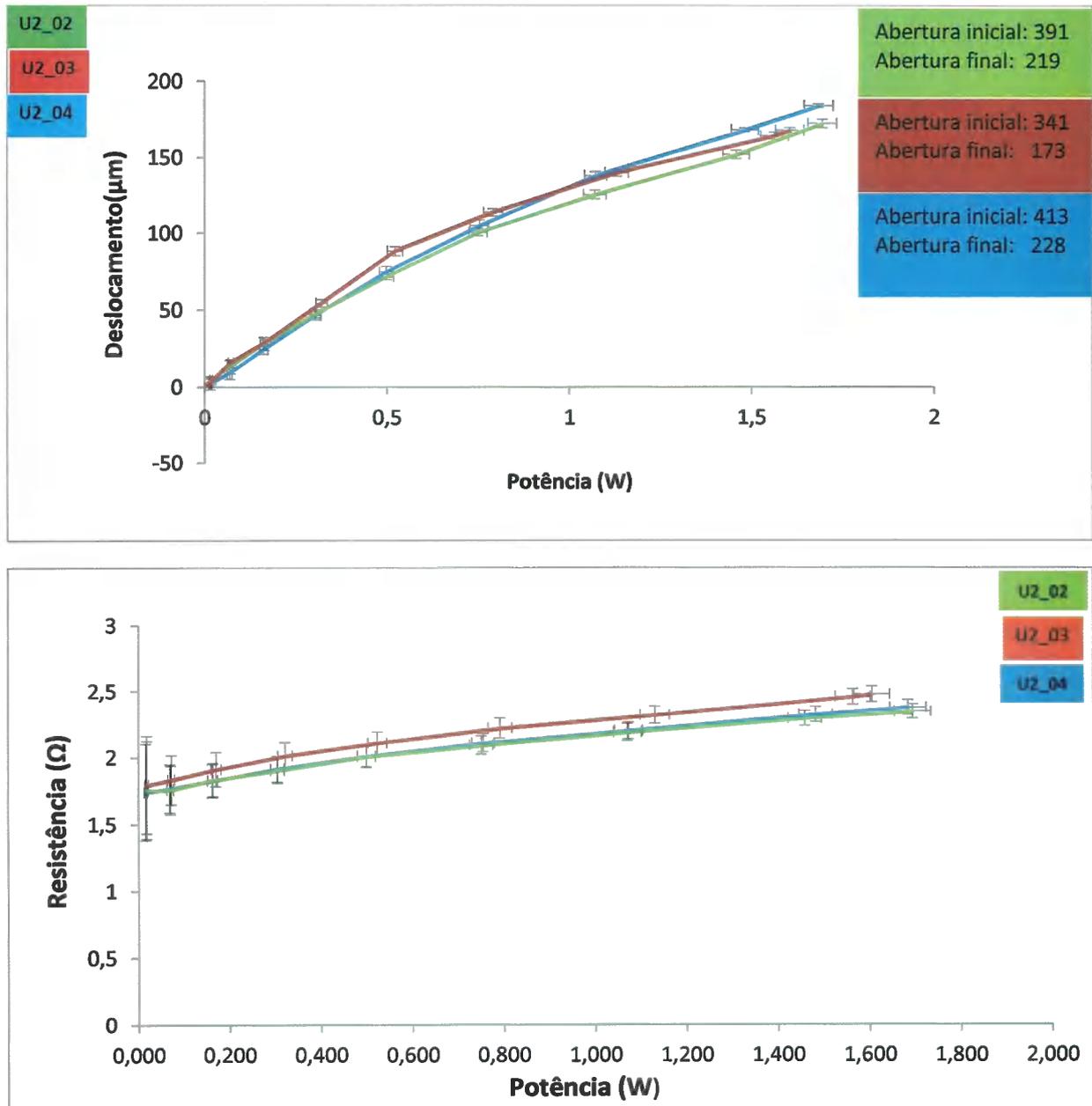


Figura 51 - Comparação de deslocamento e resistência x potência para as micropinças do tipo U2 apresentadas, caracterizadas sem atuação prévia.

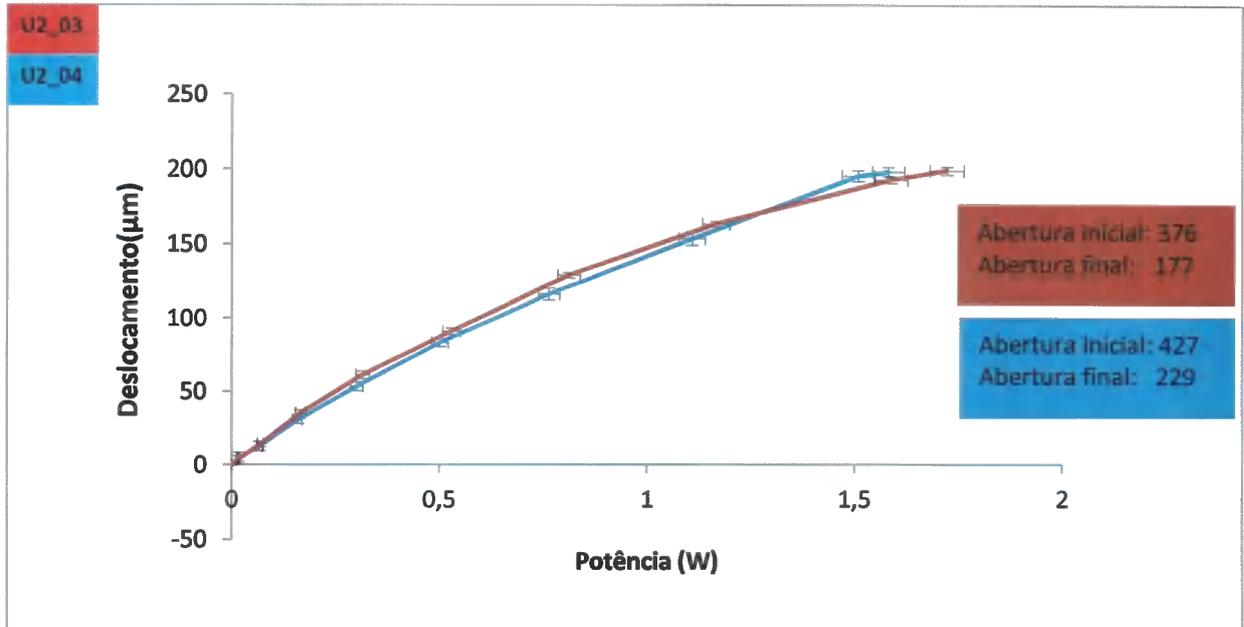


Figura 52 - Comparação de deslocamento x potência para as micropiças do tipo U2 estudadas, caracterizadas após 10 atuações e uma caracterização prévia.

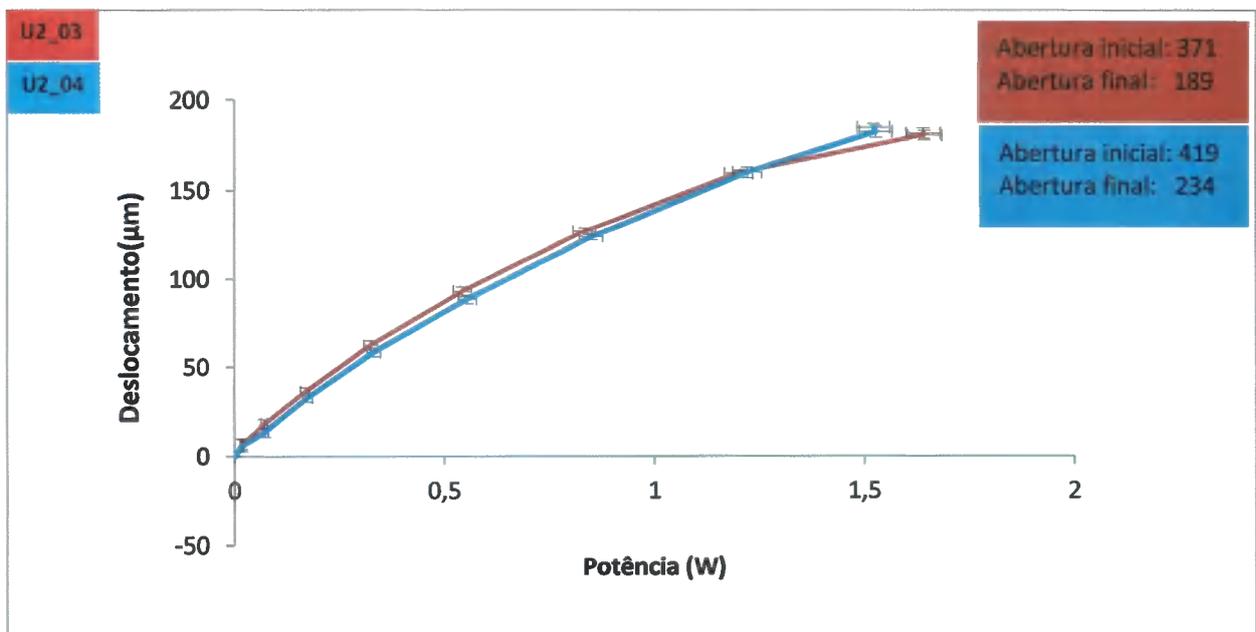


Figura 53 - Comparação de deslocamento x potência para as micropiças do tipo U2 estudadas, caracterizadas após 20 atuações e dois procedimentos de caracterização prévios.

Uma possível explicação para a variação de deslocamentos e aberturas após a atuação repetida até o fundo de escala (1,6 W) é o escoamento do aço e do estanho, dadas as temperaturas elevadas combinadas com os grandes deslocamentos detectados

(vide **Figura 50** para uma ideia da ordem de grandeza desses deslocamentos). Após submeter uma das pinças ao procedimento de verificação da acomodação mencionado anteriormente, a mesma foi excitada dez vezes próximo de 0,7 W e, após ser excitada com 0,75 W, aproximadamente, não apresentou diferença detectável no deslocamento. Porém, levando-se a mesma novamente à marca de 1,6 W por dez vezes, detectou-se uma significativa redução de deslocamento (de 112 μm para 103 μm).

Tabela 6 – Aberturas e deslocamentos das pinças.

	Abertura inicial após fabricação	Abertura inicial após caracterização e atuação por 10 vezes	Abertura inicial após 2 caracterizações e atuação por 20 vezes	Deslocamento máximo na primeira caracterização	Deslocamento máximo na segunda caracterização, realizada após atuação por 10 vezes	Deslocamento máximo na terceira caracterização, realizada após atuação por 20 vezes
Pinça U2_03	341	376	371	168	199	182
Pinça U2_04	413	427	419	184	198	185

4.4 Micromanipulação com micropinças fabricadas

Na **Figura 54** é possível observar a micropinça PEIXE e a partícula a ser manipulada, uma esfera de rubi de 150 μm de diâmetro (o vídeo pode ser visualizado em www.ipt.br/lmi). A micropinça demonstrou força de agarre suficiente para prender a esfera e movimentá-la. Um cuidado especial deve ser tomado quanto à força a ser aplicada pela micropinça, pois para intensidade elevada a esfera tenderá a escapar da micropinça com grande velocidade (efeito verificado algumas vezes durante a fase inicial de manipulação). Desta forma verifica-se a necessidade de micropinças com sensor de força, para que esta variável possa ser controlada durante o processo de micromanipulação.

Também foi verificado em algumas situações, que a partícula manipulada não se soltava quando ocorria a abertura da pinça (era atraída por uma das pontas da pinça). Isso ocorre devido às forças de adesão em microescala entre a partícula manipulada e a micropinça. Na literatura, há trabalhos completos que visam unicamente obter estratégias

de liberação eficazes das micropartículas, objetivando anular a ação das forças de adesão (principalmente, Van der Waals, força eletrostática e força capilar, as quais têm maior influência do que a força gravitacional sobre a micropartícula). Entre essas estratégias, tem-se as propostas por DEJEU et al. (2012), que revestiu a superfície das pontas de uma micropinça com nano esferas de poliestireno, reduzindo a superfície de contato, sendo portanto um método passivo de liberação, e a estratégia proposta por CHEN et al. (2012), que fornece vibração através de um cristal piezelétrico anexado à micropinça para realizar a liberação, caracterizando-se como um método ativo. Mesmo esses métodos não se mostraram totalmente eficazes, o que demonstra a necessidade de estudos adicionais.

O procedimento de manipulação com a micropinça PEIXE foi também testado com sucesso para o fio de cabelo mostrado na **Figura 55**, de espessura pouco inferior ao diâmetro da esfera.



Figura 54 - Manipulação de uma esfera de rubi de 150 μm de diâmetro pela micropinça PEIXE.



Figura 55 - Manipulação de um fio de cabelo.

4.5 Resultados do MOT

O domínio de projeto discretizado em elementos finitos é mostrado na **Figura 56**. Esse domínio foi definido com base na pinça U2, tendo-se como principal objetivo obter uma pinça manufaturável com máximo deslocamento que atendesse a restrição de corrente elétrica máxima imposta. As condições de contorno consideradas são mostradas na mesma figura.

O material usado é o aço inoxidável AISI 301, sendo as propriedades fornecidas pela empresa AK Steel Corporation (2012). A tensão elétrica aplicada foi de 0,4956 V, com corrente de 0,3444 A (valores médios obtidos através da caracterização U2 utilizando o procedimento 1).

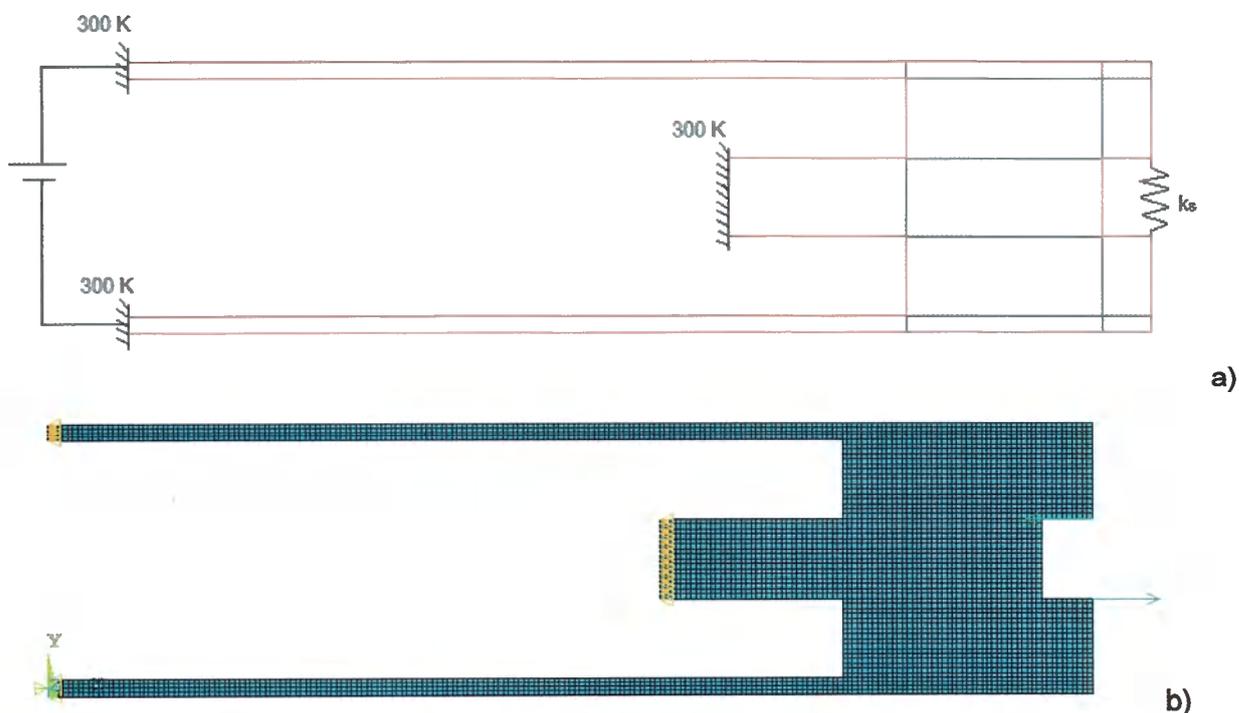


Figura 56 – a) Domínio de projeto considerado, mostrando condições de contorno (a condição de convecção natural considerada foi omitida no desenho, para manter a clareza). O comprimento e a largura correspondem aos valores de U2. Constante da mola $k_s = 4000\text{N/m}$. b) Malha de elementos finitos empregada. Foram usados 4473 elementos finitos retangulares de 4 nós. Alguns símbolos de condições de contorno são mostrados.

O resultado da otimização é mostrado na **Figura 57a**. O pós-processamento do resultado produziu a estrutura livre de propriedades (indesejadas) intermediárias de

material (elementos cinza) mostrada na Figura 57b, e denominada U2MOTP, para a qual obteve-se deslocamento de 31 μm e corrente de 0,346 A (já ajustada), sendo a tensão elétrica aplicada a mesma citada anteriormente.

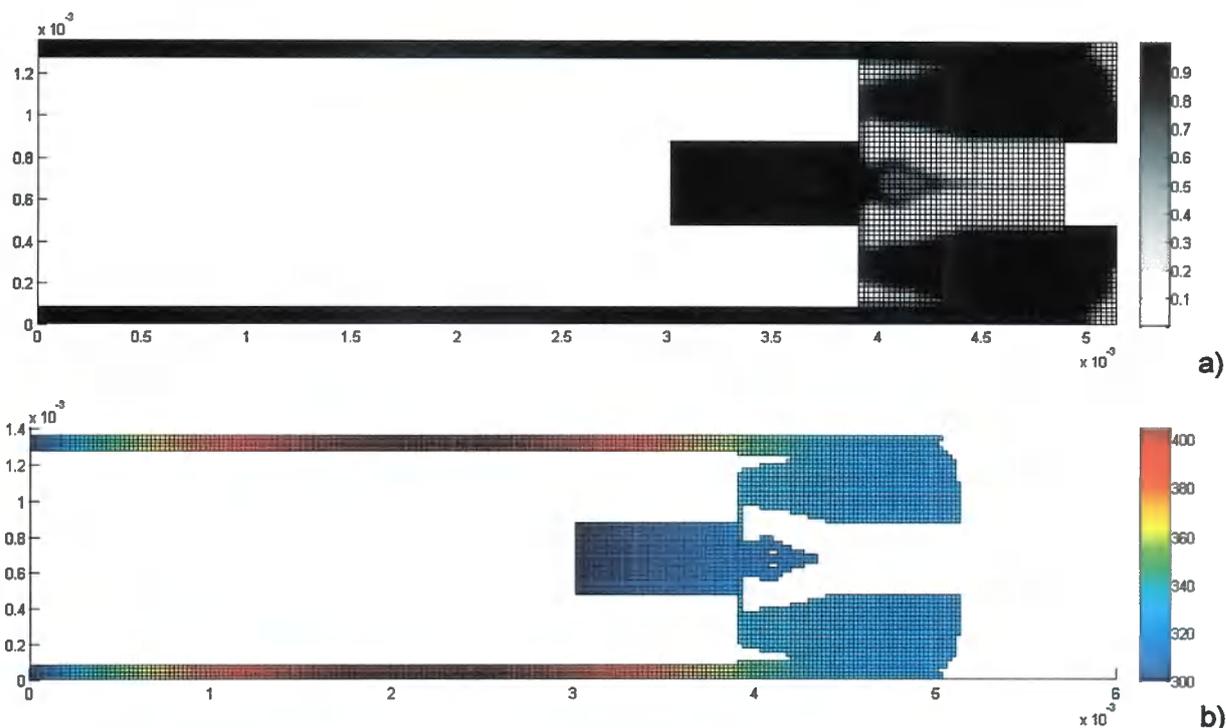


Figura 57 - a) Resultado da otimização. b) Resultado após pós-processamento. A distribuição de temperaturas, obtida por elementos finitos, é mostrada.

A etapa de otimização foi precedida de uma etapa de ajuste de parâmetros de modelo de elementos finitos. Nesse caso, criou-se um modelo semelhante à pinça U2 e ajustou-se o coeficiente de convecção natural comum a todas as estruturas para que a diferença entre o deslocamento do modelo e da pinça fosse menor que 2 %, quando aplicada a tensão de 0,4956 V. Esse coeficiente foi então utilizado no projeto por MOT da pinça otimizada. Tal aproximação foi realizada por não se conhecer uma maneira de parametrizar valores de coeficientes de convecção usando variáveis de projeto de MOT (BENDSΦE; SIGMUND, 2003), o que tornaria possível a alteração dos coeficientes pelo algoritmo de MOT ao longo do processo iterativo de otimização.

Comparando-se os deslocamentos das pinças U2MOTP (31 μm) e U2 (33 μm), com incerteza atribuída à medição de deslocamento de 4 μm , e dadas as correntes de U2

e U2MOTP, 0,344 A e 0,346 A, respectivamente, com incerteza associada de 0,007 A, verificou-se um empate técnico de desempenho das pinças. Devido a tal proximidade de desempenho e ao fato da geometria U2 ter sido determinada antes de realizada a otimização, decidiu-se pela não fabricação da pinça U2MOTP. Com o objetivo de aumentar as chances de se obter estrutura com melhor desempenho, optou-se então por um domínio de projeto com mais área livre para otimização na região central, comparado ao domínio da **Figura 56**. No entanto, a resposta da otimização convergiu para resultados não manufaturáveis, os quais, depois de modificados visando fabricação, tiveram seu desempenho alterado negativamente e substancialmente.

Analisando-se a temperatura na extremidade da pinça U2 obtida via elementos finitos para a mesma tensão elétrica de referência nas simulações, obteve-se o valor de 325 K, ou 51,85 °C, o qual considera-se elevado para o nível de potência empregado e para futuras aplicações pretendidas (como manipulação celular). Esse fato motivou o refino da otimização mediante a minimização da temperatura na extremidade da pinça, ao mesmo tempo em que se maximizou o deslocamento mantendo-se a restrição de corrente elétrica máxima circulando na pinça. O resultado é mostrado na **Figura 58a**. O pós-processamento do resultado produziu a estrutura mostrada na **Figura 58b**. Esta pinça, denominada U2MOTTP, apresentou redução significativa de temperatura na extremidade, de 51,85 °C para 31,85 °C, porém com penalidades para o deslocamento, que reduziu de 33 µm (U2 não otimizada) para 26 µm, e também para a corrente, que aumentou de 0,344 A (U2 não otimizada) para 0,356 A. Com a alteração de alguns parâmetros de otimização, consegue-se a geometria da **Figura 59a**, cujo pós-processamento rende a **Figura 59b**. Nesse caso, a fabricação é simplificada, porém, o deslocamento final é reduzido para 20 µm, e a temperatura na extremidade é aumentada para 39,45 °C. Assim, verifica-se que existe uma solução de compromisso entre simplicidade da geometria e desempenho quando otimizada, adicionalmente, a temperatura.

A fabricação desta nova versão otimizada não foi realizada devido às limitações do laser LPKF para reprodução da geometria resultante. Uma alternativa, sugerida para trabalhos futuros, é a utilização de processos de microfabricação em Sala Limpa, incluindo fotolitografia e deposição de filmes finos.

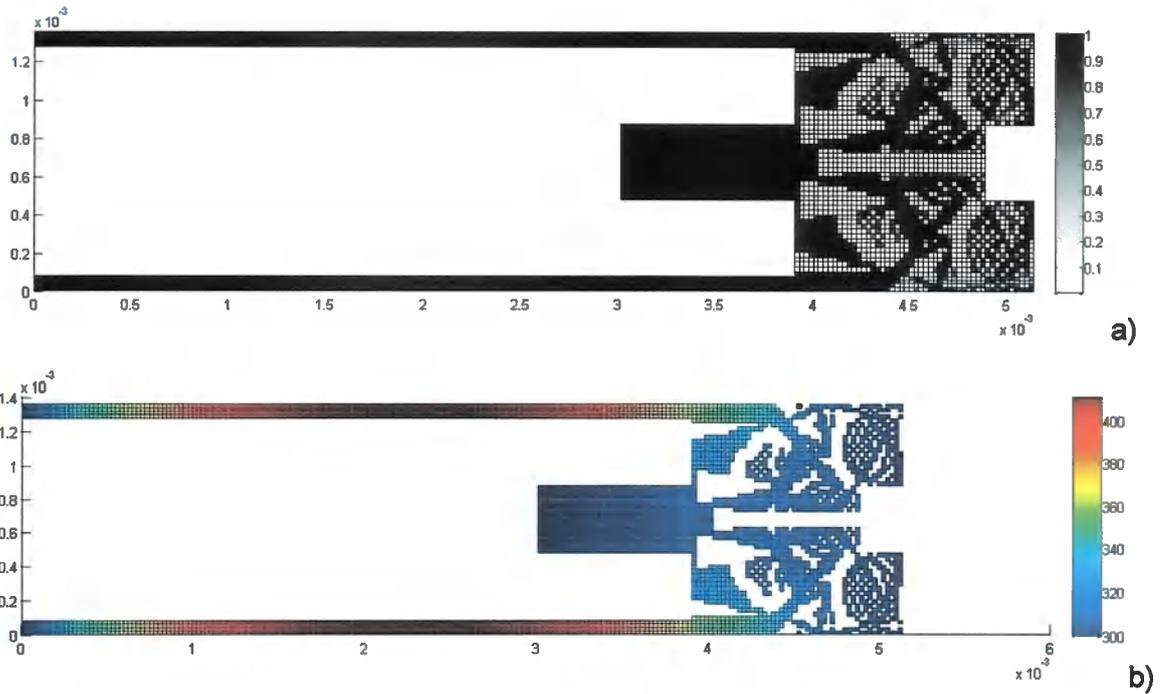


Figura 58 - a) Resultado da otimização minimizando-se as temperaturas. b) Resultado após pós-processamento. A distribuição de temperaturas, obtida por elementos finitos, é mostrada.

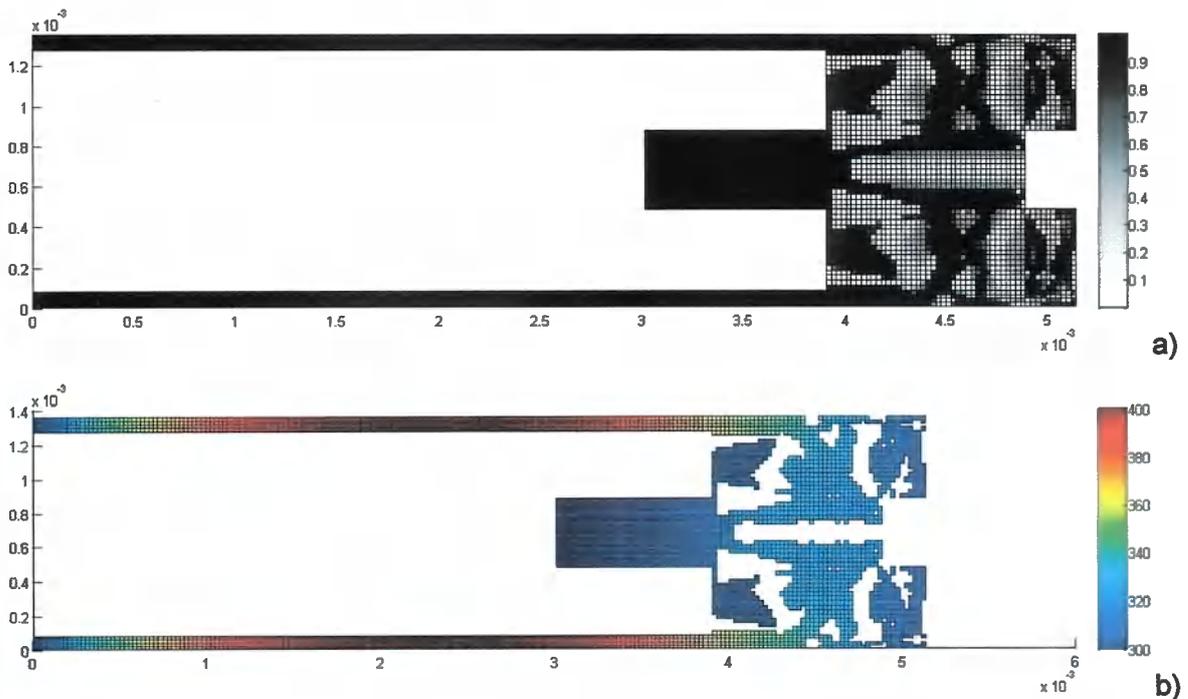


Figura 59 - a) Resultado da otimização minimizando-se as temperaturas. Mudança de parâmetros com relação ao resultado da Figura 58 foi realizada. b) Resultado após pós-processamento. A distribuição de temperaturas, obtida por elementos finitos, é mostrada..

5 SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS REFERENTES À META 1

Considera-se que houve significativo avanço no desenvolvimento de pessoas e processos ao longo da atividade de projeto e fabricação das micropiças. Estudos sobre a técnica de usinagem a laser foram realizados, previamente a utilização do equipamento disponível no laboratório. Desenvolveu-se técnica de fixação de materiais para usinagem, bem como uma biblioteca com os parâmetros de usinagem dos materiais utilizados no projeto, obtidos após extensivos testes. Os processos desenvolvidos de microusinagem a laser foram validados mediante a fabricação de protótipos funcionais de piças de aço, incluindo a usinagem de PCs personalizadas, com uma repetibilidade de desempenho aceitável. Uma metodologia para caracterização destas piças fabricadas foi também desenvolvida. Quanto à otimização, foram obtidos resultados promissores referentes à redução da temperatura nas extremidades das piças. O funcionamento das micropiças fabricadas foi demonstrado através da manipulação de esferas rígidas de diâmetro igual a 150 μm , assim como de um fio de cabelo. Adicionalmente, foi fabricada piça com abertura de 167 μm e fechamento total, o que permite a manipulação de objeto com diâmetros inferiores aos testados até o momento. Para a manipulação de objetos deformáveis nas próximas fases do projeto, serão necessárias micropiças com medida e controle de força, as quais serão adquiridas comercialmente.

Destaca-se aqui a contribuição dos alunos da FATEC (Faculdade de Tecnologia de São Paulo), Marcel Castilho Batista de Carvalho e José Roberto Candido da Silva, bolsistas neste projeto pela Fundação do IPT (FIPT). O primeiro apresentou seu trabalho no 16º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica da Fatec, sob o título “Micropiças eletrotermomecânicas criadas por corte a laser para micromanipulação”, o qual recebeu menção honrosa. Esta atividade de divulgação tem relação com o quinto objetivo específico deste projeto, listado na seção 1.1.2, e com a Meta 5 (conforme Tabela 3).

6 SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E MANIPULAÇÃO DE PARTÍCULAS (META 2)

O conteúdo apresentado neste item refere-se às atividades propostas nas Etapas 2.1 e 2.2 da Meta 2, conforme Tabela 2.

A manipulação de micro e nanopartículas é uma tarefa difícil e minuciosa que depende de equipamentos de grande precisão para que não ocorram danos às amostras trabalhadas. Atualmente, grande parte dessa manipulação, ocorre de maneira manual e por esta razão, sistemas automatizados de identificação e manipulação trazem considerável aumento de desempenho a esse processo.

A configuração do sistema de identificação e manipulação de partículas (leMP), inicialmente desenvolvido para este projeto pode ser observado na **Figura 60**. Este permite a manipulação de partículas na faixa de 10 μm a 100 μm . O conjunto consiste de micropinças com sensores integrados (microgrippers FT-G32 [30 μm] e FT-G102 [100 μm]) acopladas a um microposicionador (FT-MS) para medição precisa de força e posição, um microscópio óptico, um monitor e um computador.

A **Figura 61** ilustra a visão geral do sistema. A partir das informações de visão fornecidas pelo microscópio óptico e os valores de posição e força apontados pelos sensores do microgripper e micromanipulador, o sistema é capaz de gerar comandos para executar de forma automatizada, e sem danificar o objeto manipulado, tarefas de manipulação, como o posicionamento de partículas, conforme as instruções dadas ao software pelo usuário.

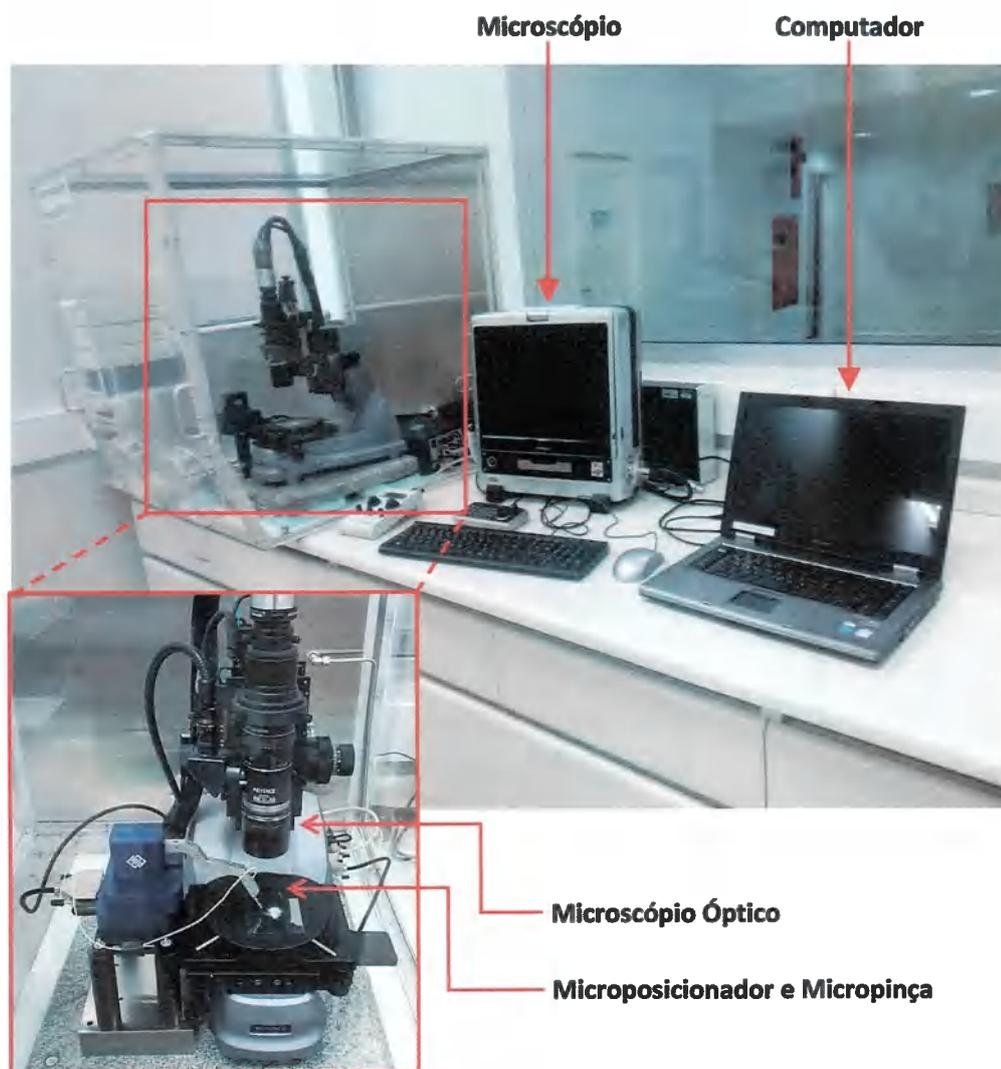


Figura 60 - Sistema de identificação e manipulação de partículas (leMP).

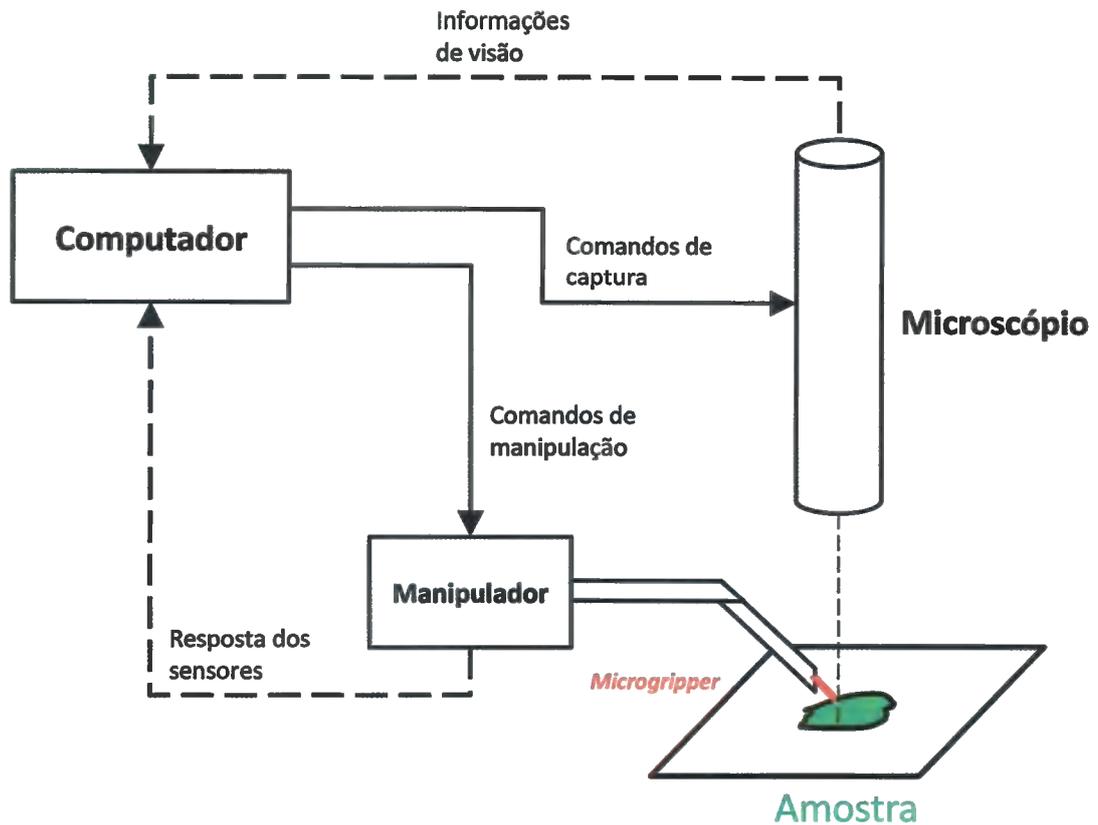


Figura 61 - Diagrama de blocos do sistema leMP.

Mantendo o sistema leMP diagramado na **Figura 61**, melhorou-se o conjunto de manipulação e aquisição de dados no projeto por meio da obtenção de novos equipamentos: (i) probe station que permite a utilização de manipuladores e agulhas para caracterização de materiais, (ii) sistema de iluminação ajustável, (iii) conjunto de lentes com maior campo de visão e (iv) câmera para microscópio de alta resolução. Esta última possui capacidade de conexão direta com um computador, para visualização e captura de imagens, favorecendo também o processamento das mesmas. A nova configuração pode ser observada na **Figura 62**.

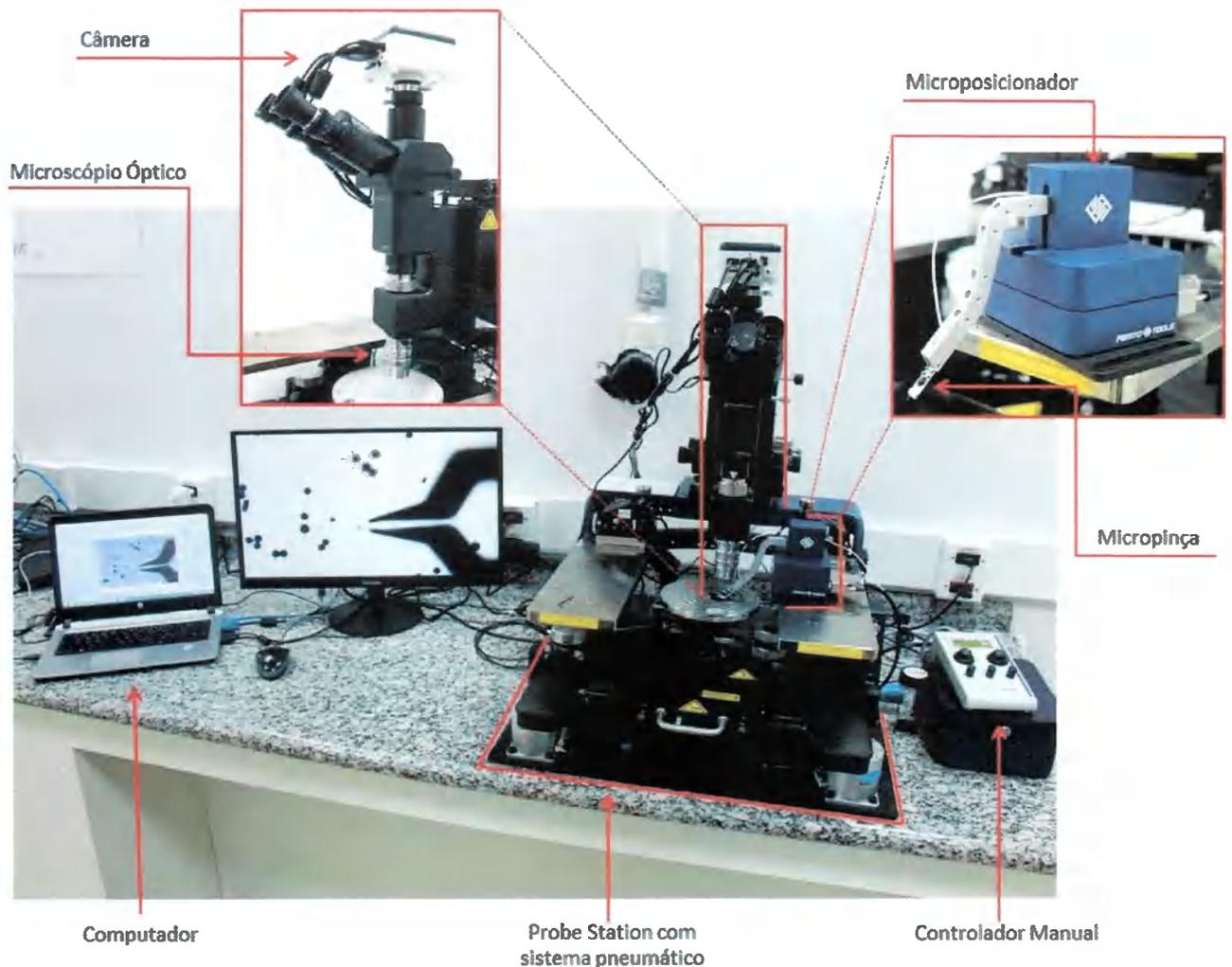


Figura 62 - Nova configuração do sistema de identificação e manipulação de partículas (leMP).

6.1 Análise dos microelementos e adequação do ambiente para manipulação

Os estudos dos microelementos e seu ambiente foram iniciados com a investigação de materiais que permitam a realização das funções de manipulação desejadas. Foram analisados materiais rígidos e deformáveis, como os apresentados a seguir.

6.1.1 Esferas de Estanho-prata

Partículas rígidas de SnAg3.5, com diâmetros entre 40 µm e 50 µm, como indicado na **Figura 63**, foram empregadas na validação do sistema de micromanipulação (Meta 3, conforme Tabela 3).

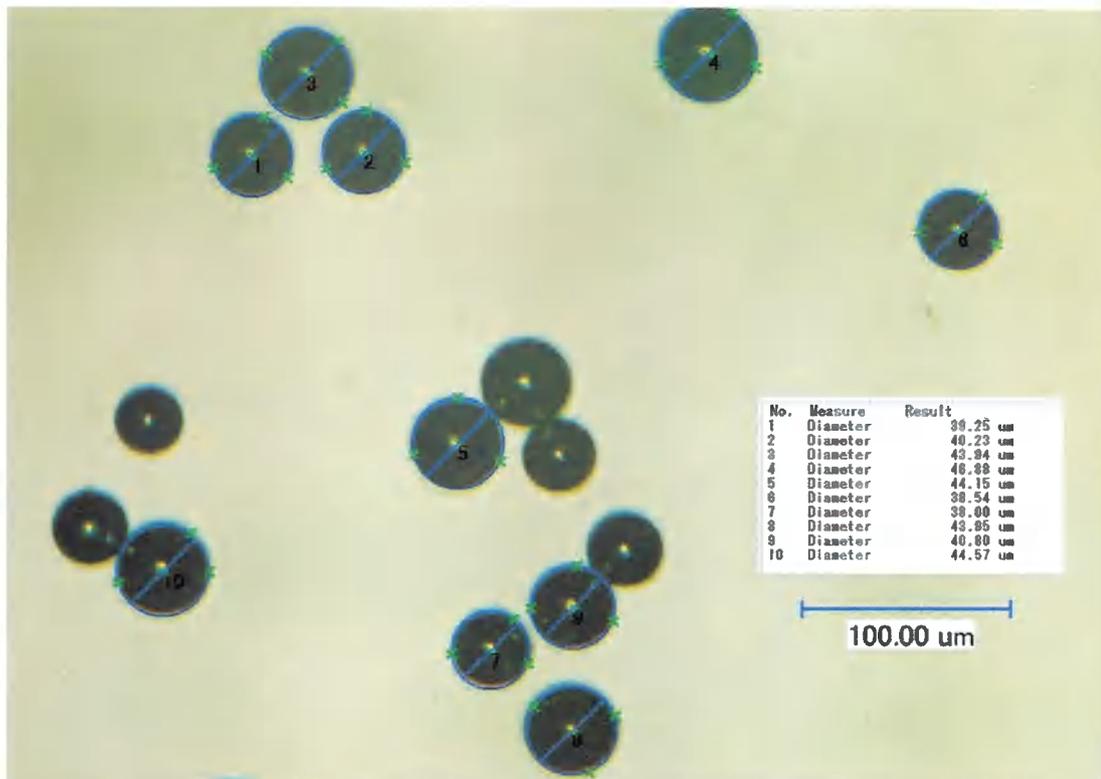


Figura 63 - Esferas rígidas de liga SnAg3.5.

6.1.2 Estruturas deformáveis em PDMS (Polidimetilsiloxano)

Foram desenvolvidas estruturas compostas de material deformável (com propriedades conhecidas) para serem também empregadas na fase de validação do sistema de micromanipulação (Meta 3, conforme Tabela 3). Para a obtenção destas estruturas foram fabricados e testados moldes em FR4 (laminado de circuito impresso) utilizando-se processo a laser, e moldes em cerâmica utilizando-se processo LTCC (cerâmica multicamada de sinterização em baixa temperatura), como mostrado na **Figura 64** e na **Figura 65**. A **Figura 66** apresenta com maior detalhe os canais do molde em LTCC e as estruturas moldadas em PDMS, onde se verifica uma redução nas dimensões da

peça moldada quando comparada a geometria do molde. Foram testadas diferentes composições de PDMS, com o objetivo de obter-se materiais com distintos módulos de elasticidade. No entanto, não foi possível a fabricação de perfil em PDMS nas dimensões desejadas e com características deformáveis para os testes.



Figura 64 – Molde em FR4 fabricado a laser, com largura aproximada dos canais de 70 micrometros.



Figura 65 – Molde em LTCC (superior) e estrutura de canais moldada em PDMS (inferior). Largura do canal e distância entre canais são apresentadas na **Figura 66**.

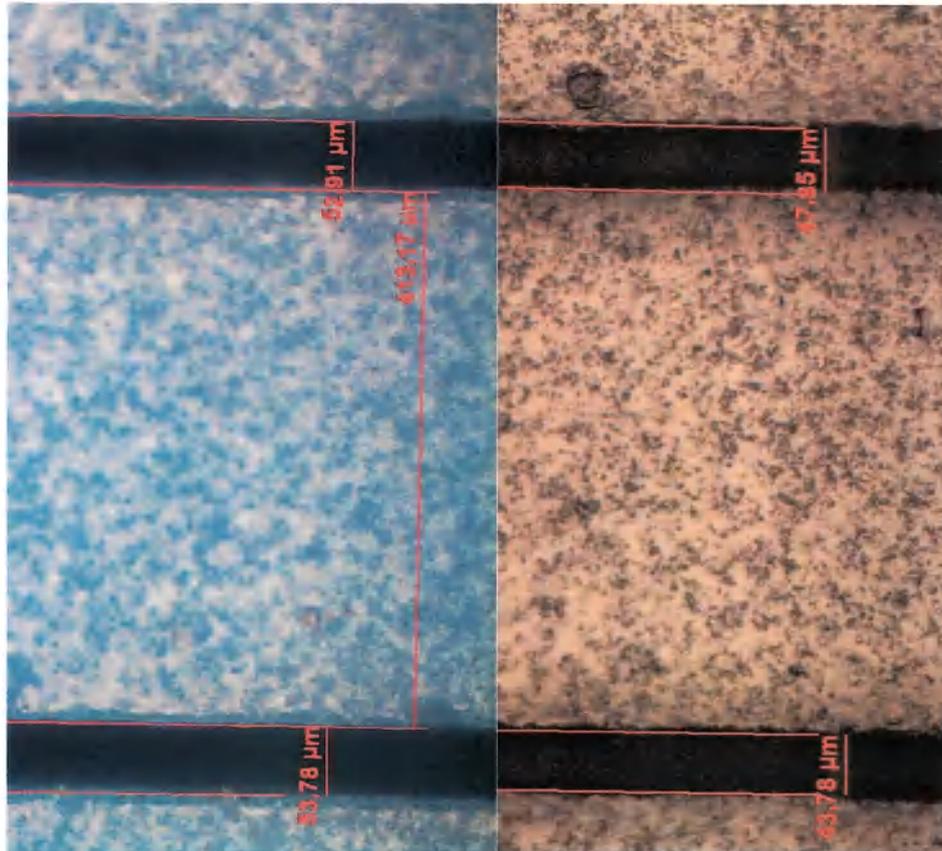


Figura 66 – Canais do molde em LTCC (esquerda) e estruturas moldadas em PDMS (direita).

6.1.3 Estruturas deformáveis produzidas com impressora 3D:

Com o objetivo de construção de estruturas/materiais de referência (com propriedades mecânicas conhecidas) para desenvolvimento de procedimentos de validação e caracterização, adquiriu-se com recursos do projeto um equipamento de manufatura aditiva (impressora FormLabs 2), apresentado na Figura 67. o qual utiliza a tecnologia de estereolitografia para produzir peças de alta precisão e acurácia, com dimensões máximas de dezenas de micrometros. De acordo com as especificações do equipamento, a espessura de camada das peças podem ser de 25 µm, 50 µm e 100 µm, dependendo da resina utilizada, sendo o raio de abertura do feixe de luz do laser de 140 µm.

No processo de estereolitografia o produto final é formado camada por camada utilizando-se uma resina líquida fotopolimerizável. Quando esta é exposta a raios laser ultravioleta, a mesma se solidifica, dando forma às peças requeridas. Subsequentemente

ocorre o processo de lavagem em banho químico do material sobressalente do componente, seguido de um processo de cura para que as especificações mecânicas da resina sejam alcançadas. Um cuidado a ser tomado é que, para determinadas geometrias, suporte auxiliares são necessários para que a prototipagem possa ser concluída de maneira bem-sucedida. Adicionalmente, dependendo da dimensão e aplicação do produto, ajustes precisam ser realizados no projeto da geometria levando em conta características do processo para que o mesmo não prejudique o resultado final.

O equipamento adquirido permite a utilização de diversas resinas polimerizáveis. Para as necessidades desse projeto, a resina tipo flexível foi a empregada. A partir das informações de especificação de equipamento, da estrutura e do substrato utilizado, peças teste, como ilustrado na **Figura 68**, foram projetadas e fabricadas. No entanto, os resultados ficaram abaixo das expectativas, como pode ser observado comparando-se as **Figuras 68(a) e 68(c)**. Não foi possível a obtenção de perfis com dimensões inferiores ao limite de abertura da micropinça ($100\ \mu\text{m}$).

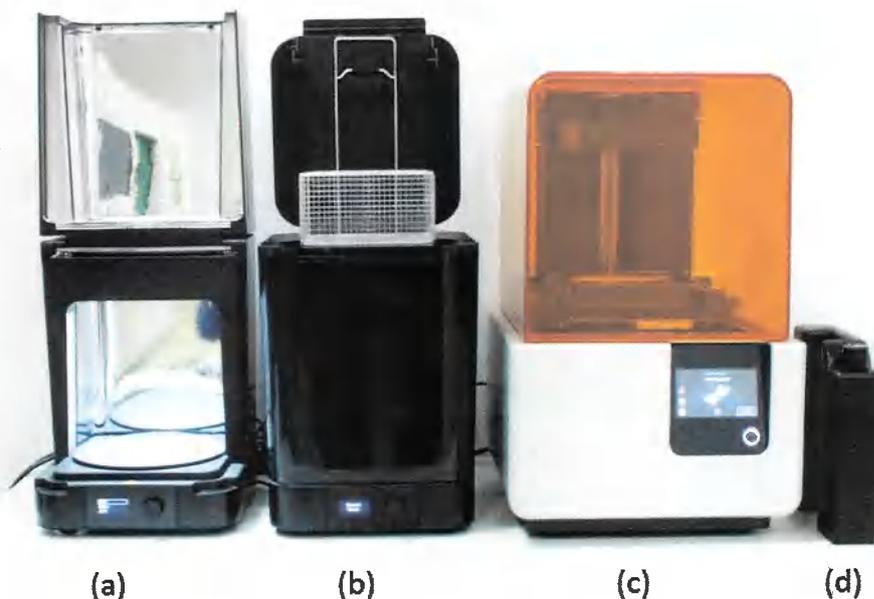


Figura 67 – Conjunto de equipamentos para impressão 3D (FormLabs 2): (a) Cura; (b) Limpeza; (c) Impressão; (d) Cartucho com material polimérico flexível.

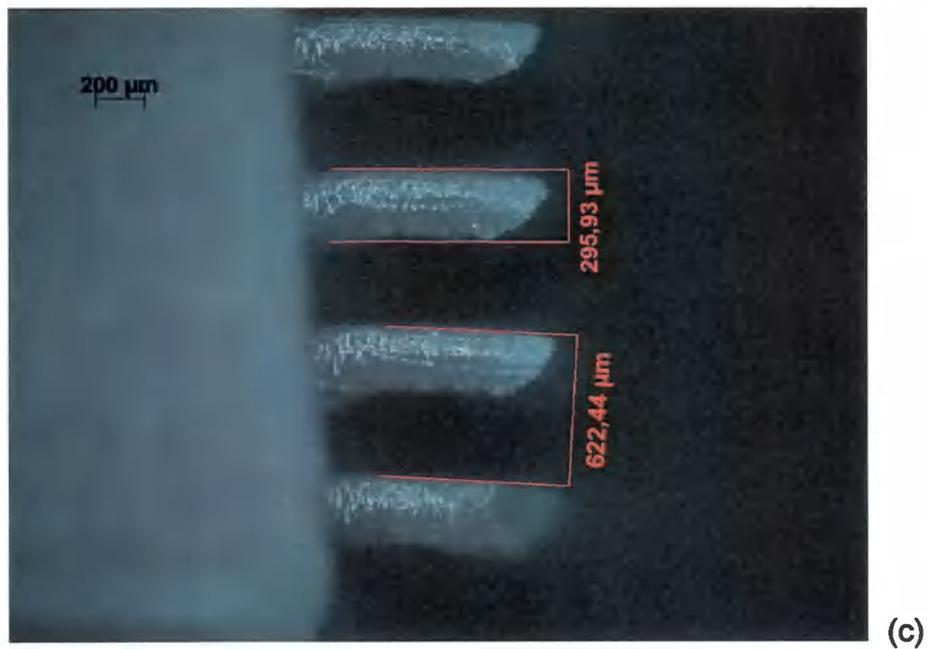
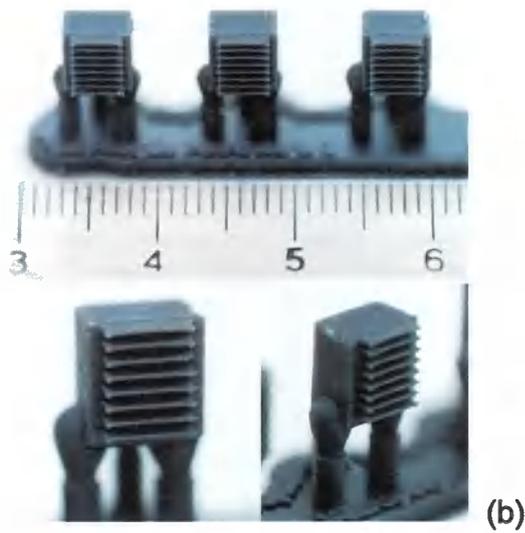
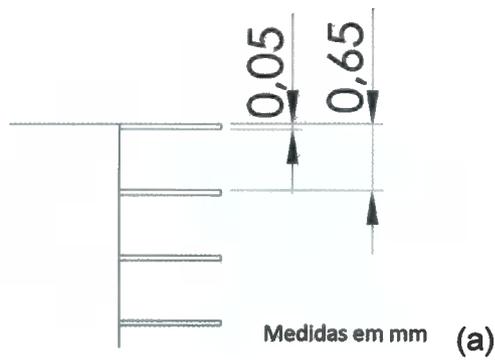


Figura 68 – (a) Projetos das estruturas para impressão 3D; (b) Estruturas fabricadas na impressora FormLabs 2; (c) Perfil das estruturas impressas na FormLabs 2.

6.1.4 Micropartículas deformáveis de Alginato de Cálcio

Micropartículas de alginato de cálcio foram produzidas por OLIVEIRA et al. (2019), como ilustrado na **Figura 69**, para imobilização de *Bacillus subtilis* visando à produção de lipase extracelular, uma enzima de interesse industrial. Para tal, foi empregada a tecnologia de microfluídica de gotas, sendo obtidas micropartículas de alginato com tamanhos de $63,53 \pm 1,77 \mu\text{m}$ com baixa polidispersidade. O tamanho das micropartículas favoreceu o processo de transporte de nutrientes para o interior das micropartículas, permitindo o crescimento celular e produção enzimática. No entanto, observou-se a ruptura das micropartículas de alginato com o crescimento excessivo de células, que pode ter sido causado pela baixa resistência mecânica das micropartículas de alginato. Assim, a aplicação de uma tecnologia que seja capaz de medir tal resistência pode contribuir para a otimização destas micropartículas de alginato, as quais possuem potencial aplicação em processos biotecnológicos. Embora a resistência mecânica do encapsulamento seja um parâmetro importante para conferir a proteção física desejada para o material biológico, os métodos convencionais para medir a força máxima de ruptura destas estruturas, como compressão uniaxial, não possui resolução para partículas micrométricas.

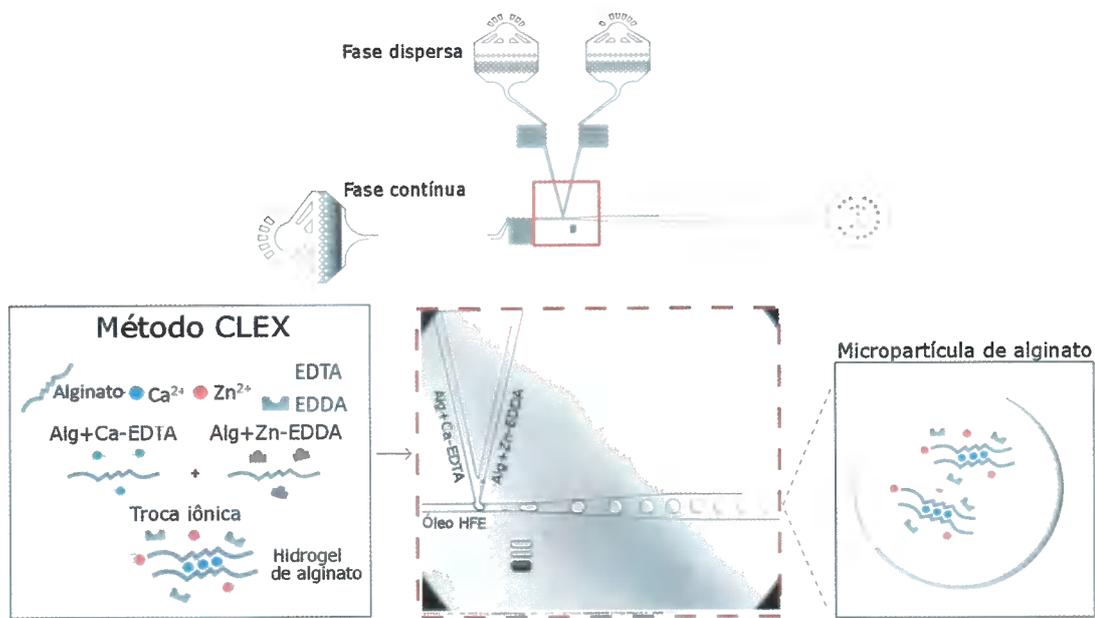


Figura 69 – Método de produção de micropartículas de alginato por microfluídica de gotas usando gelificação pelo método CLEX.

6.1.5 Células

Para testes do sistema de micromanipulação (Meta 3) foram avaliadas células de camundongo tipo nctc-929, as quais são usadas como células de controle em testes biológicos de citotoxicidade. Estas células apresentam diâmetros entre 15 μm e 25 μm como mostrado na **Figura 70**. Na micromanipulação de material biológico, geralmente frágil, o simples controle de posição não é adequado para garantir uma operação bem sucedida e evitar danos ao objeto. Faz-se necessário o controle de força de aperto da partícula. Para tal, duas questões principais precisam ser resolvidas: (i) a interação entre o manipulador e seu ambiente através de forças de adesão, e (ii) a medição e controle de forças de magnitudes extremamente baixas. No caso (i), como as magnitudes das forças de adesão são proporcionais ao tamanho da superfície do objeto, quando o tamanho de um objeto é menor que certo limite, as forças de aderência tornam-se maiores que a força gravitacional que atua no objeto. Tal relação é apresentada na **Figura 71**. No caso (ii), se faz necessário a utilização de micropinças que incorporem além da atuação, um sensor de força, com sensibilidade adequada à aplicação requerida.

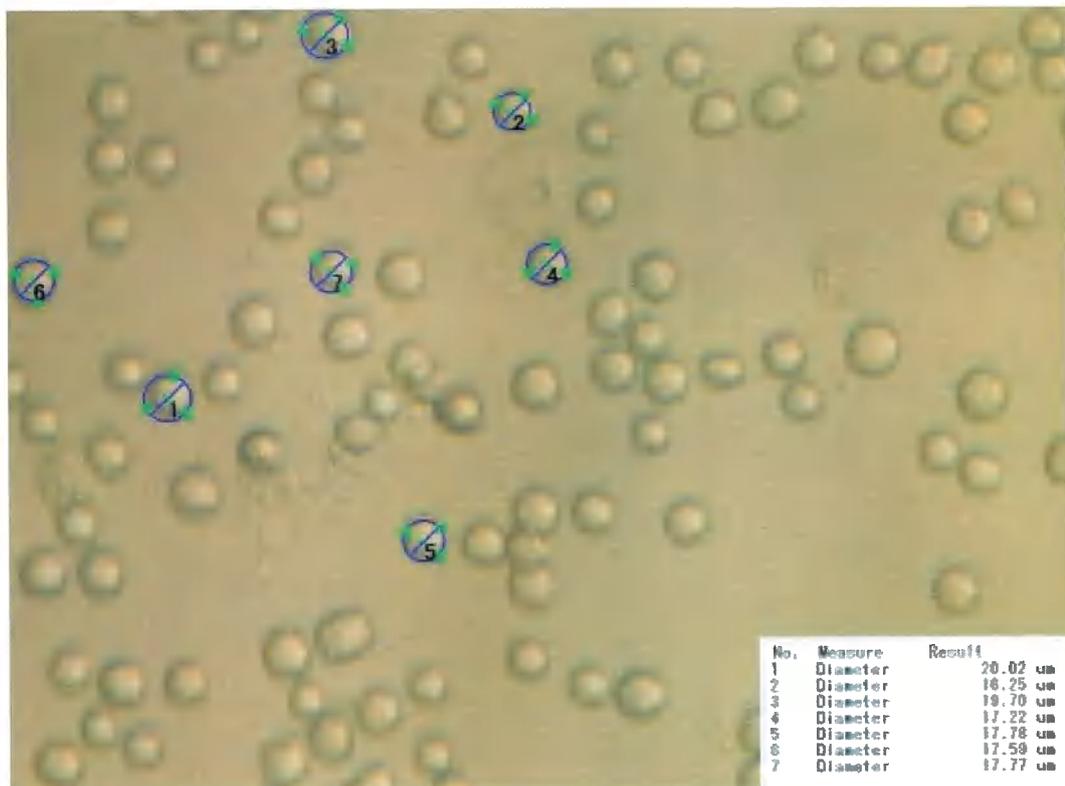


Figura 70 - Células de camundongo tipo nctc-929.

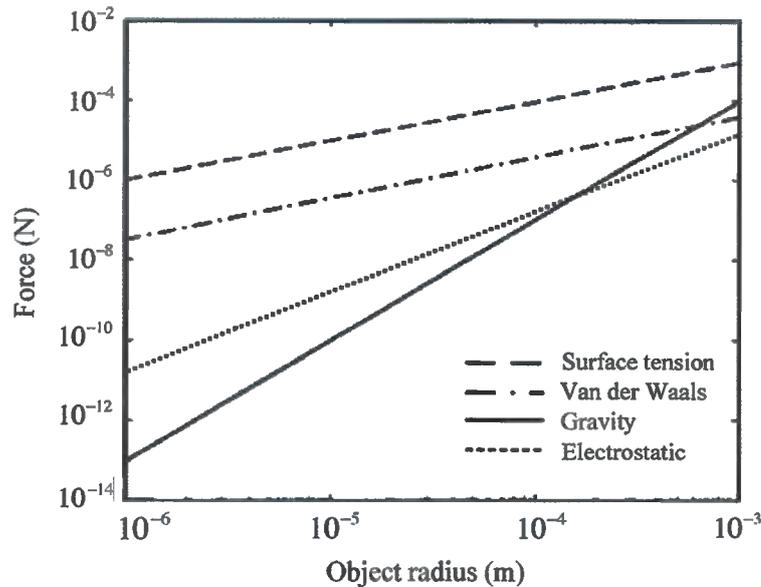


Figura 71 - Comparação da força Gravitacional com as diversas forças de adesão em função do raio do objeto (LU et al., 2006).

6.2 Estratégias de atuação e sensoriamento

O sistema leMP utiliza micropiças para a manipulação de partículas, juntamente com uma série de sensores para levantar informações de interesse sobre a amostra, que dão suporte às tarefas de automação e realimentam a malha de controle. Neste caso, para a medida da força imposta ao objeto manipulado, utiliza-se micropiça com sensor eletrostático acoplado, a qual fornece em tempo real medidas que alimentam o sistema de controle.

A seguir serão descritos especificamente os sistemas de medição e de visão dos microelementos.

6.2.1 Micropiças e sensoriamento de força

Um dos desafios da manipulação de microelementos é o controle das forças e deslocamentos que os atuadores aplicam sobre as partículas. Para aplicações com elementos deformáveis, em especial biológicas e biomédicas, os requisitos de precisão e sensibilidade são ainda mais rigorosos.

Considerando a pretensão de manipular microelementos como células e outros organismos vivos, utilizou-se o *microgripper* comercial FT-G102 da FemtoTools, cuja foto e desenho esquemático são mostrados na **Figura 72**.

O FT-G102 consiste de uma micropinça com atuador eletrostático e sensor de força capacitivo. A aplicação de uma tensão no *comb drive* lateral faz com que o braço atuador se mova, fechando a pinça. Ao segurar uma partícula, a deflexão do braço sensor provoca um movimento da viga suspensa no *comb drive* transversal, alterando a capacitância do interdigitado. Essa variação é usada como transdução de força, permitindo medidas com resolução da faixa de dezenas de nanonewtons.

Além disso, os *microgrippers* eletrostáticos também mostraram outras vantagens para as aplicações de interesse do projeto, como a capacidade de trabalhar em meios líquidos, o isolamento elétrico e a possibilidade de atuação sem aquecimento dos braços, justificando o seu uso para a automação das tarefas de manipulação e desenvolvimento dos algoritmos de controle de força e posição.

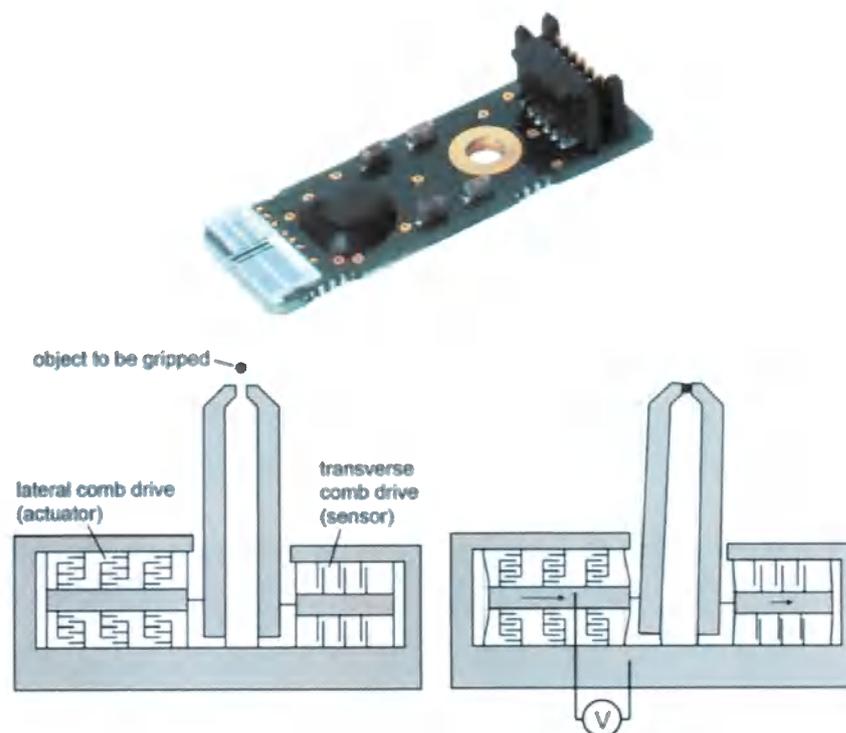


Figura 72 - Micropinça utilizada (superior) e princípio de atuação e sensoriamento de força (inferior), (BEYELER, 2007).

6.2.2 Sistema de visão

Além da medida de força fornecida pelo sensor integrado ao *microgripper*, o sistema de visão, constituído pelo microscópio óptico e os algoritmos de processamento de imagens no computador, fornece uma série de informações importantes para a automação e controle da micromanipulação.

As tarefas de manipulação envolvem etapas de localização e posicionamento das partículas, que tradicionalmente são feitas de forma manual pelo operador. No entanto, o algoritmo de processamento de imagens pode rapidamente identificar as partículas presentes no campo de visão (FOV, Field of View), incluindo informações de posição, tamanho e morfologia. Esses dados são exibidos ao usuário e usados pelo software para gerar os comandos de automação.

A **Figura 73** mostra um exemplo de saída do algoritmo implementado usando os recursos do software NI Vision. Dada a imagem capturada do microscópio, o programa identifica as partículas presentes no FOV, retornando uma tabela que lista a posição relativa ao *microgripper* e o respectivo tamanho de cada partícula. O software também cria anotações na imagem para mostrar e indexar os objetos encontrados. Com isso, o usuário pode rapidamente visualizar as partículas detectadas e informar ao software qual partícula deseja manipular. Essas informações também são passadas para os blocos de automação e controle, que as utilizam para referenciar e guiar os seus algoritmos.

Além da questão de posicionamento, o sistema de visão é uma poderosa ferramenta de caracterização de partículas deformáveis. A curva de contorno da partícula deformada devido à aplicação de uma determinada força, como exemplificado na **Figura 74**, pode ser usada para extrair importantes propriedades mecânicas do material.

O sistema de visão foi desenvolvido para poder, em conjunto com o sensor de força, extrair essas informações automaticamente e em tempo real, de forma a permitir que a partícula seja caracterizada durante os ensaios de manipulação.



Saída do algoritmo
de detecção



idx	Diâmetro	Posição
1	36,4	(906, 2114)
2	42,7	(1202, 1982)
3	37,2	(1046, 1941)
4	35,4	(636, 1807)
5	40,7	(773, 1662)
6	43,0	(556, 1657)
7	40,0	(880, 1483)
8	41,2	(650, 1385)

Figura 73 - Algoritmo de processamento de imagens: detecção de partículas (dimensões em μm)

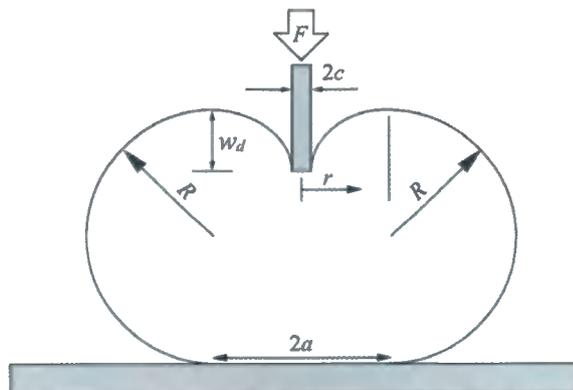


Figura 74 - Modelagem mecânica de partículas através das características do contorno deformado (NELSON, et al., 2005).

6.2.3 Integração do sistema de visão e de manipulação de micropartículas

O software para visualização, reconhecimento e manipulação de partículas está dividido em duas seções, como apresentado na **Figura 75**. A primeira seção é a de visualização e apresentação dos resultados do processamento da imagem captada pelo sistema de visão. A segunda seção corresponde à área do software dedicada à manipulação das partículas com a micropinça.

A câmera do sistema de visão do microscópio é utilizada como fonte de entrada para a captação das imagens que mais tarde serão processadas. O tratamento das imagens captadas é realizado através da utilização de módulos de Labview especializados em processamento de imagem.

Ao inicializar o software, a opção de magnificação do sistema de visão deve ser selecionada. Em função da magnificação escolhida, haverá um fator de calibração que será aplicado na imagem, para a conversão de pixels em micrometros. Ao analisar as imagens adquiridas, as partículas esféricas são identificadas e o sistema desenha um quadrado ao redor de cada uma delas para fácil conferência por parte do usuário.

A quantidade de partículas identificadas é mostrada no campo “No. de Partículas”. Os campos “Eixos X e Y da Partícula” e “Posição da Pinça” são utilizados para registrar a posição inicial da partícula selecionada para manipulação e a posição da pinça em cada momento do teste. Estes valores são obtidos automaticamente pelo sistema através da análise das imagens captadas.

O sistema indica o diâmetro da partícula selecionada para manipulação no campo “Diâmetro da Partícula (μm)”. Os diâmetros das partículas restantes identificadas podem ser conferidos ao passar o cursor sobre as mesmas. Neste caso, o diâmetro, em μm , será indicado em cor vermelha ao lado da partícula, por um período de tempo.

Para selecionar a partícula de interesse o usuário deve clicar encima da mesma, Abre-se então um menu com diferentes opções, segundo apresentado na **Figura 76**:

- “Selecionar Partículas”: Indica ao sistema que a partícula clicada é a selecionada pelo usuário. Ao fazer esta opção, os campos “Eixos X e Y da Partícula” e “Diâmetro da Partícula (μm)” são atualizados.
- “Localizar Ponto de Liberação da Partículas”: Para especificar a posição de liberação da partícula o usuário deve clicar na posição desejada e depois clicar neste submenu. Desta forma é atualizado o campo “Eixo X e Y da Liberação”.
- “Traçar Trajetória”: Esta opção possibilita ao usuário traçar uma trajetória para ser realizada pela pinça antes da liberação da partícula.
- “Pinça”: Opção utilizada para especificar a posição da pinça caso seja desejado.

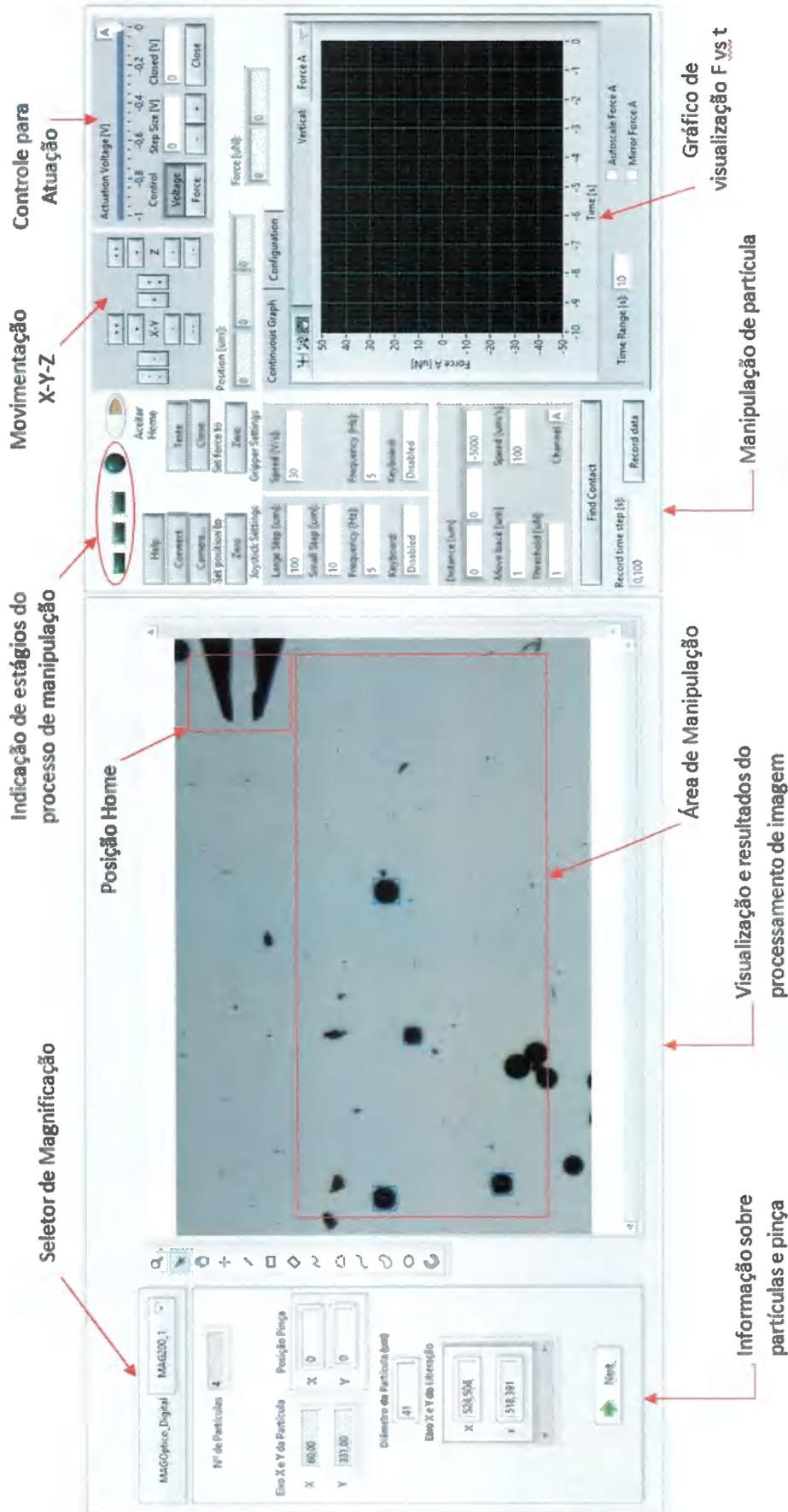


Figura 75 - Painel frontal do sistema de imagem e manipulação de partículas.

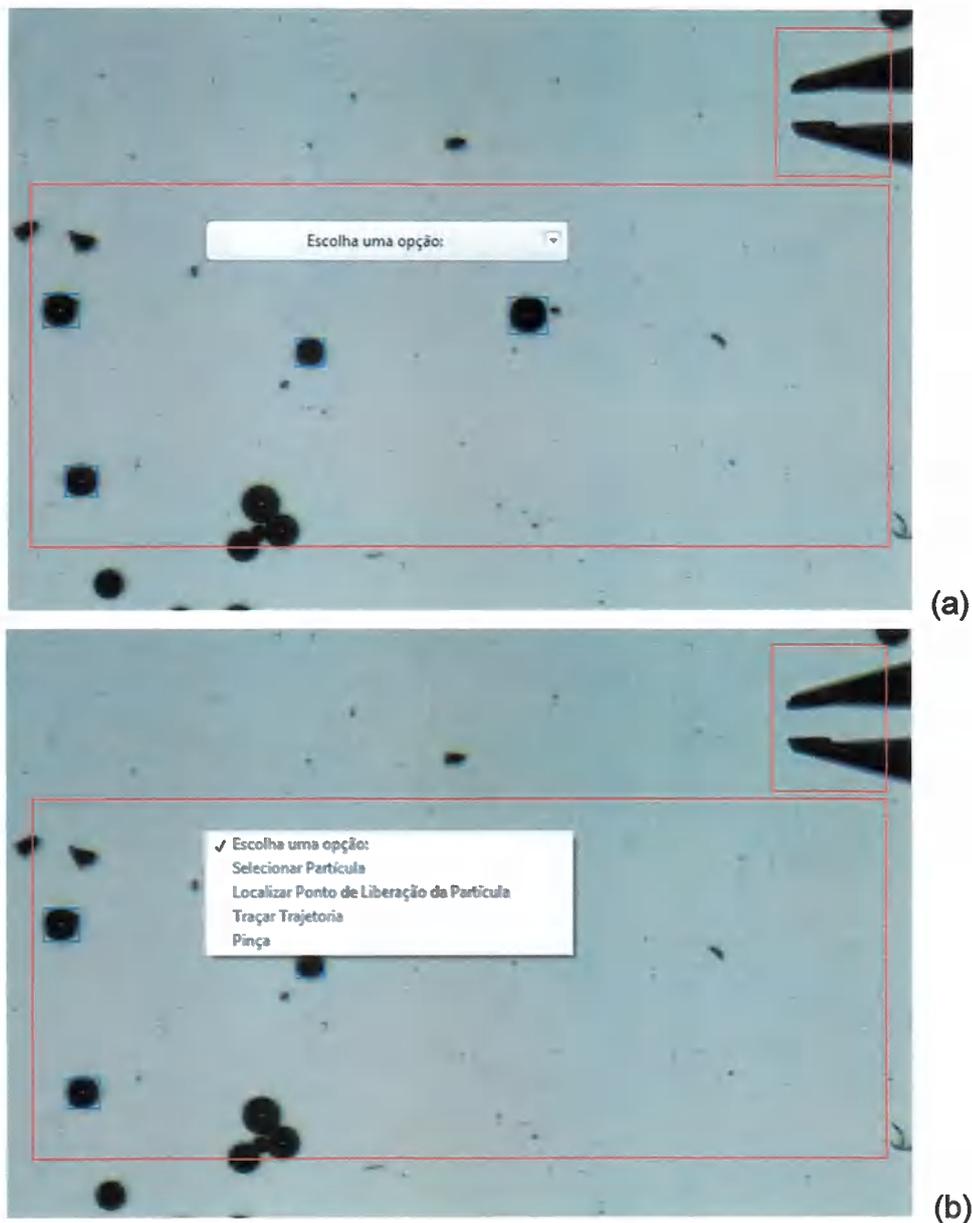


Figura 76 - Seleção de partículas. a) Menu ao clicar sobre da partícula; b) Opções do menu.

O campo “Eixo X e Y da Liberação” é utilizado para registrar as coordenadas do ponto de liberação escolhido pelo usuário. Este campo é um arranjo de uma dimensão. Se o usuário selecionar só o ponto de liberação, então o tamanho do arranjo será 1. Caso o usuário escolha uma trajetória de liberação, o tamanho deste arranjo variará conforme a longitude da trajetória traçada.

Uma vez finalizada a seleção da partícula e escolhido o ponto de liberação, o usuário deve clicar no botão “Next” para proceder à segunda etapa do processo que é a movimentação automatizada da pinça desde a posição “Home” até a posição da partícula, para então executar sua manipulação.

A seção de “Manipulação de Partícula” foi projetada a partir da integração dos módulos disponibilizados pela FemtoTools no painel frontal do software. O usuário não precisa realizar nenhuma ação na maioria dos campos desta seção, uma vez que estes são modificados automaticamente pelo software durante sua operação.

Na aba “Configuração”, da subseção referente ao gráfico F vs t, o usuário deve especificar os dados da micropinça que está utilizando (ganho e máxima tensão de operação). Ao iniciar o software, este automaticamente aplica um valor “True” ao botão “Connect” começando assim a conexão com o sistema da FemtoTools.

No caso de desejar-se a movimentação manual da pinça, os parâmetros dos campos “Joystick Settings” e “Gripper Settings” devem ser modificados. A pinça poderá ser movimentada através da utilização dos controles do campo “Movimentação X-Y-Z”, indicado na **Figura 75**.

Nos campos “Position (μm)” e “Force (μN)” são apresentados ao usuário os valores atuais da posição da pinça nas direções X, Y e Z, assim como da força medida.

6.2.4 Aquisição e processamento de imagem

Para a aquisição e processamento da imagem é utilizado o toolkit Vision Assistant do LabView. Foram desenvolvidos subVIs (subprogramas do LabView) com o objetivo de realizar o processamento por etapas. Inicialmente, as imagens são adquiridas e processadas. Na sequência, os valores obtidos do processamento são filtrados. Finalmente, as partículas identificadas são categorizadas segundo seu tamanho e indicadas na imagem apresentada ao usuário com um quadrado ao seu redor.

Na **Figura 77** apresenta-se o diagrama em blocos do subVI de “Aquisição e Processamento de Imagem”. Inicialmente a imagem é adquirida através da câmera instalada no sistema de visão do microscópio. Na sequência a imagem é duplicada para o

processamento (Imagem original) e apresentação ao usuário (Imagem duplicada). A duplicação é necessária uma vez que o processamento implica na realização de diferentes ações sobre a imagem que a fazem ilegível para o usuário. Desta forma, o usuário realiza ações sobre a imagem duplicada enquanto essas ações são referidas posteriormente à imagem original processada.

Foi utilizado um “Case Structure” para atender as diferentes magnificações que podem ser utilizadas pelo sistema. Como mencionado anteriormente, cada magnificação está associada a um fator de calibração diferente no sistema para a conversão de pixels para μm .

Na **Figura 78** são apresentadas as etapas de processamento envolvidas no tratamento da imagem:

- “Calibração de Imagem”: A imagem original é submetida a um processo de calibração. Um padrão de calibração é utilizado para cada magnificação do sistema. Como resultado, medições podem ser realizadas sobre a imagem obtendo-se resultados em unidades de engenharia (μm). Desta forma, mede-se os diâmetros das partículas, assim como as posições das partículas e pinça, relativas à origem do sistema de coordenadas da imagem.
- “RGB para Escala de Cinza”: O processamento de imagem é realizado geralmente sobre imagens em formato de escala de cinzas e/ou imagens booleanas. Nesta etapa o plano verde do RGB é retirado, fazendo assim a conversão de RGB para escala de cinza. Esta estratégia foi a que apresentou menor impacto no tempo de conversão.
- “Gripper Recognition 1 e 2”: Nestas etapas é realizado o reconhecimento da pinça na imagem adquirida. Como estratégia de reconhecimento foi realizado um mascaramento, como mostrado na **Figura 79**, o qual possibilita o reconhecimento da pinça em situações onde ela pode estar com alguma partícula entre os braços ou em contato. Na sequência são reconhecidas a parte superior da pinça e a parte inferior. Desta forma, fica assegurado que o sistema reconhecerá a pinça em qualquer condição.

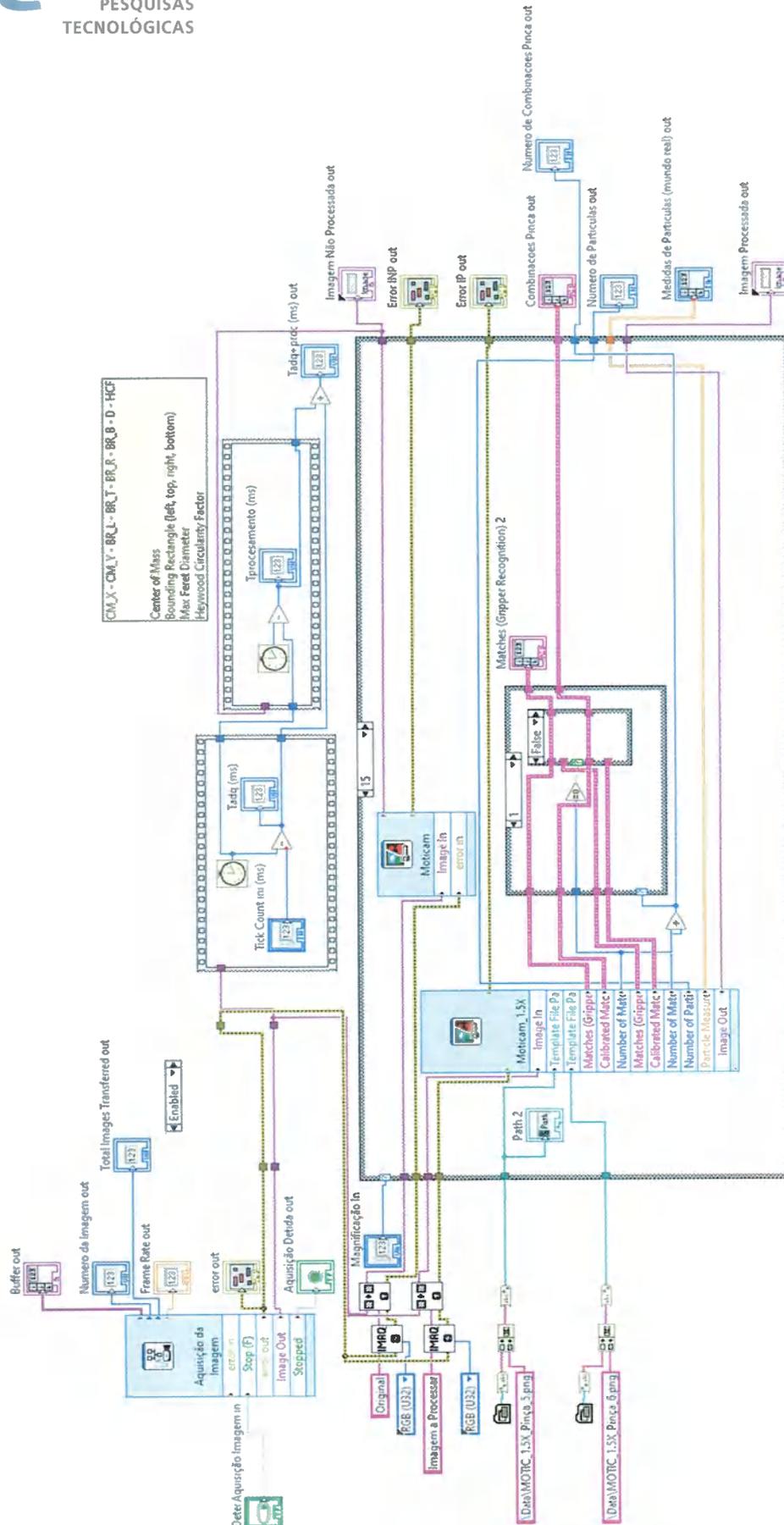
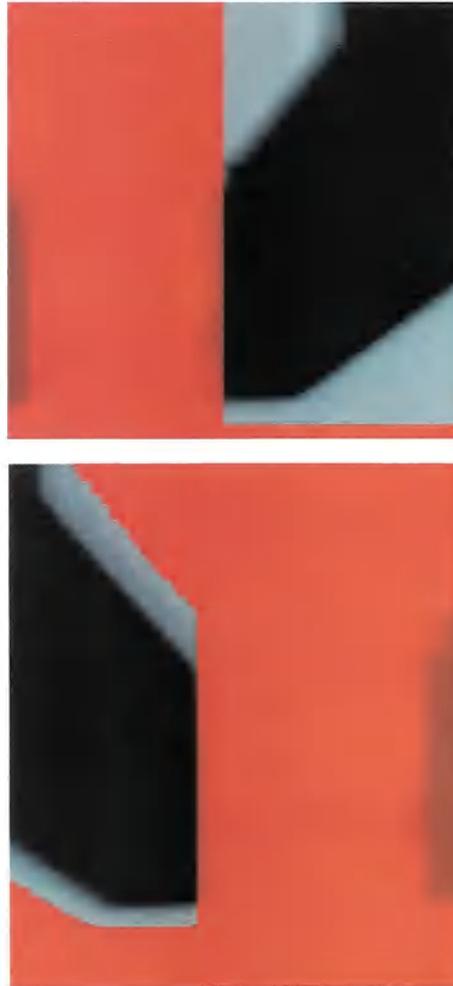


Figura 77 - Diagrama em bloco do subVI de Aquisição e Processamento de Imagem.



Figura 78 - Etapas de Processamento de Imagem.



(a)

(b)

Figura 79 - Mascaramento utilizado para o reconhecimento da pinça: a) Parte superior; b) Parte inferior.

- “Escala de Cinza para Booleano”: Nesta etapa a imagem é convertida de escala de cinza para booleana visando a identificação das partículas presentes. Para tal, o *threshold* da imagem foi fixado entre 0 e 52. Valores de intensidade de pixel dentro deste intervalo são considerados como 0. Valores fora do intervalo são considerados como 1.
- “Filtragem Partículas 1”: Para identificar as partículas é realizada uma primeira etapa de filtragem da imagem processada. Nesta etapa são retiradas da imagem todos aqueles objetos que não tenham um fator de circularidade de Heywood no intervalo entre 0.94 e 1.06. Desta forma, o sistema filtra todas as partículas com perfil circular para seu posterior processamento.
- “Filtragem Partículas 2”: Na segunda etapa de filtragem o sistema filtra somente as partículas com formato circular que tenham diâmetro máximo de Feret com valor entre 11 μm e 95 μm . O limite superior de 95 μm deve-se à dimensão máxima de abertura da pinça (100 μm) . O limite inferior deve-se às limitações do sistema de visão. Desta forma, o sistema seleciona partículas com formato circular e com diâmetros entre 11 e 95 μm .
- “Análise de Partículas”: Neste bloco são obtidos os dados calibrados das partículas filtradas e disponibilizado como saída do subVI num formato de arranjo (tabela). Os dados obtidos são: Centro de massa da partícula (x,y); coordenadas do retângulo delimitador; diâmetro máximo de Feret; e Fator de circularidade de Heywood.

Como saída deste subVI estão o arranjo com os dados das partículas, a quantidade de partículas identificadas segundo os critérios de filtragem, o reconhecimento positivo ou negativo da pinça, e as coordenadas da pinça reconhecida.

Testes de desempenho realizados com este subVI mostraram que o processamento da imagem é realizado num tempo de aproximadamente 145 ms. O processamento é realizado imagem a imagem através da câmera do sistema. Uma vez que cada imagem é processada completamente, sua cópia é apresentada ao usuário. Devido ao tempo de processamento ser aproximadamente 145 ms, a percepção do usuário ao visualizar as imagens apresentadas é a de movimento contínuo.

A filtragem dos dados é realizada em novo subVI, através do cálculo da média dos valores obtidos para uma janela de 10 grupos de valores. As partículas identificadas são categorizadas e organizadas por tamanho em mais um subVI. Como resultado da categorização um quadrado é desenhado ao redor de cada uma das partículas identificadas e um número de identificação é destinado a cada uma delas.

6.2.5 Manipulação

Foram desenvolvidos subVIs também para as tarefas de manipulação, visando a automação do processo de manipulação do sistema da FemtoTools. Os subvi de manipulação nutrem-se dos dados de posição da partícula, diâmetro da partícula, assim como posição da pinça.

A manipulação é realizada por etapas. Inicialmente a pinça realiza a operação de “Find Contact” com o objetivo de ser focalizada pelo sistema de visão. Uma vez que detecta a superfície, a pinça sobe uma altura de aproximadamente 25 μm . Uma vez reconhecida a pinça, o sistema atualiza sua posição. Em conjunto com a posição da partícula, os subVIs de manipulação realizam a movimentação da pinça até que a mesma esteja posicionada encima da partícula. Para esta função, foi definida uma área no interior da pinça para identificar, com um valor de tolerância de 25 μm , quando a pinça está corretamente posicionada. Este é um processo iterativo. Em seguida, a pinça desce até uma altura de 3 μm em relação à superfície. Na sequência o sistema da FemtoTools é configurado para realizar uma ação de controle de força em malha fechada (força de referência de 30 μN), quando é enviado o comando de fechar a pinça para a captura da partícula. A pinça então sobe até uma altura de 50 μm em relação a superfície para se movimentar até a posição definida para a liberação da partícula. Posteriormente, a micropinça troca de modo de operação de malha fechada para malha aberta e desce até uma altura de 3 μm , realizando a operação de “find contact” para auxiliar na liberação. Para liberar a partícula a tensão de atuação da pinça é reduzida até 0 V e a pinça é movimentada tocando levemente a superfície. Uma vez liberada a partícula, a pinça sobe ate uma altura de 50 μm e retorna para a posição “Home”. Ao chegar nesta posição, a conexão do programa com o sistema da FemtoTools é finalizada.

7 MODELAGEM E CONTROLE DO SISTEMA DE MICROMANIPULAÇÃO DE MICROELEMENTOS (META 2)

O conteúdo apresentado a seguir refere-se às atividades propostas nas Etapas 2.3, e 2.4 da Meta 2, conforme Tabela 2. Nesta parte do projeto de pesquisa as atividades foram realizadas com foco nos seguintes objetivos específicos:

- (i) Obtenção de um modelo matemático do micro-manipulador, incluindo o braço atuador, o braço sensor, e o objeto a ser manipulado;
- (ii) Projeto de sistemas de controle de força aplicada no objeto manipulado, de modo a não danificar nem o micro-manipulador, nem o objeto manipulado (que poderia ser delicado, como, por exemplo, uma célula viva).

A microgarra eletrostática a ser controlada (usada como referência nesta etapa do projeto) é a FT-G32 da FemtoTools, a qual tem capacidade de manipular microobjetos de 1 a 30 μm , com limite máximo de força de 120 μN .

A seguir, faz-se uma descrição da metodologia de abordagem empregada para os objetivos (i) e (ii) especificados acima, como também apresenta-se um descritivo dos resultados. O trabalho completo da modelagem e do projeto do controlador está detalhado no anexo A.

7.1 Modelagem e identificação

Para projetar um controlador, é necessário um modelo matemático do sistema que será controlado. Há duas formas clássicas de se levantar modelos matemáticos: 1) método fenomenológico, que consiste em se escrever as equações diferenciais do sistema (através da aplicação das leis da física) e; 2) identificação de sistemas, que consiste em se assumir um tipo de modelo para o sistema (normalmente um sistema linear e invariante no tempo, juntamente com a sua ordem, ou seja, o número de pólos) e se encontrar os coeficientes do modelo de forma experimental, usando métodos de ajuste dos modelos aos dados coletados experimentalmente.

Um controlador de força em malha fechada que seja eficiente deve ser preciso, ou seja, ter erro estacionário pequeno ou nulo, de forma que a força aplicada ao se agarrar a

micropartícula seja exatamente a força desejada (força de referência). Para se projetar este controlador, é necessário analisar as propriedades físicas do sistema a fim de obter um modelo matemático que o represente. Este modelo deve relacionar a tensão aplicada na entrada da microgarra (pente de capacitores) com a força exercida pela microgarra na micropartícula.

Existem diversas bibliografias que descrevem as propriedades físicas da interação entre as hastes da microgarra com a micropartícula, bem como a interação entre as hastes e os pentes de capacitores (comb drives), que transformam a energia elétrica em uma força mecânica. Em BOUDAUD et al., 2013, as hastes da microgarra são modeladas como rígidas, com uma certa elasticidade e amortecimento (ou seja, são consideradas, cada uma, como um sistema massa-mola-amortecedor). A micropartícula é considerada como uma simples mola, conforme mostrado na **Figura 80**.

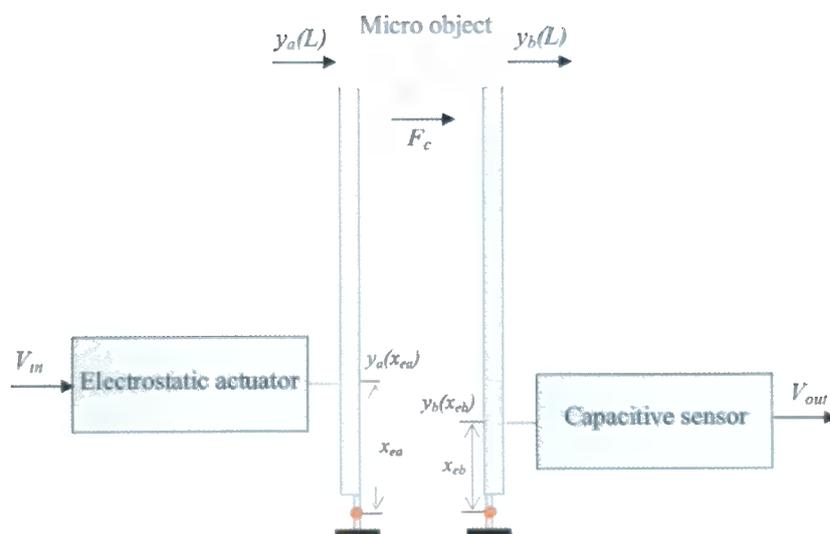


Figura 80 – Diagrama representando o sistema modelado.

Nesta figura, a haste da esquerda representa a haste atuadora, enquanto a haste da direita representa a haste sensora. O modelo apresentado em BOUDAUD et al., 2013, entretanto, não contém todos os parâmetros (os autores omitem alguns deles). Desta forma, não foi possível usá-lo como única referência, mas somente como um guia. Além

disso, no referido trabalho foram utilizados instrumentos sofisticados, tais como interferômetros (não disponíveis pelo IPT ou EPUSP).

Com base no método de identificação de sistemas (LJUNG, 2007) utilizado neste trabalho, foram aplicados sinais de entrada (no caso, tensões na microgarra) e coletou-se as correspondentes saídas ao longo do tempo (no caso, os sinais de força na micropartícula, medidos pela haste sensora). Utilizou-se então as técnicas de identificação de sistemas para ajustar modelos matemáticos aos dados de entrada e saída coletados (sinais de entrada PRBS e respectivas forças geradas), de modo que os coeficientes fossem obtidos sem se utilizar instrumentos sofisticados (de fato, só o aparato já existente para fazer o controle). Empregou-se funções do “System Identification Toolbox” do MATLAB, sendo o método de ajuste o de mínimos quadrados. Deste modo, foram dezesseis aplicações das funções da toolbox para cada tipo de modelo testado. Em cada uma, e para cada modelo, as funções forneceram um conjunto de coeficientes das funções de transferência ajustadas.

Os modelos testados, ARMAX, OE e BJ (Box-Jenkins), estão descritos em detalhes no anexo A. Para cada modelo, registrou-se um índice de ajuste (índice FIT) fornecido pelas funções do “System Identification Toolbox”, o qual indica a probabilidade dos coeficientes reais estarem dentro de suas faixas típicas correspondentes. Portanto, um índice próximo de 100%, associado a faixas de valores de parâmetros estreitas, indica alta confiabilidade de que o modelo ajustado seja bem representativo do sistema real.

O modelo ARMAX apresentou grande dispersão dos ganhos em baixas frequências, com pico de ressonância (característica dinâmica mais marcante do sistema microgarra + micro-elemento) em torno da frequência 10000 rad/s. O índice FIT para as dezesseis aplicações ficou acima de 90%.

Para o modelo OE também verificou-se uma grande dispersão nos ganhos para baixa frequência, e um pico de ressonância em torno da mesma frequência dos modelos ARMAX. Os índices FIT, entretanto, ficaram mais baixos que no caso do ARMAX, o que indica uma menor adequação deste tipo de modelo aos dados coletados.

Os dezesseis modelos BJ obtidos tiveram um ganho muito próximo em baixas frequências, bem como praticamente a mesma frequência e altura do pico de

ressonância. Observou-se uma dispersão em altas frequências, o que era esperado em todo modelo identificado. Além disso, os índices FIT ficaram todos acima de 94%, indicando que o modelo Box-Jenkins é o mais adequado para a aplicação em questão (manipulação de partículas rígidas).

Com o modelo matemático definido, foi possível a realização das simulações em malha aberta do sistema, empregando o software MATLAB.

Objetos com características mais complicadas (como células) devem ser modelados por molas não-lineares, levando em conta a interação do meio fluídico onde a célula está inserida. Devido à altíssima complexidade desta configuração, não foi possível a realização de sua modelagem matemática neste projeto.

7.2 Projeto de controladores

Nesta etapa do projeto foram desenvolvidos de controladores robustos para o controle de força da microgarra, todos em tempo discretos, já prontos para serem implementados em computador, com uma frequência de amostragem de 19 kHz (frequência utilizada na obtenção dos modelos por identificação de sistemas).

A **Figura 81** traz um diagrama esquemático do funcionamento do controlador. A variável a ser controlada, no caso, a força aplicada pela microgarra na micropartícula, é representada pela saída. Esta é medida pelo sensor de força (uma das hastes da microgarra), que adiciona ruído e erros (não intencionais) na medição. A força (saída) é um sinal gerado pela planta, que corresponde à microgarra com a micropartícula (família de modelos matemáticos). O sinal de controle aplicado à planta é a tensão aplicada na microgarra, a qual é gerada pelo controlador. Por fim, todos os efeitos ambientais, e que afetam o funcionamento da microgarra, são representados pelas perturbações. À princípio, as perturbações não são mensuráveis e nem controláveis. Um controlador robusto deve, entretanto, atenuar seus efeitos.

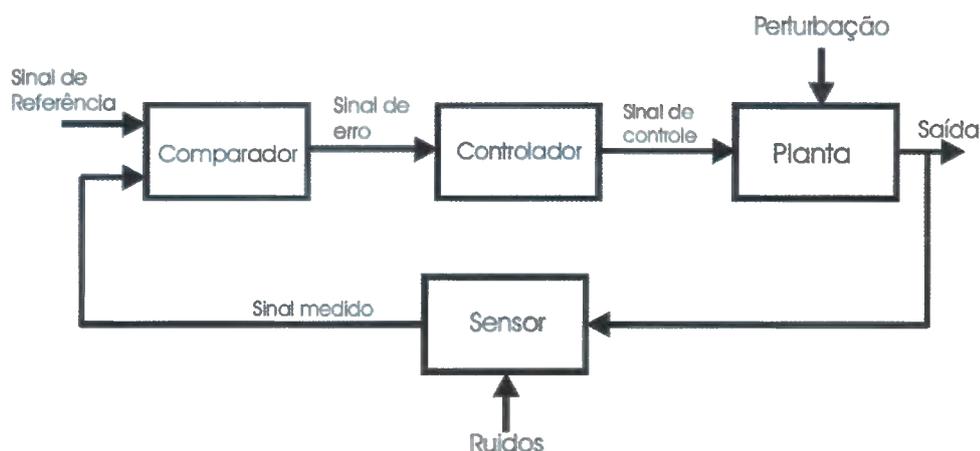


Figura 81 – Diagrama de Blocos do Sistema de Controle de Força.

O controlador calcula o valor do sinal de controle aplicado na planta, em tempo real, baseado no valor do sinal de erro. Este sinal corresponde à diferença entre o sinal de referência (no caso, a força que se deseja que a microgarra aplique na micropartícula) e o sinal (força) medida pelo sensor. Para efeito de projeto matemático do controlador, assumiu-se que os modelos são todos lineares e invariantes no tempo, ainda que alguns deles tenham parâmetros incertos.

Os três primeiros controladores projetados foram: 1) Proporcional 2) Atraso de Fase e 3) Fase Não-Mínima com Integrador. Para esses três, seguiu-se a metodologia clássica de projeto descrita em OGATA, 1987. Nesta metodologia, pode-se trabalhar diretamente com a família de modelos reportados na seção anterior. Já o quarto e último controlador foi projetado usando-se a metodologia de controle robusto H_{∞} (H infinito), onde foi necessário um modelo/planta médio na forma de função de transferência (também reportado na seção anterior) e representações matemáticas das incertezas.

Estas técnicas de projeto são especialmente úteis para garantir estabilidade e desempenho do sistema na presença de grandes incertezas nos valores dos parâmetros, distúrbios e ruídos intensos (que é o caso no presente projeto). Simulações foram então conduzidas com os modelos matemáticos da microgarra + micropartículas, em MATLAB, de forma a validar os controladores, e verificar se os limites de força são atendidos.

O primeiro controlador, proporcional, foi o mais simples de se implementar (e também o que menos consumiu tempo de processador e memória no computador), porém não apresentou a precisão desejada de controle de força. O controlador de atraso de fase teve uma precisão melhor. Entretanto, foi mais lento (tempo de acomodação maior). Estes dois controladores, por conta de precisão não muito alta, exigiram menos esforço de controle (valores menores do sinal de controle). O controlador de fase não-mínima com integrador, por outro lado, é mais complexo do ponto de vista computacional, porém atingiu melhor desempenho, com erro estacionário praticamente zero, e rapidez igual à atingida pelo controlador proporcional. Como lado negativo, os níveis de esforço de controle foram maiores que os dois outros controladores, o que foi necessário para se ter precisão de força. O controlador H_∞ também é de ordem alta, apresentou esforço de controle considerável, porém com precisão e a rapidez superiores.

7.3 Implementação

A implementação (no aparato experimental) dos controladores projetados, após terem sido validados em simulação (como descrito em 7.2), apresentou desafios tecnológicos que serão vencidos no futuro. Não foi possível a inclusão desta atividade no trabalho de mestrado do aluno vinculado ao projeto, devido ao término da bolsa.

Para futura implementação do sistema de controle de força, será necessária uma placa de aquisição (conversores AD e DA) com frequência de amostragem pelo menos até 20kHz e uma placa de amplificação de sinais (drivers de potência) que eleve a tensão do sinal de entrada da microgarra a valores compatíveis. Adicionalmente, os controladores deverão ser transcritos da linguagem MATLAB para Labview, que é a linguagem nativa do equipamento. Eventualmente, os parâmetros do controlador podem precisar de ajustes diretamente na planta, como ocorre com sistemas de controle aplicados na prática. Isto será feito, sobretudo, para garantir que os limites de força sejam respeitados quando da aplicação.

8 SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS REFERENTES À META 2

As atividades de desenvolvimento da Meta 2 culminaram com a integração e testes do sistema robótico, incluindo os microatuadores com sensores de força, unidade de controle e potência, sistema de visão e sistema de comunicação. O projeto, simulação, programação e otimização dos controladores foram etapas críticas do trabalho.

Deve-se ressaltar que além dos avanços técnicos obtidos no desenvolvimento das etapas referentes à Meta em questão, a capacitação de estudantes e estagiários nesta fase do trabalho foi bastante relevante.

As atividades de identificação e manipulação (descritas na seção 6) contaram com o apoio de excelentes estagiários da USP (Luiza Drigo de Almeida e Jessica Gonçalves da Silva) e UFABC (Vanessa Tinami Tamashiro) em diferentes momentos, os quais contribuíram significativamente nas tarefas experimentais.

Para as tarefas de modelagem e controle do sistema de micromanipulação foi essencial a parceria com o Professor Diego Colon do Laboratório de Automação e Controle da POLI-USP, e do seu aluno de Mestrado, Andrei Araújo Felix, o qual tem como tema de dissertação o trabalho descrito na seção 7 deste relatório e no anexo A.

Embora outros grupos tenham desenvolvido modelos matemáticos e controladores para microgarras, este projeto permitiu o domínio de parte da tecnologia de micromanipulação pela equipe, abrindo oportunidades para muitas aplicações importantes, conforme será apresentado nas seções a seguir.

9 TESTE E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE MICROMANIPULAÇÃO (META 3)

Para a validação do sistema de micromanipulação foram empregadas as partículas de estanho-prata descritas na seção 6.1.1. Analisou-se o desempenho dos microatuadores e do sistema robótico, quando da manipulação das partículas em tarefas controladas e automáticas de retenção e movimentação.

A **Figura 82** ilustra o primeiro instante (micropinça na posição de referência) de um vídeo que demonstra o movimento da micropinça até uma partícula selecionada, captura desta partícula, movimentação da micropinça + partícula até uma segunda posição definida, e finalmente a liberação da partícula. Já na **Figura 83**, observa-se a sigla IPT construída por micropartículas, onde fica demonstrada a possibilidade de um sequenciamento de elementos de forma precisa e controlada. Desta forma, o desempenho funcional do sistema integrado de manipulação foi validado.

As tentativas de obter-se estruturas deformáveis de referência (em PDMS e as produzidas com impressora 3D) foram desafiadores, como descrito nas seções 6.1.2 e 6.1.3. Desta forma, a validação do sistema para elementos deformáveis quanto a sua caracterização mecânica (parâmetros de deformação), precisa ser continuada em trabalhos futuros.

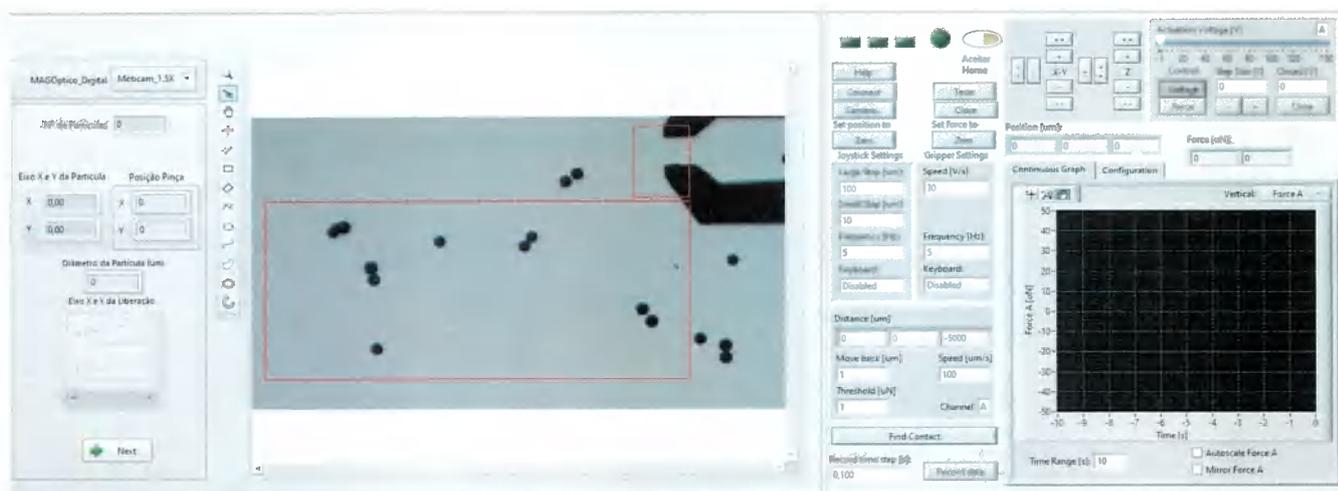


Figura 82 – Manipulação automática de partículas rígidas (Imagem e Vídeo).

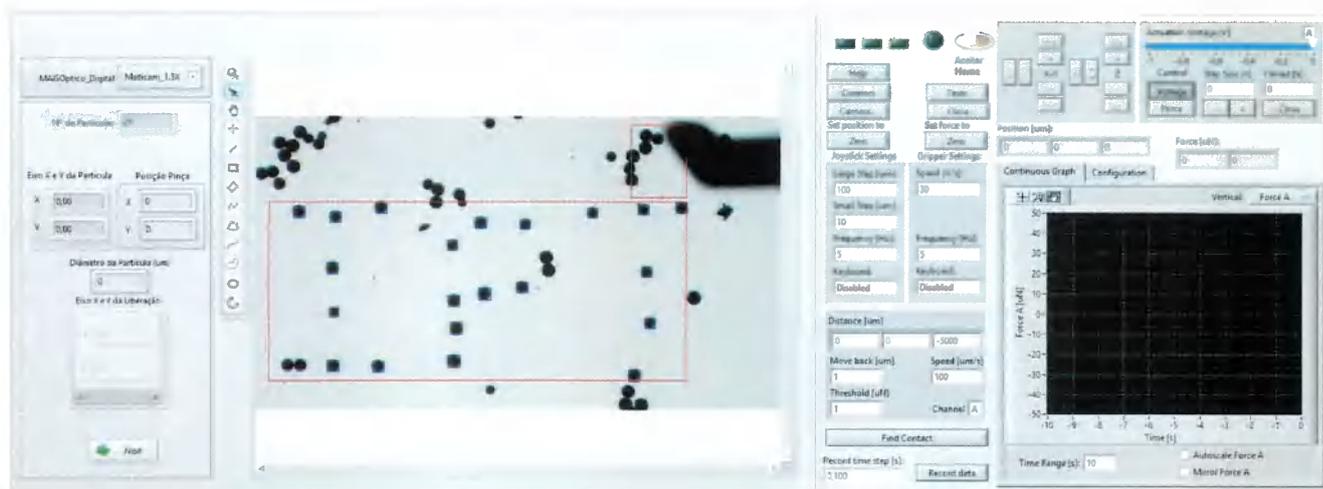


Figura 83 – Sequenciamento de micropartículas: escrita “I” “P” “T” (Imagem e Vídeo).

Foram realizados, no entanto, testes de manipulação das células animais, descritas em 6.1.5 e ilustradas na **Figura 84**, onde verificou-se a dificuldade do processo de identificação e captura das células, por estas estarem inseridas em um meio líquido. A complexidade da manipulação automática destes elementos aumenta drasticamente, pois além da interação da micropinça com a partícula, existe também a interação da micropinça com o meio de cultura. O movimento da micropinça no meio líquido afeta as partículas próximas da pinça, fazendo as mesmas se movimentarem com a transferência de movimento do fluido. Desta forma, neste projeto, todos os elementos em meio líquido foram manipulados manualmente.

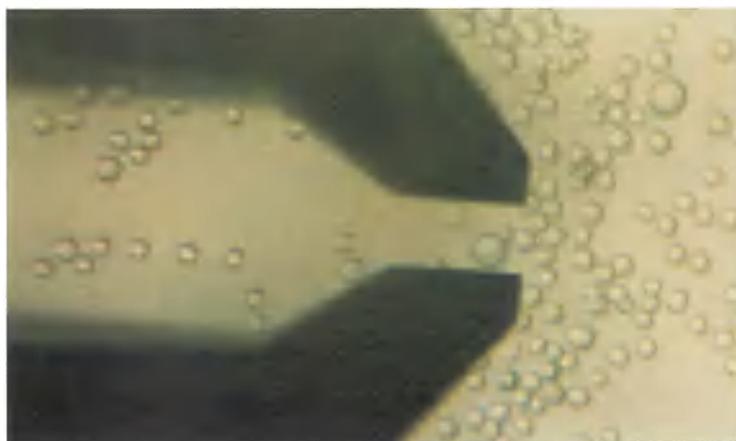


Figura 84 – Manipulação Célula Animal (Imagem e Vídeo).

10 APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO FUNCIONAL DO SISTEMA DE MICROMANIPULAÇÃO (META 4)

Após validação, o Sistema de Micromanipulação foi aplicado na manipulação de partículas biopoliméricas e células, de acordo com a Meta 4 (Tabela 3), e como descrito a seguir. Adicionalmente, iniciou-se estudos de uma nova aplicação deste sistema para caracterização de MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*).

10.1 Manipulação de partículas biopoliméricas

O alginato trata-se de um copolímero linear composto pelos monômeros de ácido β -D-manurônico (bloco - M) e ácido α -L-gulurônico (bloco - G), sendo que as proporções destes blocos possuem uma relação direta com as propriedades físicas e com processo de reticulação do alginato. As concentrações do agente reticulante e de alginato, bem como o tempo e o processo de reticulação, podem interferir nas propriedades mecânicas do alginato e com isso interferir na viabilidade de aplicações destas partículas. Sendo assim, uma tecnologia que permita determinar as propriedades mecânicas de micropartículas de alginato de cálcio poderia contribuir para definição da composição destas micropartículas a fim de aumentar a proteção celular durante os ensaios em biorreatores.

Partículas de alginato com diâmetro médio de 80 a 90 μm foram produzidas em diferentes concentrações em laboratório da Engenharia Química da UNICAMP, como reportado em OLIVEIRA et al. (2019), e foram testadas no sistema de micromanipulação, sendo possível a medida da força atuante quando da deformação da micropartícula, como apresentado na **Figura 85**. No instante em que foi capturada a imagem inferior, a tensão aplicada na micropinça era de aproximadamente 110V (indicado na barra azul do lado esquerdo da figura) e a força medida pelo sensor na atuação da micropinça sobre a partícula foi de aproximadamente 10 μN (gráfico do lado esquerdo da figura).

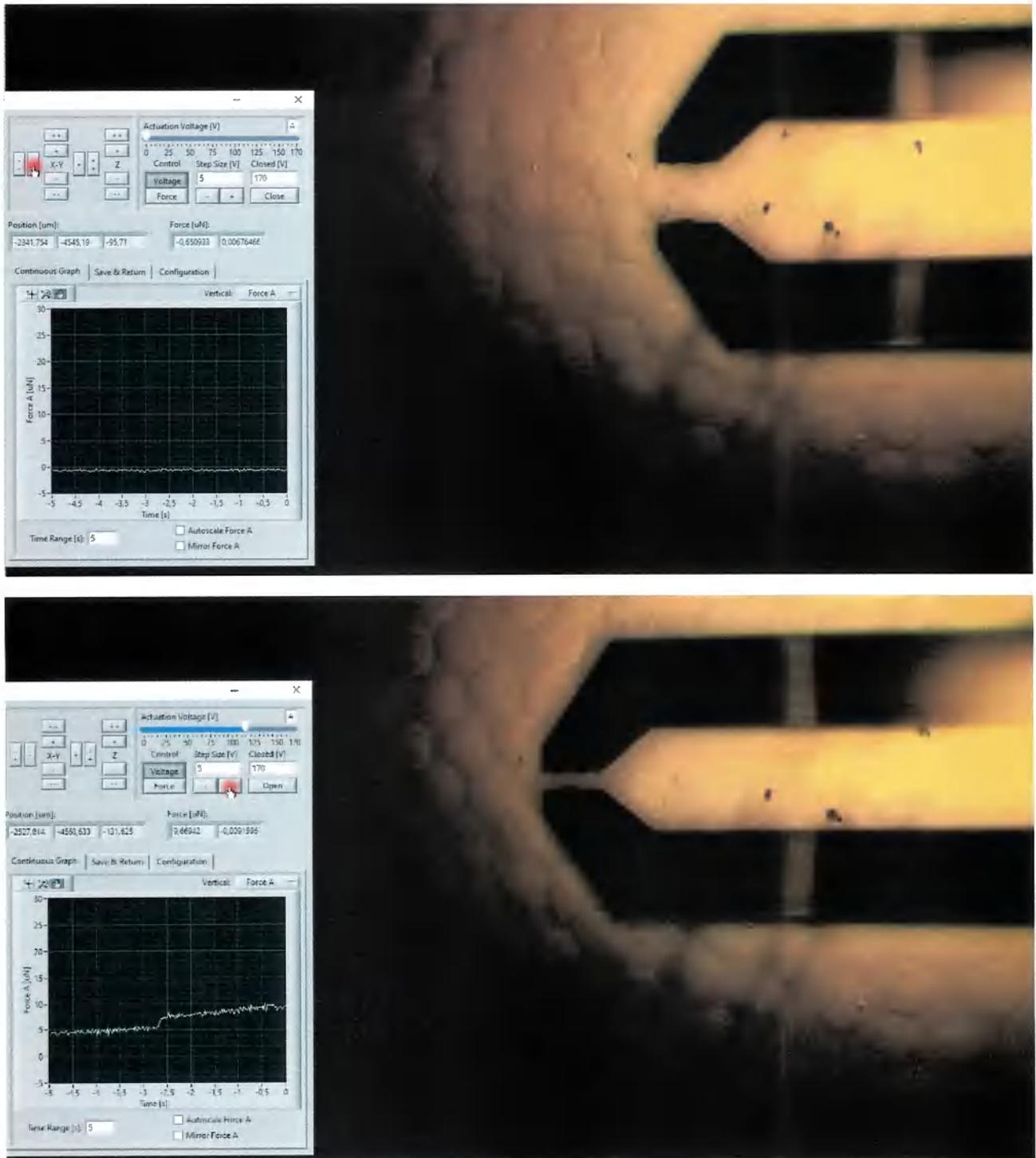


Figura 85 – Manipulação de micropartículas de Alginato de Cálcio (Imagem e Vídeo). Superior: sem aplicação de tensão (força) na microgarra. Inferior: aplicação de aproximadamente 110V.

10.2 Manipulação de células

Nesta etapa foram testadas células humanas e células vegetais, cedidas pelo Laboratório de Biotecnologia do IPT, como apresentado na **Figura 86** e na **Figura 87**, respectivamente.

No contexto de células humanas o sistema de micromanipulação pode ser empregado para avaliar células em crescimento 3D, simulando ambientes reais de crescimento (exemplo, no caso de tumores). Quando estas células crescidas tridimensionalmente estão bem formadas há interação delas com proteínas da matriz extracelular formando esferoides com maior resistência mecânica. Do contrário, o conjunto pode desmanchar-se com facilidade ao ser manipulado pela micropinça. Comparando as imagens superior e inferior da **Figura 86** observa-se que o sensor de força da micropinça utilizada não possui resolução suficiente para detectar a força de deformação da célula tumoral em questão. A célula é comprimida pela micropinça e a força aplicada não é detectada conforme gráfico à esquerda.

Já no caso de células vegetais, as quais apresentam parede celular com maior resistência mecânica, como ilustrado na **Figura 88**, foi possível a detecção da força de deformação no gráfico à esquerda da **Figura 87**, quando comparada a imagem superior da micropinça aberta sem células, com a imagem inferior onde a micropinça está comprimindo um conjunto de células. Nesta aplicação, o sistema de micromanipulação pode auxiliar na validação da formação de conjuntos agregados celulares 3D (esferoides), como indicado na **Figura 89**. A matriz intercelular precisa estar formada (como nos esferoides) para dar suporte ao crescimento de tecidos celulares.

Verificou-se neste trabalho, que além da manipulação automática de células em meios de cultura ser uma ação complexa (como discutido na seção 3) devido aos efeitos da interação micropinça e fluido, as células em si apresentam características mecânicas difíceis de serem medidas, exigindo sensores de alta resolução. Este último desafio abre oportunidade para o desenvolvimento de sensores e micropinças customizados para tal aplicação.

Além disso, a pinças comerciais são estruturalmente frágeis e extremamente caras. A manipulação destas pinças (instalação no braço robótico e operação) exige habilidade

e treinamento do operador. Desta forma, fica evidente a demanda de produção das micropiças “in house” para atender as aplicações em questão.

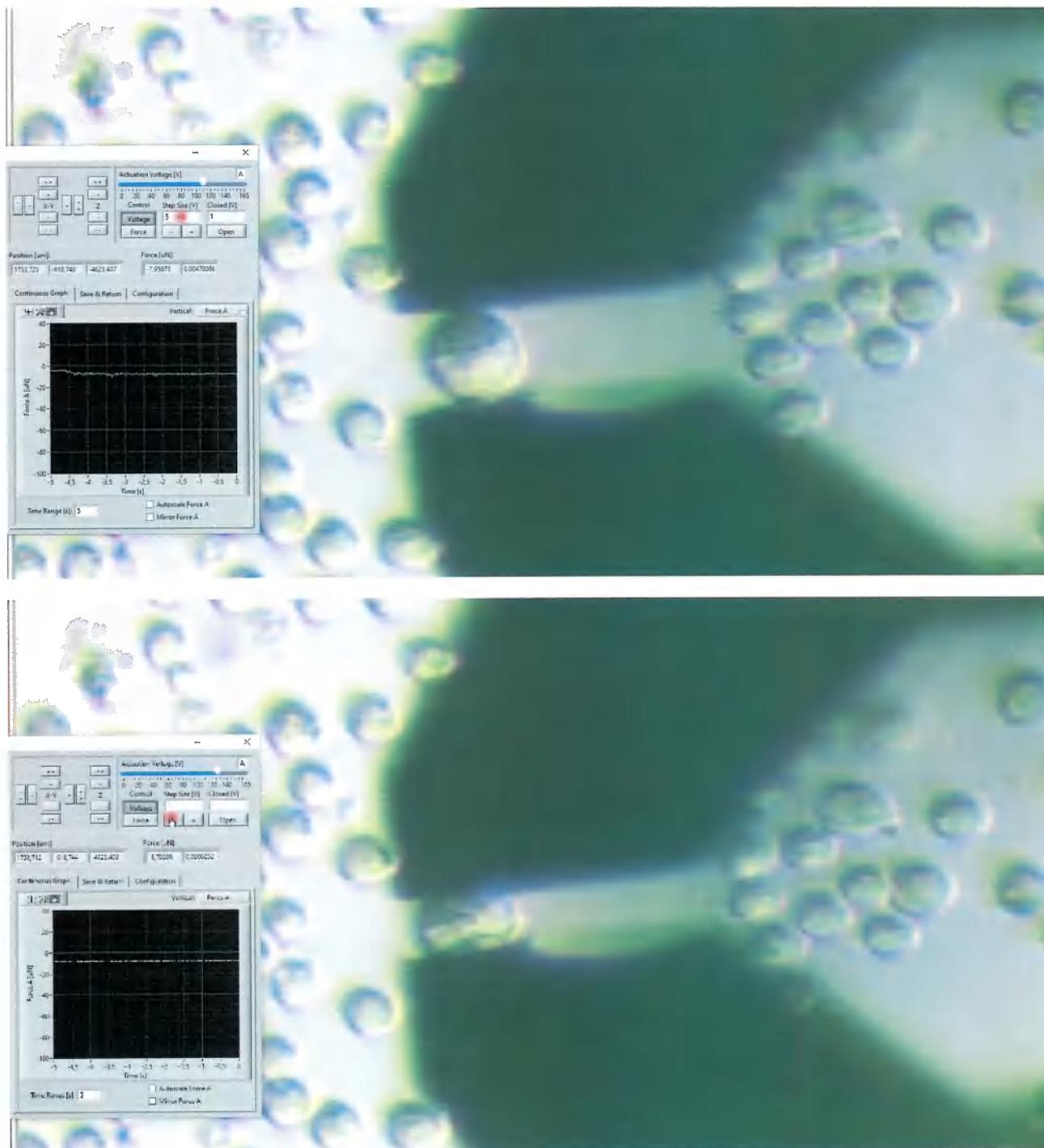


Figura 86 – Manipulação célula humana tumoral (Imagem e Vídeo). Superior: Pinça em processo de fechamento mas sem deformar a célula. Inferior: Pinça deformando a célula.

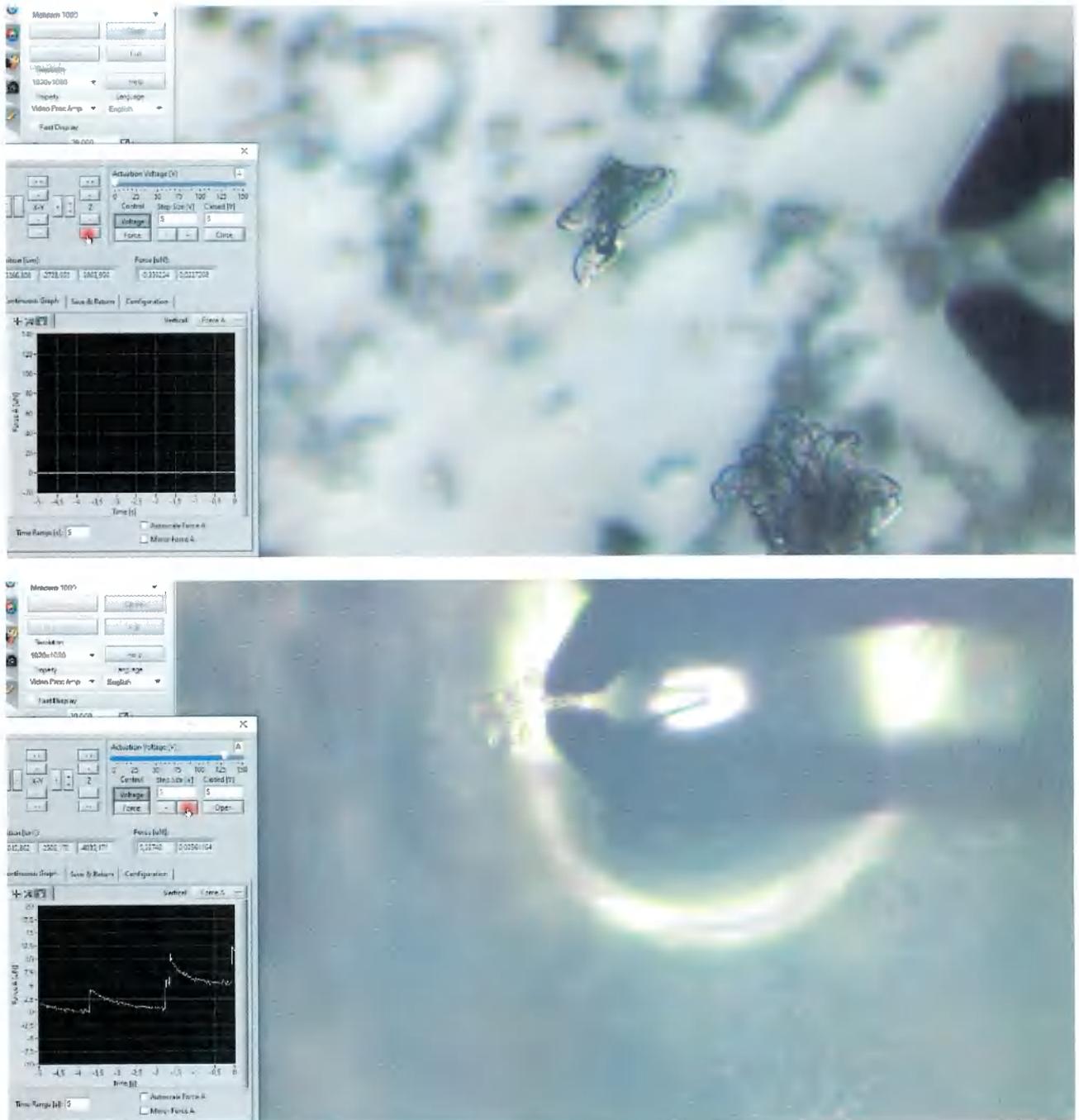


Figura 87 – Manipulação de esferoides vegetais - células em estrutura 3D (Imagem e Vídeo). Superior: micropinça em aproximação para captura das células. Inferior: Micropinça atuando sobre um esferoide.

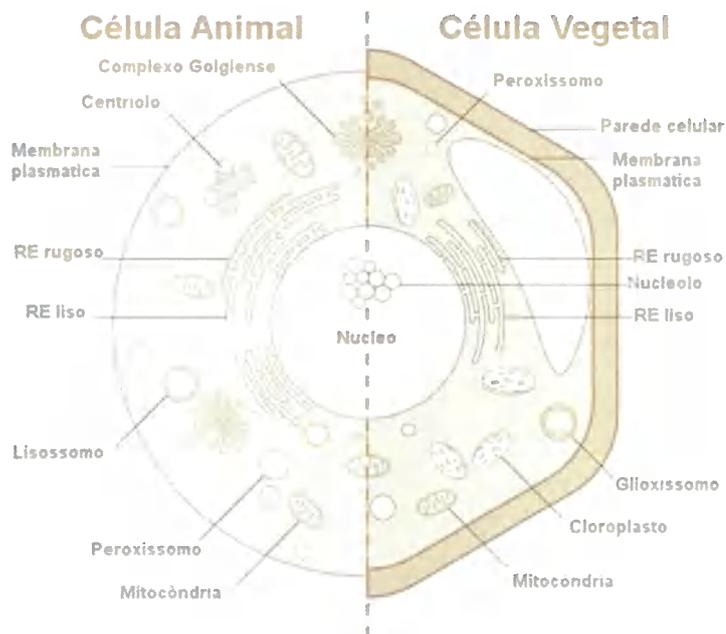


Figura 88 – Estrutura celular de células animais e vegetais

<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/diferencas-entre-celula-animal-vegetal.htm>

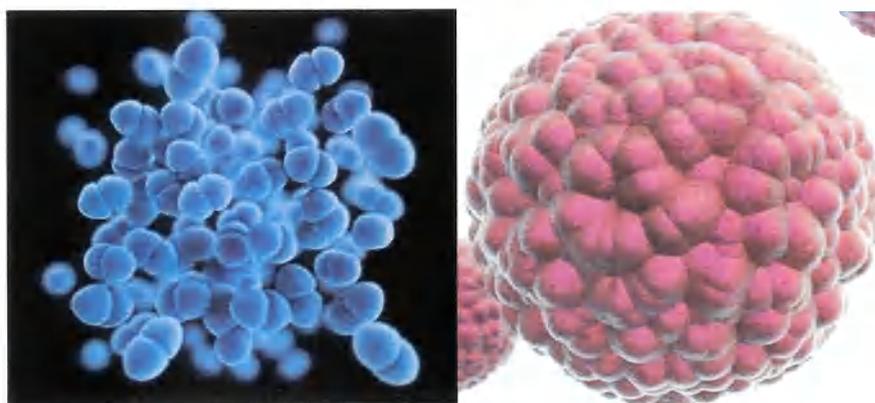


Figura 89 – Conglomerado de células (esquerda) e esferoide de células (direita), sendo este último desejável para a formação de tecidos celulares.

10.3 Caracterização de MEMS (Nova aplicação)

O dispositivo MEMS (Micro Electro Mechanical System) utilizado foi um atuador eletrotérmico. Este funciona com a passagem de corrente pelo silício, provocando uma expansão do material, e gerando um efeito de torque no cantilever, o qual provocará o movimento da viga suspensa, como apresentado na **Figura 90**. Tal dispositivo pode ser calibrado e utilizado, por exemplo, como um sensor de temperatura. Sua fabricação foi realizada no Laboratório de Nanofabricação da Universidade de Michigan, como parte do treinamento em Processos de Microfabricação do pesquisador Bruno Verona do IPT.

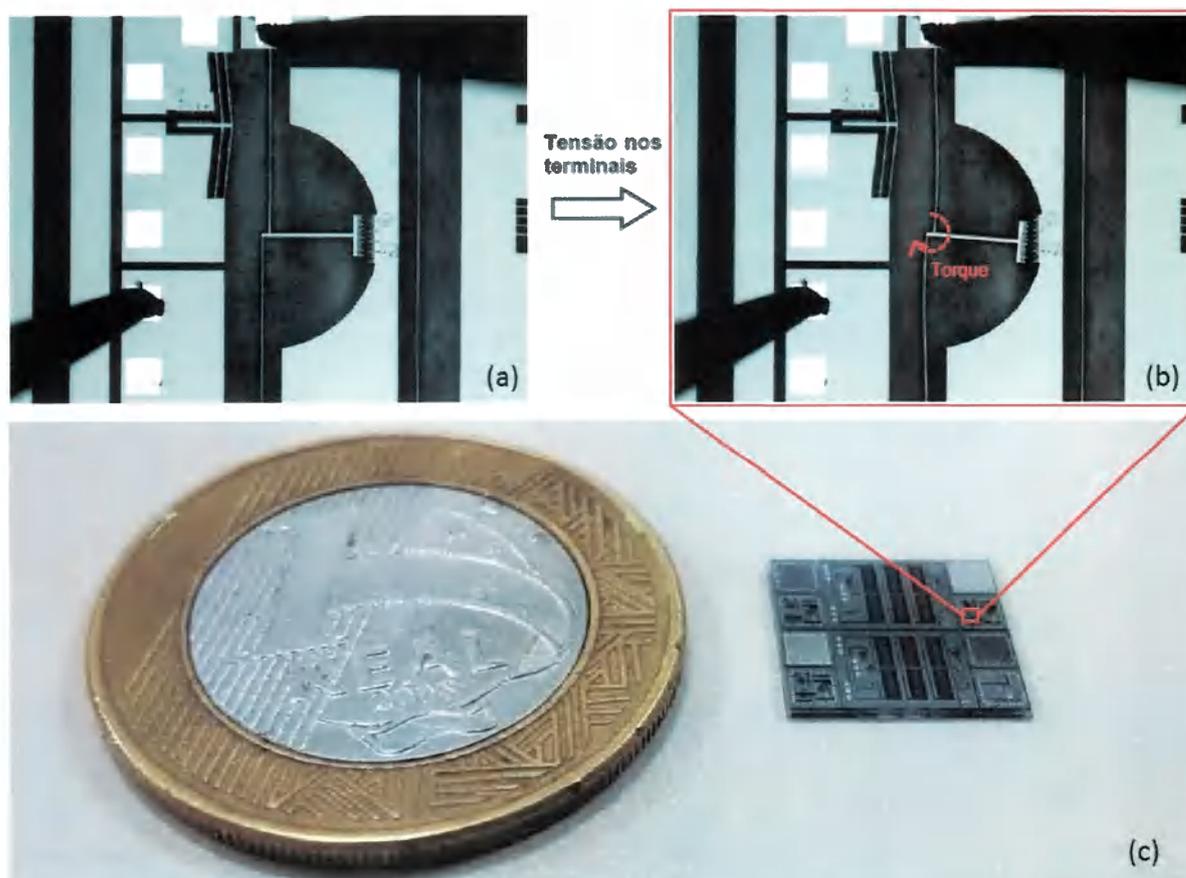


Figura 90 – Dispositivo MEMS eletrotérmico. (a) Atuador na posição zero de referência; (b) Atuador sob ação de torque causado pela tensão aplicada aos terminais; (c) *Die* fabricado com diversos dispositivos MEMS, incluindo o atuador testado neste projeto.

A **Figura 91** ilustra a utilização de uma sonda sensora (*sensor probe*) no Sistema de Micromanipulação para a medida de força aplicada na movimentação da haste do atuador eletrotérmico. Na imagem superior, a sonda está afastada da haste e não há força sendo medida no gráfico do lado esquerdo. Na imagem inferior, a sonda sensora em contato com a haste aplica e detecta uma força da ordem de centenas de μN .

A demonstração desta aplicação abre inúmeras possibilidades de caracterização para dispositivos MEMS, incluindo os fabricados na Sala Limpa do Laboratório de Micromanufatura do IPT, onde o projeto em questão foi desenvolvido. Vale ressaltar a caracterização de sensores inerciais do tipo acelerômetros (atual projeto FAPESP em andamento no laboratório).

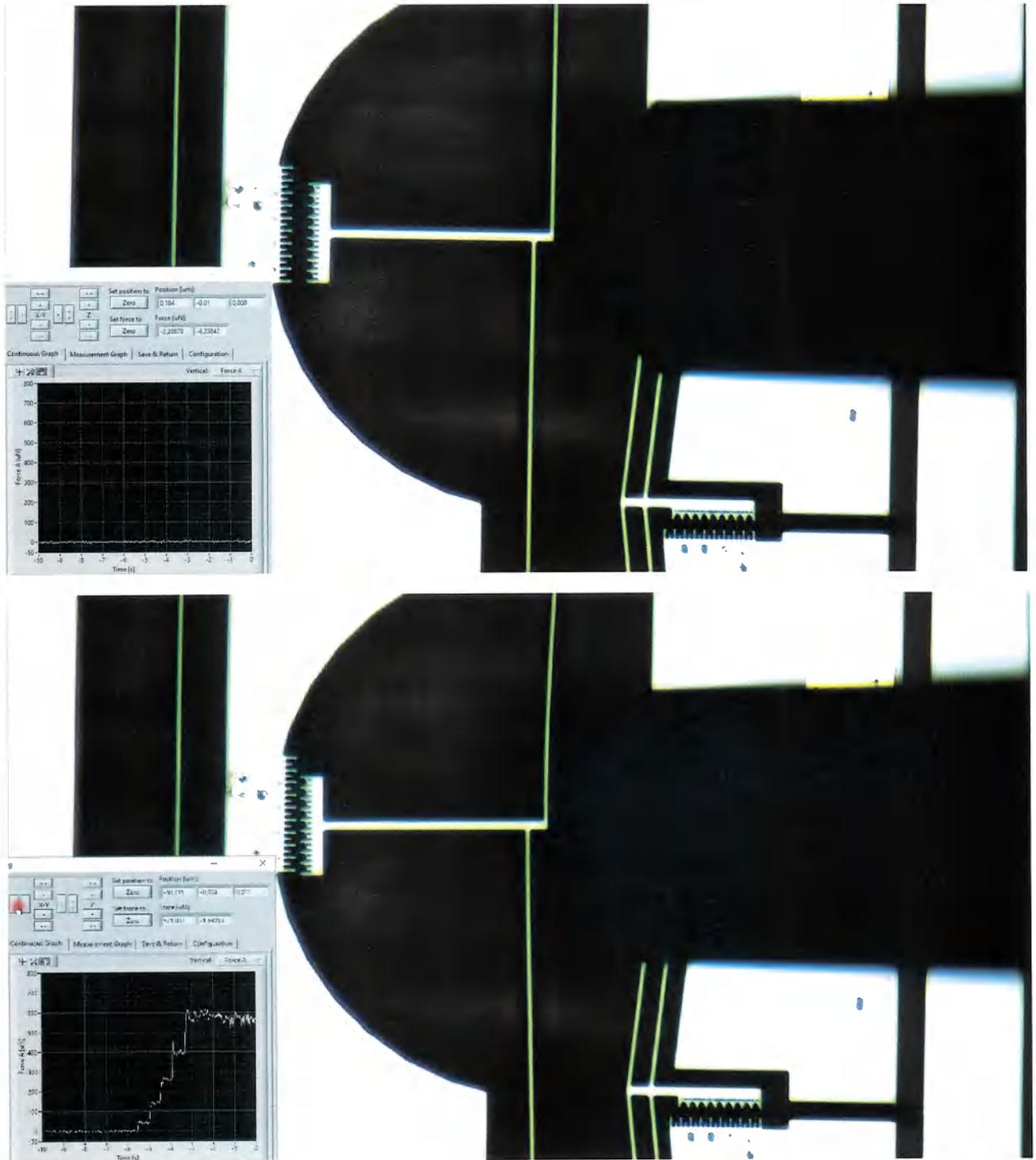


Figura 91 – Caracterização de atuador MEMS (Imagem e Vídeo). Superior: Probe próxima do atuador. Inferior: Probe aplicado força da ordem de centenas de μN no atuador.

11 PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO E DIVULGAÇÃO DO PROTÓTIPO DE MANIPULAÇÃO (META 5)

11.1 Capacitação

Este projeto contribuiu na capacitação técnica de 5 estagiários (FATEC, USP, UFABC) e de 1 aluno de mestrado (USP), além de pesquisadores do IPT.

Os alunos da FATEC (Faculdade de Tecnologia de São Paulo), Marcel Castilho Batista de Carvalho e José Roberto Candido da Silva, destacaram-se como bolsistas neste projeto pela Fundação do IPT (FIPT). O primeiro apresentou seu trabalho no 16º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica da Fatec, sob o título “Micropinças eletrotermomecânicas criadas por corte a laser para micromanipulação”, o qual recebeu menção honrosa.

Os estagiários da USP, Luiza Drigo de Almeida e Jessica Gonçalves da Silva, e da UFABC, Vanessa Tinami Tamashiro, contribuíram significativamente nas tarefas experimentais e de programação referentes ao sistema de micromanipulação.

A parceria com o Professor Diego Colon do Laboratório de Automação e Controle da POLI-USP, e do seu aluno de Mestrado, Andrei Araújo Felix, o qual tem como tema de dissertação o trabalho descrito na seção 7 deste relatório e no anexo A, foi essencial para o desenvolvimento das etapas de modelagem e controle do sistema de micromanipulação.

11.2 Divulgação

Além da apresentação no 16º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica da Fatec, como citado em 11.1, outra parte do trabalho contido neste relatório foi apresentada no VETOMAC: 15th International Conference on VIBRATION ENGINEERING AND TECHNOLOGY OF MACHINERY Curitiba, Brazil, from 10 to 15 November 2019, como ilustrado na **Figura 92**. Em 2020 pretende-se participar do CBA: XXIII Congresso Brasileiro de Automática (local ainda não divulgado), e submeter artigo

para o Control Engineering Practice (<https://www.sciencedirect.com/journal/control-engineering-practice>).

15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON VIBRATION ENGINEERING
AND TECHNOLOGY OF MACHINERY
Vetomac XV- NOVEMBER/2019

Preprint submitted to 15th Vetomac

Modeling, Identification and Controller Design for an Electrostatic Microgripper

Andrei Araujo Felix ¹, Diego Colón ^{1*}, Bruno M. Verona ², Luciana W. S. L. Ramos ²
Houari Cobas-Gomez ³, Mario R. Gongora-Rubio ²

¹ Laboratório de Automação e Controle (LAC) - Escola Politécnica da USP - São Paulo, Brasil

² Núcleo de Bionanomanufatura - Laboratório de Micromanufatura - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, Brasil

³ Scinntech - São Paulo, Brasil

* *Corresponding Author*: diego@lac.usp.br.

Abstract. In this paper, we study and construct mathematical models for force control of an electrostatic microgripper while grasping a microparticle. Firstly, we analyze a well-known linear model in the literature and then perform a system identification based on an experimental setup. Finally, we design, simulate and implement a closed-loop force control law in the experimental apparatus. The control theory to be used in this paper is the Linear Quadratic Gaussian with Loop Transfer Recovery (LQG/LTR). The grasped microparticle is modelled initially as a spring and it is not significantly deformable as verified under the microscope.

Figura 92 – Abstract do trabalho apresentado no VETOMAC.

11.3 Aplicação

Como descrito na seção 10, o Sistema de Micromanipulação foi aplicado na manipulação de (i) partículas biopoliméricas, (ii) células e (iii) na caracterização de MEMS. Pretende-se, desta forma, oferecer o resultado deste trabalho, como um “Serviço Tecnológico” do IPT e/ou como estrutura para “Projetos de P&D em Parceria” a laboratórios de Universidades e Centros de Pesquisa que atuem nos temas (i), (ii) e (iii) citados.

12 CONCLUSÕES FINAIS

Considera-se que a Meta 1, referente ao projeto e fabricação do microatuador eletrotermomecânico, foi alcançada com sucesso, de acordo com as considerações apresentadas no item 5. Foi realizado o projeto (envolvendo MOT - Método de Otimização Topológica) e a fabricação de protótipos de micropiças ETM feitos a partir de folhas de aço inoxidável AISI 301 de 76 µm de espessura, usando usinagem a laser. Através da caracterização dos atuadores fabricados, pode-se determinar o desempenho dos mesmos e estimar a robustez do método de fabricação.

Em relação à Meta 2, foram analisados diversos microelementos, assim como a adequação do ambiente para micromanipulação. Foram desenvolvidos com sucesso estratégias de atuação automática e sensoriamento, assim como a modelagem e o projeto de controladores robustos para o sistema de micromanipulação aplicado à micropartículas rígidas. Esta última foi considerada a parte mais crítica do projeto, pois contemplou o maior número de desafios técnicos, valendo ressaltar os referentes à modelagem de sistemas não-lineares (necessário no caso de partículas deformáveis, como células), incluindo efeitos da interação da micropiça e partícula com o meio fluido (por exemplo, o meio de cultura de células). Desta forma, considera-se que a Meta 2 foi alcançada, gerando novos temas para trabalhos futuros.

A validação da Automação do Sistema de Micromanipulação, referente à Meta 3, foi realizada com partículas rígidas. Analisou-se o desempenho dos microatuadores e do sistema robótico, quando da manipulação das partículas em tarefas controladas e automáticas de retenção e movimentação, o qual atingiu as expectativas. As tentativas de obterem-se estruturas deformáveis de referência (em PDMS e as produzidas com impressora 3D) apresentaram diversos desafios de fabricação, e a validação do sistema quanto à caracterização mecânica (parâmetros de deformação) será continuada em trabalhos futuros. Testes de manipulação de elementos deformáveis em meio líquido, com controle manual, foram realizados com êxito.

Referente à Meta 4, foi demonstrada com sucesso a aplicação do Sistema de Micromanipulação na captura, retenção, medida de força de compressão e movimentação de partículas deformáveis (biopolímeros de alginato, células animais e células vegetais)

em meio líquido. Adicionalmente, o aparato experimental desenvolvido foi aplicado na caracterização de um atuador MEMS, demonstrando o potencial de aplicação do Sistema de Micromanipulação.

Considera-se também que a Meta 5, referente à capacitação e divulgação, foi atingida com mérito na formação de 5 estagiários de graduação e 1 aluno de Mestrado que participaram do desenvolvimento deste projeto. Resultados foram divulgados no 16º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica da Fatec, em São Paulo, e no congresso internacional VETOMAC realizado em Curitiba. A participação em mais um evento está planejada para 2020, assim como a publicação do trabalho em um jornal de alto impacto.

Desta forma, conclui-se este projeto de “DESENVOLVIMENTO DE MICROATUADOR ELETROTERMOMECÂNICO E INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE PARA MANIPULAÇÃO DE MICROELEMENTOS”, o qual contribui significativamente na formação técnica da equipe, incluindo estagiários, alunos e professores de outras instituições, bem como, deixou ao Laboratório de Micromanufatura do IPT uma estrutura experimental robusta para a continuidade de trabalhos nesta área.

São Paulo, 28 de novembro de 2019.

NÚCLEO DE BIONANOMANUFATURA
Laboratório de Micromanufatura



Eng.ª Mecânica Dra. Luciana Wasnievski da Silva
Pesquisadora
CREA-SC 076933-8 – RE N° 08886

NÚCLEO DE BIONANOMANUFATURA
Laboratório de Micromanufatura



Química Dr. Beatriz Nogueira Miranda
Chefe do Laboratório
CRQ nº 04165847 – RE nº 9180

NÚCLEO DE BIONANOMANUFATURA



Eng.º Químico Dr. Adriano Marim de Oliveira
Diretor
CRQ 04357119 – RE nº 08720

“Os resultados apresentados no presente relatório têm significação restrita aos itens analisados, não atestando, pois, a qualidade da produção, sendo vedado seu uso para fins de propaganda ou comerciais, sob qualquer forma ou meio de difusão, assim como qualquer tipo de menção ao IPT. A reprodução ou divulgação do presente relatório só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração, e unicamente em atendimento às atividades técnicas do cliente ou em cumprimento a exigências legais, sendo vedada para quaisquer outras finalidades”.

AGRADECIMENTO

A equipe do IPT e parceiros agradecem ao Deputado Roberto Freire pela proposição da Emenda Parlamentar 12340018-14 que fomentou este projeto, assim como ao MCTIC por esta oportunidade de desenvolvimento, e por todo apoio técnico e administrativo que proporcionaram ao longo da duração deste projeto.

EQUIPE TÉCNICA

LABORATÓRIO DE MICROMANUFATURA / BIONANOMANUFATURA / IPT

- **Pesquisadores:**

- Luciana Wasnievski da Silva / Engenheira Mecânica, Ph.D.
- Mário Gongora Rubio / Engenheiro Eletrônico, Doutor
- Bruno Verona / Engenheiro Eletrônico, Bacharel
- Houari Cobas / Engenheiro Eletrônico, Doutor
- Liz Katherine Rincón Ardila / Engenheira Eletrônica, Doutora (ex-IPT)
- Luis Augusto Motta Mello / Engenheiro Mecânico, Doutor (ex-IPT)

- **Estagiários:**

- Vanessa Tinami Tamashiro/ Cursando Engenharia na UFABC
- Jessica Gonçalves da Silva / Física na USP (ex-IPT)
- Luiza Drigo de Almeida / Engenharia na USP (ex-IPT)
- Marcel Castilho Batista de Carvalho / Tecnólogo FATEC (ex-IPT)
- José Roberto Cândido da Silva / Tecnólogo FATEC (ex-IPT)

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

- **Professores:**

- Emílio Carlos Nelli Silva / Engenheiro Mecânico, Ph.D.
- Diego Colón / Engenheiro Eletrônico, Doutor

- **Alunos:**

- Andrei Araújo Felix, mestrado com bolsa atribuída em Setembro/2017

SCINNTECH

- **CEO e Pesquisador:**

- Houari Cobas / Engenheiro Eletrônico, Doutor

APOIO ADMINISTRATIVO

IPT

- Claudia dos Santos (Gerente de Orçamento e Controle)
- Sueli Mitiko Aldeia (Analista de Contratos)
- Gicelma de Lima Silva (Secretária)

RECURSOS FINANCEIROS

O valor total aprovado para este projeto foi de R\$ 850.228,02, sendo que R\$ 595.928,00 foram concedidos pelo MCTIC como recurso de capital, através da Emenda Parlamentar 12340018-14, e R\$ 254.300,02 foram realizados como contrapartida do IPT no pagamento de pessoal. No entanto, para a execução do mesmo, foram necessários recursos adicionais provenientes do próprio IPT, da Fundação do IPT e de parceiros, como indicado a seguir:

- IPT:
 - Despesas acessórias com importação de equipamentos (serviços de desembaraço, seguro, frete), no montante aproximado de R\$ 50.000,00;
 - Bolsas de estágio IPT para 2 alunas da USP (Jessica Gonçalves da Silva e Luiza Drigo de Almeida) e 1 aluna da UFABC (Vanessa Tinami Tamashiro);
 - Bolsas da Fundação do IPT (FIPT) para 2 alunos da FATEC (Marcel Castilho Batista de Carvalho e José Roberto Cândido da Silva);
 - Taxa de bancada do aluno de Mestrado Andrei Araújo Felix através do Programa Novo Talento. Este recurso foi utilizado para participação em Congresso e aquisição de componentes eletrônicos;
- USP-CAPEs: Bolsa de Mestrado do aluno Andrei Araújo Felix (cota institucional da pós-graduação em engenharia elétrica da Escola Politécnica da USP);
- SCINTECH: Horas de pesquisador no montante aproximado de R\$ 60.000,00, e aquisição de componentes para desenvolvimento de placa eletrônica, no valor total de R\$ 1.300,00.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AK STEEL CORPORATION. **301 Stainless Steel**: product data bulletin. West Chester, Ohio. 2012. Disponível em: <http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/austenitic/AK%20301%20Stainless%20Steel%20PDB.pdf>. Acesso em: 03 set. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **B912 - 02(2013)**: Standard specification for passivation of stainless steels using electropolishing. West Conshohocken, PA, 2013.
- ANIS, Y.H.; HOLL, M.R.; MELDRUM, D.R. Automated Selection and Placement of Single Cells Using Vision-Based Feedback Control. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, 2009.
- BARATTO, A. C. et al. **Avaliação de dados de medição**: Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008. 2. ed. Duque de Caxias, RJ: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2012.
- BECATTINI, G.N.; MATTOS, L.S.; CALDWELL, D.G. A visual targeting system for the microinjection of unstained adherent cells. **Computers in Biology and Medicine**, v.43, p.109–120, 2013.
- BENDSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1988, 71(2), 197-224, 1988.
- BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. Material interpolation schemes in topology optimization, **Archive of Applied Mechanics**, 69(9-10), 635-654, 1999.
- BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology Optimization**: Theory, methods and applications. 2. ed. Berlin: Springer, 2003.
- BEYELER, F. et al. Monolithically Fabricated Microgripper With Integrated Force Sensor for Manipulating Microobjects and Biological Cells Aligned in an Ultrasonic Field. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 16, p. 7-15, 2007.

- BORDATCHEV, E. V.; NIKUMB, S. K. Electro-thermally driven microgrippers for micro-electro-mechanical systems applications. **Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS**, v. 4, p. 023011-1–023011-7, 2005.
- BOUDAUD, M., HADDAB, Y., & LE GORREC, Y. Modeling and optimal force control of a nonlinear electrostatic microgripper. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 18, 1130-1139, 2013.
- BOUDAUD, M., DE FARIA, M. G., LE GORREC, Y., & HADDAB, Y. An output feedback LPV control strategy of a nonlinear electrostatic microgripper through a singular implicit modeling. **Control Engineering Practice**, 28, 97-111, 2014.
- CHEN, T.; PAN, M.; WANG, Y.; LIU, J.; CHEN, L.; SUN, L. Manipulation of Microobjects Based on Dynamic Adhesion Control. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 9, p. 1-9, 2012.
- CHEN, T. C.; DARLING, R. B. Fundamentals of Laser Ablation of the Materials Used in Microfluidics. In: Kahrizi, M. (Ed.) **Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nano Structures**. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. cap. 3.
- CHRONIS, N.; LEE, L. P. Electrothermally Activated SU-8 Microgripper for Single Cell Manipulation in Solution. **Journal of microelectromechanical systems**, v.14, n.4, p.857-863, 2005.
- COMTOIS, J. H.; BRIGHT, V. M. Surface micromachined Polysilicon Thermal Actuator Array and Applications. In: **SOLID-STATE SENSOR AND ACTUATOR WORKSHOP**, 1996, Hilton Head, South Carolina. **Proceedings...** Hilton Head, South Carolina: Transducers Research Foundation, Inc., 1996. P. 1-308.
- DEJEU J. et al. Nanostructured Nonadhesive Surfaces for Micro- and Nanomanipulation. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 116, p. 15117–15125, 2012.
- EFUNDA, INC.. eFunda Directory Service. Disponível em: <http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_301&show_prop=all&Page_Title=AISI%20Type%20301>. Acesso em: 08 dez. 2014.

- FEMTOTOOLS. Applications. Disponível em: <<http://www.femtotools.com/index.php?id=applications-nanocoils>>. Acesso em: 08 dez. 2014.
- FEMTOTOOLS. FT-G Microgripper. Disponível em: <<http://www.femtotools.com/products/accessories/ft-g-microgripper/>>. Acesso em: 01 set. 2015.
- FERREIRA, A. and APHALE, S. S. A Survey of Modeling and Control Techniques for Micro- and Nanoelectromechanical Systems. **IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics—part c: applications and reviews**, v. 41, n. 3, 2011.
- FUKUDA, T., NAKAJIMA, M.; KOJIMA, M. **Research and Technology on Micro-Nano Mechatronics**. Chapter 1, Micro-nano mechatronics –New trends in material, measurement, control, manufacturing and their applications in biomedical engineering. ISBN 978-953-51-1104-7, Março 2013.
- GOODFELLOW. Nickel (Ni): Material Information. Disponível em: <<http://www.goodfellow.com/E/Nickel-Metal.html>>. Acesso em: 17 fev. 2016.
- HABER, R. B.; JOG, C. S.; BENDSØE, M. P. A new approach to variable-topology shape design using a constraint on perimeter, **Structural Optimization**, 11(1), 1-12, 1996.
- JERICHO, S. K. et al. Micro-electro-mechanical systems microtweezers for the manipulation of bacteria and small particles. **Review of Scientific Instruments**, v. 75, p. 1280-1282, 2004.
- JIA, Y.; XU, Q. MEMS Microgripper Actuators and Sensors: The State-of-the-Art Survey. **Recent Patents on Mechanical Engineering**, v. 6, p. 132-142, 2013.
- JLC ELECTROMET PVT. LTD.. Nickel - Properties, Fabrication and Applications of Commercially Pure Nickel. Disponível em: <http://www.nickel-alloys.net/commercially_pure_nickel.html>. Acesso em: 08 dez. 2014.
- JONSMANN, J. **Technology Development for Topology Optimised Thermal Actuators**. Lyngby, 1999. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark.
- KAWAHARA, T. and ARAI, F. Micro-Nano Robotics and Mechatronics for Biomedical Applications, **Micro-nano mechatronics –New trends in material, measurement,**

- control, manufacturing and their applications in biomedical engineering**, Chapter 5. 2013.
- KELLER, C. G. Microfabricated silicon high aspect ratio flexures for in-plane motion. Berkeley, CA, 1998. **Ph.D. Thesis**, Dept. of Materials Science and Mineral Engineering, Univ. of Calif. at Berkeley.
- KOHLER, J.M. and HENKEL, T. Chip devices for miniaturized biotechnology. **Application Microbiology Biotechnology**, v.69, p.113-125, 2005.
- LERCH, P. et al. Modelization and characterization of asymmetrical thermal micro-actuators. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 6, p. 134-137, 1996.
- LIDE, D. R. (Ed.) Properties of Solids. In: LIDE, D. R. (Ed.) **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 94. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2016. Disponível em: <<http://www.hbcnetbase.com/>>. Acesso em: 16 fev. 2016.
- LJUNG, L. Practical Issues of System Identification. [S.I.]: Linköping University Electronic Press, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 6, 13 e 14.
- LU, Z., CHEN, P. C. Y. and LIN W., Force Sensing and Control in Micromanipulation; **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews**, vol. 36, no. 6, November 2006.
- MEMS and Nanotechnology Exchange. Bulk copper material data. Disponível em: <<https://www.memnet.org/material/coppercubulk/>>. Acesso em: 08 dez. 2014.
- NELSON, B. J.; SUN, Y.; GREMINGER, M. A. Microrobotics for molecular biology: Manipulating deformable objects at the microscale. In: **Robotics Research. The Eleventh International Symposium**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. p. 115-124.
- OGATA, K. Discrete-Time Control Systems. [S.I.]: Prentice-Hall, 1987. (Prentice-Hall International Editions). Citado na página 26.
- OLIVEIRA, A. F., Desenvolvimento de sistemas microfluídicos para produção de lipase por *Bacillus Subtilis* imobilizado em micropartículas de alginato: Development of microfluidic systems for lipase production by *Bacillus subtilis* immobilized on

- alginate microparticles. 2018. 1 recurso online (120 p.). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP.
- OLIVEIRA, A. F., BASTOS, R. G. and DE LA TORRE, L. G., "Bacillus subtilis immobilization in alginate microfluidic-based microparticles aiming to improve lipase productivity," *Biochem. Eng. J.*, vol. 143, no. December 2018, pp. 110–120, 2019.
- OXFORD LASERS LTD. **E-355 System – Operation Manual**. Didcot, UK, 2010. 119 p.
- RUBIO, W. M. et al. Topology optimized design, microfabrication and characterization of electro-thermally driven microgripper. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, p. 669–681, 2009.
- SARDAN, O. et al. Rapid prototyping of nanotube-based devices using topology-optimized microgrippers. **Nanotechnology**, v. 19, p. 495503-1–495503-9, 2008.
- SILVA, E.C.N. Synthesis with Piezoelectric Actuation. In: **G.K. Ananthasuresh. (Org.). Synthesis Methods for MEMS**. Boston: Kluwer Academic Publishers (series editor: Steve Senturia), 2004, v.1, p. 121-153.
- SUZUKI, K.; KIKUCHI, N. A homogenization method for shape and topology optimization, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 93(3), 291-318, 1991.
- UNITED PERFORMANCE METALS. Stainless steel sata sheets. Disponível em: <<http://www.upmet.com/products/stainless-steel/301-12-hard/physical>>. Acesso em: 08 dez. 2014.
- VALDASTRI, P.; CORRADI, P.; MENCIASSI, A.; SCHMICKL, T.; CRAILSHEIM, K.; SEYFRIED, J.; DARIO, P. Micromanipulation, communication and swarm intelligence issues in a swarm microrobotic platform. **Robotics and Autonomous Systems**, v.54, p.789–804, 2006.
- WIERZBICKI, R. et al. Design and fabrication of an electrostatically driven microgripper for blood vessel manipulation. **Microelectronic Engineering**, v. 83, p. 1651-1654, 2006.

XU, Q. Precision Position/Force Interaction Control of a Piezoelectric Multimorph Microgripper for microassembly. **IEEE Transaction on automation science and Engineering**, v.10, n.3, 2013.

YOLE DÉVELOPPEMENT, 2017:

http://www.yole.fr/iso_album/illus_mis2017_memsmarketforecasts_yole_may2017.png

YUKUN, J. and QINGSONG, X. "Design of a monolithic dual-axis electrostatic actuation MEMS microgripper with capacitive position/force sensors." **13th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO 2013)**, 817-820, 2013.

ANEXO A

Andrei Araujo Felix e Diego Colón, “**Identificação e Projeto de Controladores de Força Robustos para a Microgarra FT-G32 da FemtoTools**”, Projeto MCTIC - Convênio no. 01.0037.00/2014, 31 de outubro de 2019 (43 páginas).

Identificação e Projeto de Controladores de Força
Robustos para a Microgarra FT-G32 da FemtoTools
Projeto MCTIC - Convênio no. 01.0037.00/2014

Andrei Araujo Felix, Diego Colón

31 de outubro de 2019

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	5
2.1	Modelo Matemático do Sistema	6
3	IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS PARA O SISTEMA	13
3.1	Sinal de Entrada	13
3.2	Tipos de Modelos Abordados	14
3.2.1	Modelo ARMAX	14
3.2.2	Modelo OE	14
3.2.3	Modelo BJ	15
3.3	Instrumentação	15
3.4	Planejamento dos Experimentos de Identificação	16
3.4.1	Procedimento	16
3.4.2	Cuidados adicionais necessários	17
3.4.3	Obtenção do Modelo com Incertezas para 19,0 kHz	18
3.5	Resultados da Identificação para 19,0 kHz	18
3.5.1	Modelos ARMAX obtidos	20
3.5.2	Modelos OE obtidos	20
3.5.3	Modelos BJ obtidos	20
3.6	Obtenção da Família de Plantas	23
4	PROJETO DOS CONTROLADORES ROBUSTOS	25
4.1	Projeto de Controlador Robusto Proporcional: Método Clássico	27
4.1.1	Projeto do controlador proporcional	28
4.1.2	Simulações com o controlador proporcional	28
4.2	Controlador de Atraso de Fase	30
4.3	Controlador de Fase Não-Mínima com Integrador	33
4.4	Controlador H_∞ Sensibilidade Mista	35
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	42

1 Introdução

Micromanipulação é o processo de manipular objetos com dimensões na faixa dos micrometros. Esta técnica tem encontrado aplicações em diversas áreas, entre elas: 1) manipulação de material biológico, tal como células animais e vegetais (WEBER et al., 2015; LIU et al., 2010; SAKAR et al., 2016; CARROZZA et al., 2000); 2) caracterização de materiais, dentre outras. A micromanipulação é realizada através de microgarras, tal como a ilustrada na Fig. 1a, que podem ter acionamento eletrostático (como será o caso deste trabalho), térmico ou piezoelétrico (KIM et al., 2008). Em geral, estas microgarras estão instaladas em robôs de alta precisão, de forma a serem posicionadas onde estão as micropartículas.

A micromanipulação se dá em ambientes de centenas de nanometros a centenas de micrometros (conhecido como microdomínio). Nesta escala, muitos efeitos contra-intuitivos podem acontecer, causados por forças superficiais tais como tensão superficial e forças de Van der Waals (YOUNIS, 2011). A atração eletrostática domina sobre as forças de volume, tais como força gravitacional e forças de inércia, o que torna a manipulação de microobjetos bastante desafiadora. O controle da força que a microgarra exerce sobre o objeto manipulado é essencial em muitas aplicações, tais como a manipulação de células vivas, onde a força excessiva pode ser letal. Deste modo, faz-se necessário o controle em malha fechada, com medição em tempo real da força aplicada (LIU et al., 2009).

Este projeto consiste em desenvolver um sistema de controle automático em malha fechada de força para uma microgarra de maneira a se atingir boa precisão de força, sem exceder os limites de segurança pré-estabelecidos, além de atingir o valor desejado de força em tempo razoável. O dispositivo que se pretende controlar é o micromanipulador FT-G32 da FemtoTools[®] GmbH, conforme mostrado na Fig. 1a.

Este micromanipulador é do tipo eletrostático, o que significa que ambas as hastes da microgarra são ligadas a pentes de capacitores que, quando carregados, exercem força nas microgarras, que transmitem essas forças ao microobjeto manipulado. O aparato experimental, que é apresentado na Fig. 1b, consiste da microgarra, que se fixa a um robô de alta precisão, onde se pode controlar manualmente a posição. Esta posição pode ser medida através de um sistema de microscópio, onde um monitor é usado para auxiliar no posicionamento da microgarra. O sinal de força da microgarra (que é medido por um sensor do tipo capacitivo, que é uma das hastes do micromanipulador) é condicionado (amplificado) para a faixa de 0 a 10V, de modo que pode ser lido por uma placa de aquisição (conversor AD), ligada ao computador de controle. O controlador é implementado no software MATLAB/Simulink, que é executado no computador de controle. O sinal de controle gerado pelo computador é enviado para a saída da placa de aquisição (conversão DA). Este sinal, já na forma analógica, é amplificado para a faixa de operação da microgarra

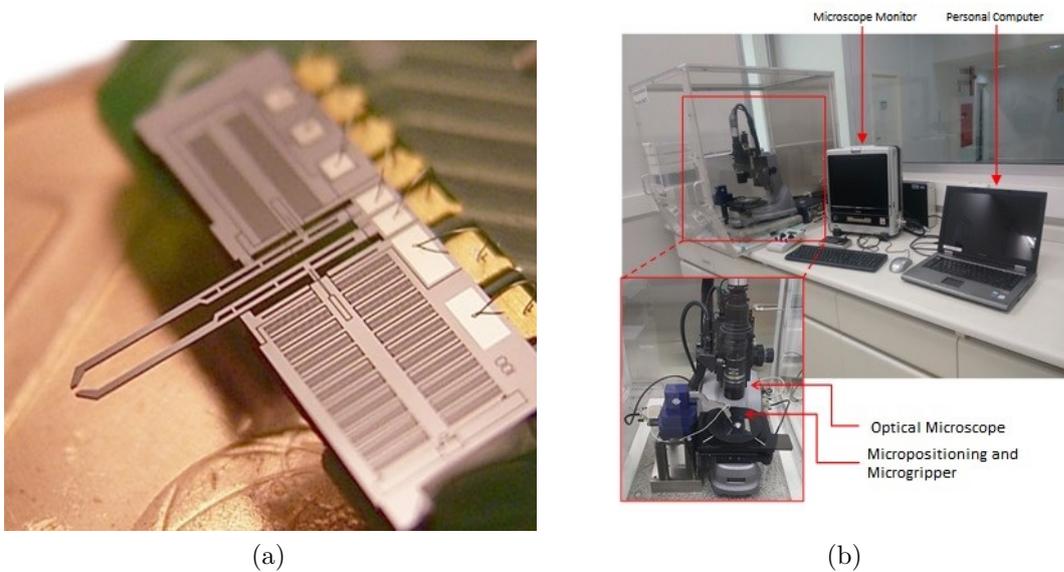


Figura 1 – (a) Microgarra eletrostática FT-G100 *FemtoTools*[®] (b) Aparato experimental: microgarra, microscópio e computador de controle.

(de 0 a 120 V), que por fim é ligado nessa, fechando-se a malha de controle de força. Para garantir que tudo funcione em tempo real, será usado a extensão do MATLAB conhecida como Real-Time Windows Target (RTWT).

Este trabalho está dividido da seguinte forma: No capítulo 2, faz-se uma descrição detalhada do sistema a ser controlado. No capítulo 3, apresenta-se a identificação do sistema, que consiste na obtenção do modelo matemático necessário ao projeto dos controladores. No capítulo 4, apresentam-se os projetos dos controladores, bem como as simulações realizadas com os modelos lineares controlados. Por fim, no capítulo 5, apresentam-se conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Descrição do Sistema

A microgarra eletrostática a ser controlada (controle de força) é apresentada, de outro ponto de vista, na Fig. 2a. Como já foi dito, ela é o modelo FT-G32 da FemtoTools[®] GmbH, que tem capacidade de manipular microobjetos de 1 a 30 μm , com limite máximo de força igual a 120 μN . Na Fig. 2b, pode-se ver a microgarra pronta para agarrar uma micropartícula de 27.47 μm . Esta foto foi obtida pelo microscópio do aparato conforme mostrado na Fig. 1b, e o seu tamanho foi estimado por um programa de processamento de imagem, que considera a partícula como se fosse uma esfera e calcula o seu diâmetro.

Um controlador de força em malha fechada que seja eficiente deve ser preciso, ou seja, ter erro estacionário pequeno ou nulo, de forma que a força aplicada ao se agarrar a micropartícula seja exatamente a força desejada (força de referência). Para se projetar este controlador, é necessário analisar as propriedades físicas do sistema a fim de obter um modelo matemático que o represente. Este modelo deve relacionar a tensão aplicada na entrada da microgarra (tensão aplicada no pente capacitores) com a força exercida pela microgarra na micropartícula.

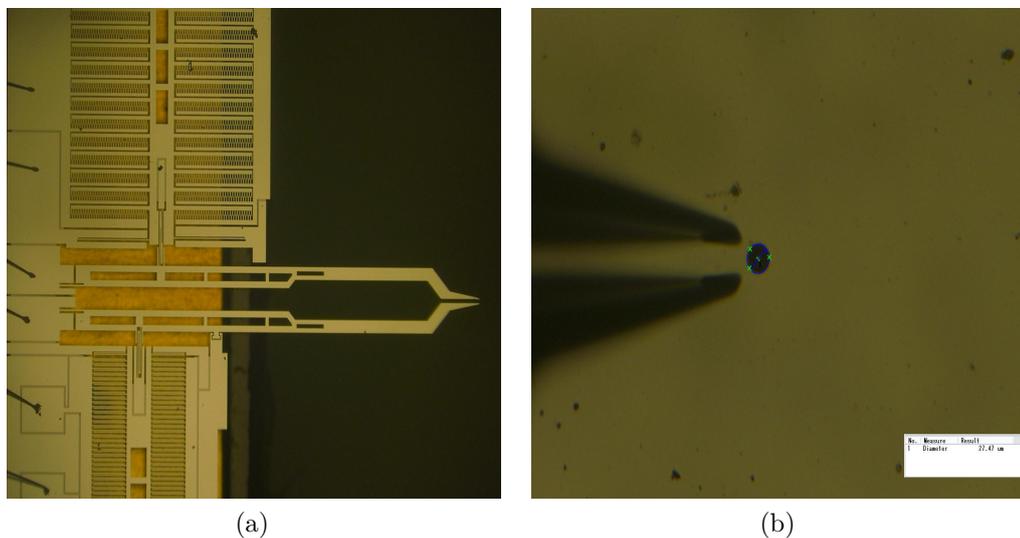


Figura 2 – (a) Microgarra eletrostática FT-G100 FemtoTools[®] (b) Foto da microgarra e uma partícula teste.

Existem diversas bibliografias que descrevem as propriedades físicas da interação entre as hastes da microgarra com a micropartícula, bem como a interação entre as hastes e os pentes de capacitores (*comb drives*), que transformam a energia elétrica em uma força mecânica. A bibliografia mais interessante para este trabalho é o artigo (BOUDAUD; HADDAB; GORREC, 2013). Neste trabalho, as hastes da microgarra são modeladas como rígidas, com uma certa elasticidade e amortecimento (ou seja, são consideradas, cada uma,

como um sistema massa-mola-amortecedor). A micropartícula é considerada como uma simples mola, conforme mostrado na Fig. 3.

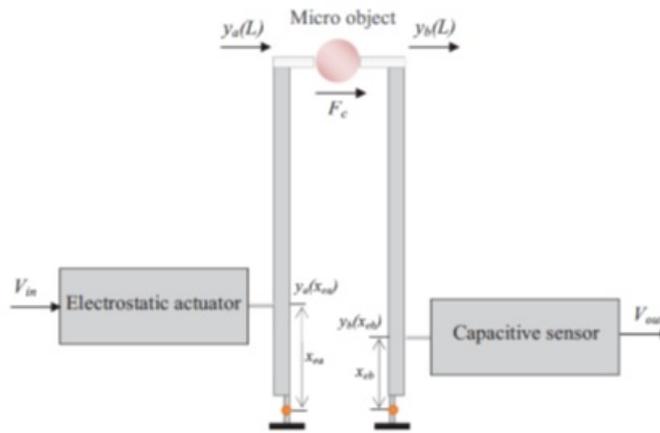


Figura 3 – Representação da microgarra + micropartícula

Nesta figura, a haste da esquerda representa a haste atuadora, enquanto a haste da direita representa a haste sensora. O modelo apresentado no artigo, entretanto, não contém todos os parâmetros (os autores omitem alguns deles). De modo que não podemos usá-lo completamente para o projeto de nossos controladores, mas somente com um guia para os projetos. Há duas formas clássicas de se levantar modelos matemáticos: 1) *método fenomenológico*, que consiste em se escrever as equações diferenciais do sistema (através da aplicação das leis da física) e; 2) *identificação de sistemas*, que consiste em se assumir um tipo de modelo para o sistema (normalmente um sistema linear e invariante no tempo, juntamente com a sua ordem, ou seja, o número de pólos) e se encontrar os coeficientes do modelo de forma experimental, usando métodos de ajuste dos modelos aos dados coletados experimentalmente. No método fenomenológico, obtêm-se os parâmetros por diversos métodos, como por exemplo (BOUDAUD; HADDAB; GORREC, 2013), onde utilizam-se instrumentos sofisticados, tais como interferômetros (não disponíveis pelo IPT ou EPUSP). No método de identificação de sistemas (LJUNG, 2007), que será o método utilizado neste trabalho, aplicam-se sinais de entrada (no caso, tensões na microgarra) e coleta-se as correspondentes saídas ao longo do tempo (no caso, os sinais de força na micropartícula, medidos pela haste sensora). Aplicam-se então as técnicas de identificação de sistemas para ajustar o modelo matemático aos dados de entrada e saída coletados, de modo que os coeficientes são obtidos sem se utilizar instrumentos sofisticados (de fato, só o aparato já existente para fazer o controle é suficiente).

2.1 Modelo Matemático do Sistema

Conforme mencionado, o modelo utilizado neste trabalho é inspirado no modelo apresentado em (BOUDAUD; HADDAB; GORREC, 2013), que descreve a microgarra

eletrostática de mesmo modelo e fabricante utilizado nesse projeto, a FT-G100 fabricado pela FemtoTools GmbH. Entretanto, alguns parâmetros foram omitidos pelos autores, de modo que não conseguimos reproduzir exatamente o mesmo modelo. O modelo discretizado, que o autor apresenta, não serve para nosso propósito, uma vez que ele foi discretizado para uma frequência de amostragem diferente da que será utilizada em nosso trabalho. Além disso, a microgarra que é utilizada neste artigo consegue agarrar partícula com até $100 \mu\text{m}$ de diâmetro, enquanto que a que iremos utilizar somente consegue agarrar partículas com até $30 \mu\text{m}$, de modo que os parâmetros tendem a ser diferentes (KHEIR, 1988) (BOSCH; KLAUW, 1994).

Este modelo considera uma entrada de tensão na microgarra, que causa o fechamento das hastes sobre o microobjeto, causando uma força neste. Este modelo considera que a microgarra estará em contato com o microelemento, mas terá força nula como estado inicial. Tornando o deslocamento da ponta da haste atuante irrelevante para o projeto do controlador. O modelo é não-linear, de modo que é necessário linearizar este modelo. O ponto de linearização é a posição no qual as hastes da microgarra estão em contato com o microelemento sem exercer força sobre ele, como dito acima. A este ponto de linearização corresponde uma tensão aplicada à garra. Esta tensão, então, se torna a tensão inicial do sistema. No caso do artigo do (BOUDAOU; HADDAB; GORREC, 2013) a tensão inicial é dada por $V_{in_0} = 60\text{V}$. Nosso valor, a princípio, pode ser diferente (os parâmetros mudam dependendo da tensão de linearização). Cada haste e seu pente de capacitores foi, respectivamente, modelado como uma haste rígida, que é equivalente a um sistema massa-mola-amortecedor. O microelemento agarrado, que por enquanto se trata de uma microbola de estanho, é modelado por uma mola. O modelo matemático em espaço de estados é dado então por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{X}}_a \\ \dot{\tilde{X}}_b \end{bmatrix} &= A_{coup} \begin{bmatrix} \tilde{X}_a \\ \tilde{X}_b \end{bmatrix} + B_{coup} \tilde{V}_{in}, \\ F_c &= C_{coup} \begin{bmatrix} \tilde{X}_a \\ \tilde{X}_b \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{2.1}$$

onde A_{coup} , B_{coup} e C_{coup} são matrizes de dimensões apropriadas dadas por:

$$A_{coup} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{la} + \left(\frac{L}{x_{ea}}\right)^2 k_0}{M_a} & -\frac{\sigma_a}{M_a} & \frac{\left(\frac{L}{x_{ea}}\right)^2 k_0}{M_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\left(\frac{L}{x_{eb}}\right)^2 k_0}{M_b} & 0 & \frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}}\right)^2 k_0}{M_b} & -\frac{\sigma_b}{M_b} \end{bmatrix},$$

$$B_{coup} = \left[0 \quad \left(\frac{L}{x_{ea}}\right) \frac{N_a \epsilon h_z}{g M_a} V_{in_0} \quad 0 \quad 0 \right]^T,$$

$$C_{coup} = \left[k_0 \quad 0 \quad -k_0 \quad 0 \right],$$

Os parâmetros das equações acima estão na tabela 1, bem como o seu valor numérico (BOUDAUD; HADDAB; GORREC, 2013).

Símbolo	Valor	Unidade de Medida	Significado
ϵ	8.85	ρF	Permissividade do material dielétrico (Ar)
σ_a	-	-	Coefficiente de amortecimento do componente atuador
σ_b	0.71	$mN*s^2/m$	Coefficiente de amortecimento do componente sensor
g	6	μm	Distância entre os dentes do pente de capacitores
h_z	50	μm	Espeesura do dente do pente de capacitores
k_0	175.5	N/m	Rigidez do microobjeto
K_{la}	37.55	N/m	Rigidez do componente atuador
K_{lb}	$2.9546 * 10^7$	N/m	Rigidez do componente sensor
L	5150	μm	Comprimento das hastes
M_a	-	-	Massa do componente atuador
M_b	0.66	mg	Massa do componente sensor
N_a	1300	-	Número total de dentes do pente de capacitores
V_{in_0}	60	V	Tensão de linearização
x_{ea}	1100	μm	Distância entre o ponto no qual a força eletrostática atua na haste atuadora e o seu ponto de articulação
x_{eb}	850	μm	Distância entre o ponto no qual a haste atua no dispositivo pente de capacitores e o ponto de articulação da haste sensora

Tabela 1 – Valores dos Parâmetros do modelo

Note que os valores de M_a e σ_a não são apresentados no artigo em questão. Entretanto no artigo (BOUDAUD et al., 2014), que utiliza o mesmo dispositivo, descreve o parâmetro $M_a = 3.9843 * 10^{-8} Kg$.

O modelo de (BOUDAOU et al., 2014) já discretizado, a uma frequência de amostragem de 20kHz, é dado por:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= AX(k) + BV_{in}(k), \\ F_c(k) &= CX(k), \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde as matrizes são:

$$A = \begin{bmatrix} 0.8334 & 0.5196 & 0 & 0 \\ -0.5196 & 0.8334 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8348 & 0.5325 \\ 0 & 0 & -0.5325 & 0.8348 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.1935 \\ 0.3787 \\ 0.1540 \\ 0.5294 \end{bmatrix},$$

$$C = [0.3779 \quad 0.4192 \quad 0.6764 \quad 0.0229] 10^{-6},$$

O modelo numérico acima apresentado foi simulado no software Matlab/Simulink em malha aberta, de forma a poder se obter sua resposta. O diagrama de blocos desta simulação segue abaixo:

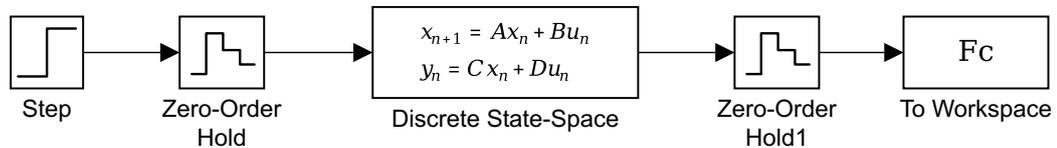


Figura 4 – Diagrama de Blocos

O bloco *Discrete State-Space* inclui as matrizes da equação em espaços de estados numérico A , B e C . Um degrau unitário acionou a planta em $t = 1s$, cuja resposta apresentada na Fig. 5. Nota-se que a resposta é pouco amortecida. O tempo para as oscilações amortecerem é em torno de $20,0 \mu s$.

Conforme dito, apesar da existência do modelo completo em tempo discreto no artigo, não é possível utilizá-lo para outra microgarra ou para outro microelemento sem uma nova

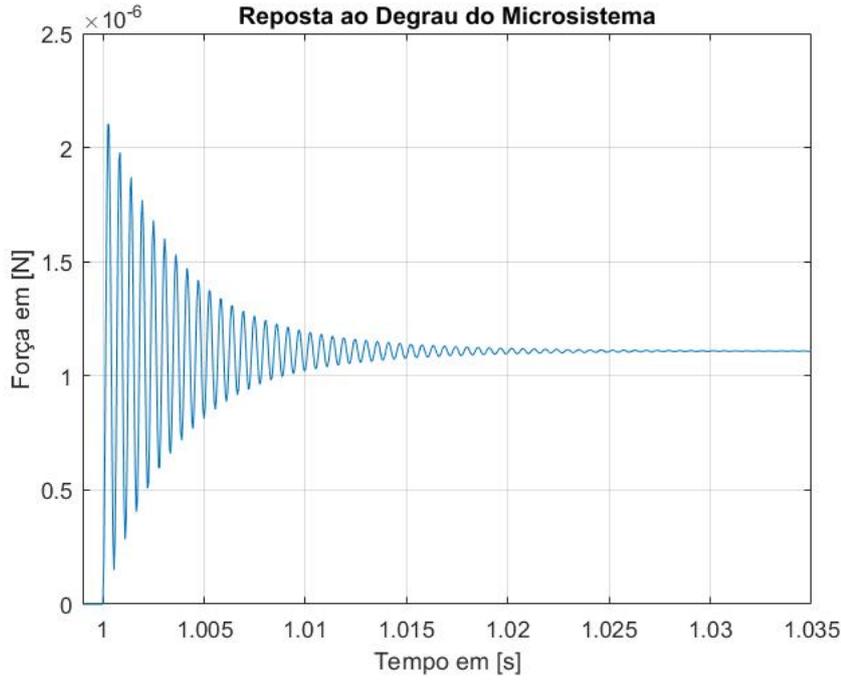


Figura 5 – Resposta ao Degrau

identificação, já que não há uma totalidade de exposição dos parâmetros do modelo. Além disso, as micropartículas manipuladas, a princípio, são diferentes.

Entretanto, para que possamos fazer uma análise mais adequada do sistema, vamos calcular a função de transferência para o modelo na Eq. 2.1. Aplicando-se a fórmula de transformação do sistema na forma de espaço de estados para a forma de função de transferência, tem-se:

$$G(s) = C_{coup}(Is - A_{coup})^{-1}B_{coup} \quad (2.3)$$

O qual $(Is - A_{coup})^{-1}$ é:

$$\frac{1}{\det(Is - A_{coup})} \text{adj}(Is - A_{coup}) \quad (2.4)$$

Sendo:

$$(Is - A_{coup}) = \begin{bmatrix} s & -1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{la} + \left(\frac{L}{x_{ea}}\right)^2 k_0}{M_a} & s + \frac{\sigma_a}{M_a} & -\frac{\left(\frac{L}{x_{ea}}\right)^2 k_0}{M_a} & 0 \\ 0 & 0 & s & -1 \\ -\frac{\left(\frac{L}{x_{eb}}\right)^2 k_0}{M_b} & 0 & -\frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}}\right)^2 k_0}{M_b} & s + \frac{\sigma_b}{M_b} \end{bmatrix}$$

O determinante pode ser calculado por:

$$\det(Is - A_{coup}) = s^2 \left(s + \frac{\sigma_a}{M_a} \right) \left(s + \frac{\sigma_b}{M_b} \right) + \frac{\left(\frac{L}{x_{ea}} \right)^2 k_0 \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_a M_b} + \frac{K_{la} + \left(\frac{L}{x_{ea}} \right)^2 k_0}{M_a} \frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} \quad (2.5)$$

Enquanto que o Adjunto é dado por:

$$\text{adj}(Is - A_{coup}) = C^T = ((-1)^{i+j} M_{ij})_{1 \leq i, j \leq 4}^T \quad (2.6)$$

O qual:

$$C^T = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} & c_{41} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} & c_{42} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{43} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

E:

$$C_{coup} \text{adj}(Is - A_{coup}) B_{coup} = (k_0 c_{21} - k_0 c_{23}) \left(\frac{L}{x_{ea}} \right) \frac{N_a \epsilon h_z}{g M_a} V_{in_0} \quad (2.8)$$

Os quais c_{21} e c_{23} são:

$$c_{21} = ((-1)^{2+1} M_{21}) = (-1) \det \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ 0 & -\frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} & s + \frac{\sigma_b}{M_b} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$c_{23} = ((-1)^{2+3} M_{23}) = (-1) \det \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -\frac{\left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} & 0 & s + \frac{\sigma_b}{M_b} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Que portanto são:

$$c_{21} = s \left(s + \frac{\sigma_b}{M_b} \right) - \frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} \quad (2.11)$$

$$c_{23} = \frac{\left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} \quad (2.12)$$

Dessa forma temos que:

$$G(s) = \frac{\left(k_0 \left(s \left(s + \frac{\sigma_b}{M_b} \right) - \frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} \right) - k_0 \left(\frac{\left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} \right) \right) \left(\frac{L}{x_{ea}} \right) \frac{N_a \epsilon h_z}{g M_a} V_{in_0}}{s^2 \left(s + \frac{\sigma_a}{M_a} \right) \left(s + \frac{\sigma_b}{M_b} \right) + \frac{\left(\frac{L}{x_{ea}} \right)^2 k_0 \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_a M_b} + \frac{K_{la} + \left(\frac{L}{x_{ea}} \right)^2 k_0}{M_a} \frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b}} \quad (2.13)$$

Fazendo a distribuição e separando o ganho, temos:

$$G(s) = \frac{k_0 \left(\frac{L}{x_{ea}} \right) \frac{N_a \epsilon h_z}{g M_a} V_{in0} \left(s^2 + \frac{\sigma_b}{M_b} s - \frac{K_{lb} + 2 \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} \right)}{s^4 + \left(\frac{\sigma_a}{M_a} + \frac{\sigma_b}{M_b} \right) s^3 + \frac{\sigma_a \sigma_b}{M_a M_b} s^2 + \frac{\left(\frac{L}{x_{ea}} \right)^2 k_0}{M_a} \frac{\left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b} + \frac{K_{la} + \left(\frac{L}{x_{ea}} \right)^2 k_0}{M_a} \frac{K_{lb} + \left(\frac{L}{x_{eb}} \right)^2 k_0}{M_b}} \quad (2.14)$$

As seguintes conclusões podem ser tiradas desta função de transferência:

1. O polinômio do denominador tem grau quatro, o que significa que o sistema é de ordem quatro (quatro pólos).
2. Como todos os parâmetros são positivos, vê-se que os coeficientes do polinômio do denominador são positivos, o que significa, pelo critério de estabilidade de Routh-Hurwitz, que o sistema é estável em malha aberta. Tal fato é esperado devido à natureza do sistema
3. O polinômio do numerador tem grau dois, o que significa que o sistema possui dois zeros.
4. Pelo fato de um dos coeficientes do numerador ser sempre negativo e o outro sempre positivo, então uma das raízes (zeros) da função de transferência está no semi-plano direito, o que significa que o sistema é de fase não-mínima. De fato, esta propriedade é sempre verificada na prática, como será visto mais adiante.

3 Identificação de Modelos para o Sistema

Identificação de Sistemas é um conjunto de técnicas que consiste em aplicar sinais de entrada adequados ao sistema que se deseja identificar, coletar as respectivas saídas, e correlacioná-las de forma a se obter o modelo que melhor se ajusta a esses dados. Ou seja, deseja-se obter o sistema que, dadas as entradas, fornece saídas que são as mais próximas possíveis às obtidas, de acordo com uma certa métrica (em geral, mínimos quadrados). Deve-se escolher uma classe de modelos e a ordem desses modelos. Os coeficientes desses modelos (que são funções de transferência) são então determinados por um algoritmo numérico. Cada coeficiente determinado com uma certa precisão (faixa de valores e correspondente confiança desta faixa). Em geral, estes modelos já são em tempo discreto, já que o procedimento de identificação é realizado em computador (LJUNG, 2007), (SÖDERSTRÖM; STOICA, 1988)(ASCHEPKOV et al., 2016). Para se obter um modelo razoável pelo método de identificação de sistemas, três fatores são essenciais: sinal de entrada adequado, frequência de amostragem razoável e aquisição de dados adequada.

3.1 Sinal de Entrada

O sinal de entrada deve ser escolhido adequadamente de forma a excitar todos os modos naturais do sistema, de forma que a correspondente saída contenha uma quantidade adequada de informação. A partir desta informação, que está contida na saída, é possível encontrar o melhor valor para os parâmetros do modelo. O sinal de entrada deve ter algumas características que facilitem a identificação, tornando a reação do modelo linear ajustado, o mais próximo possível do que é adquirido no sistema real (HOF; BOMBOIS; COURSE, 2004). Este sinal de entrada não pode ser constante, já que não se obtém informação sobre as dinâmicas do sistema neste caso, somente a estática. O sinal de entrada deve ser *persistentemente excitante* para se obter informação a respeito da dinâmica do sistema (HOF; BOMBOIS; COURSE, 2004). Geralmente é utilizado um sinal com espectro de frequência amplo para garantir excitação suficiente sobre o sistema, com amplitude limitada e periódico (LJUNG, 2007) (HOF; BOMBOIS; COURSE, 2004). Um desses tipos de sinais é o chamado de *Random Binary Signal* (RBS) que tem a característica de espectro de um ruído branco, sendo um sinal binário e de amplitude limitada. Entretanto, o sinal RBS é difícil de gerar por existir a possibilidade do espectro ser modificado quando o ruído branco for filtrado para se tornar um sinal periódico (LJUNG, 2007) (HOF; BOMBOIS; COURSE, 2004), além do fato de os números aleatórios puros serem difíceis de gerar em computador.

Como alternativa existe o *Pseudo-Random Binary Signal* (PRBS), que possui as características necessárias acima citadas e é facilmente reproduzido como é exemplificado

em (SÖDERSTRÖM; STOICA, 1988). Utilizando períodos inteiros e completos, tem-se vantagens em aplicar o PRBS, como o fato da matriz de covariância do sinal poder ser invertida analiticamente (LJUNG, 2007).

3.2 Tipos de Modelos Abordados

Como foi dito, identificar um modelo consiste em determinar os parâmetros que melhor se ajustam aos dados de entrada e saída. Entretanto, existem diversas classes de modelos que interpretam de maneira diversa a relação entre sistema e ruído.

3.2.1 Modelo ARMAX

O modelo ARMAX, que significa *Autoregressive–moving-average with exogenous inputs model* é um dos mais utilizados na prática. Eles consistem de uma equação de diferenças do tipo:

$$y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_ny(k-n) = b_1u(k-1) + \dots + b_mu(k-m) + e(k) + c_1e(k-1) + \dots + c_pe(k-p) \quad (3.1)$$

onde $y(k)$ é a saída no instante atual, $u(k)$ e a entrada no instante atual e $e(k)$ é o ruído no instante atual (assumido como sendo branco e gaussiano). Aplicando-se a transformada Z na Eq. 3.1, tem-se:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})e(k) \quad (3.2)$$

sendo que $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$ é um polinômio de ordem n , $B(z^{-1}) = b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$ é um polinômio de ordem m e $C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_pz^{-p}$ é um polinômio de ordem p . Vale sempre que $n \geq m$ e $n \geq p$. O processo de identificação consiste em aplicar um sinal PRBS $u(k)$, coletar a correspondente saída $y(k)$ e determinar o vetor de parâmetros $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m, c_1, \dots, c_p$ que melhor se ajustam ao sinal de saída $y(k)$ coletado, segundo um critério de mínimos quadrados (SÖDERSTRÖM; STOICA, 1988).

3.2.2 Modelo OE

O modelo OE (Output Error) pode ser escrito na forma:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}u(k) + e(k)$$

onde $B(z^{-1}) = b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$ e $F(z^{-1}) = 1 + f_1z^{-1} + \dots + f_qz^{-q}$. Este modelo é equivalente a dizer que o erro (ruído branco gaussiano) ocorre diretamente na saída, tal como se fosse um erro de medida (LJUNG, 2001)

3.2.3 Modelo BJ

O modelo BJ (Box-Jenkins) tem uma estrutura diferente dos modelos anteriores, uma vez que:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}u(t) + \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})}e(k) \quad (3.3)$$

onde $B(z^{-1}) = b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$, $F(z^{-1}) = 1 + f_1z^{-1} + \dots + f_qz^{-q}$, $C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_pz^{-p}$ e $D(z^{-1}) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_rz^{-r}$.

Neste caso, há uma separação completa entre o modelo para o ruído e outro para o sistema, tornando a identificação mais robusta em baixas frequências (LJUNG, 2001). Note que os pólos do modelo ARMAX para o ruído são os mesmos que para o modelo do sistema, enquanto que para o modelo BJ, eles são independentes.

Serão aplicados sinais PRBS na entrada do sistema e coletadas as correspondentes saídas. Para os dados coletados, serão ajustados modelos dos três tipos, como será visto mais adiante.

3.3 Instrumentação

A microgarra eletrostática modelo da FT-G32, que tem uma abertura máxima de $30\mu\text{m}$, tensão máxima aplicada à entrada de 110V, tensão de suprimento do sensor de 5V e ganho de $25.97\mu\text{N/V}$, possui um módulo auxiliar proprietário que realiza tanto a amplificação do sinal de tensão a ser mandado para a microgarra, quanto a conversão DA deste sinal, e a conversão AD do sinal vindo da haste sensora (capacitivo). O sinal amostrado e quantizado do sensor é então processado por software (baseado em LabView) e exibido na IHM (interface Homem-Máquina) do sistema, no computador de controle. Este sistema baseado em LabView, entretanto, é completamente inadequado para os propósitos deste trabalho, pelas seguintes razões:

1. O software de processamento em LabView não é garantidamente de tempo real, o que pode introduzir atrasos nos sinais, isto é, na sequência de pontos que corresponde à saída, podem ser introduzidos pontos a mais, o que prejudicaria a identificação.
2. Não se sabe se existe algum processamento (filtragem) do sinal do sensor, tanto por hardware quanto por software. Como se trata de propriedade industrial, a FemtoTools não revela se há filtros após o sensor (e mesmo que houvesse, não revelaria a sua função de transferência).

Para contornar estas dificuldades (BOUDAUD et al., 2014) , a solução encontrada foi desenvolver um kit que consiste de cabos e uma placa de distribuição de sinais analógicos. O sinal que vem da haste sensora pode ser então enviado para um osciloscópio em vez de diretamente para o computador/controlador. O cabo que liga a placa ao osciloscópio tem uma ponta BNC. O osciloscópio é o modelo DSOX 1102G fabricado pela Keysight Technologies, com uma frequência de amostragem máxima de 2GSa/s. Porém, a parte da amplificação do sinal de entrada não foi alterada (continua sendo pelo módulo auxiliar fornecido pela FemtoTools). É importante continuar utilizando ainda esta parte original do sistema, pois ela conta com um software que limita tensão máxima e que trava, se necessário, os movimentos da microgarra quando há excesso de força aplicado sobre a haste sensora.

A geração do sinal PRBS utilizado para identificação do sistema é gerado no software LabView, de modo que não há sincronia entre a leitura e a geração de sinal. Para o osciloscópio ler os dados amostrados e gravá-los é necessário a utilização de um *trigger*, o qual em alguns momentos perde informação, motivo que nos leva a execução do procedimento repetidas vezes. Essa gravação dos dados pelo osciloscópio é efetuada particionando os dados, limitando as frequências de amostragens a valores específicos, tais como 19.2 kHz, 38.5 kHz etc.

3.4 Planejamento dos Experimentos de Identificação

Conforme foi dito anteriormente, o modelo matemático deve sempre incluir o microobjeto que está sendo manipulado. Este microobjeto será considerado, para efeitos de modelagem, como se fosse uma mola, ou seja, possui uma rigidez k_0 . Para realizar o experimento, microobjetos na faixa de 20 a 100 μm foram fabricados no laboratório de micromanufatura do IPT. Foi feita então uma amostra com este material e colocado sob a lente do microscópio (a olho nú, este material se parece com uma poeira), de modo que possa ser manipulado e observado pela microgarra e pelo microscópio, respectivamente.

3.4.1 Procedimento

O experimento de identificação consiste então dos seguintes passos:

1. Busca, com o microscópio, de uma partícula com diâmetro menor que 30 μm (um software de processamento de imagem é utilizado para calcular aproximadamente este diâmetro);
2. Posicionamento da microgarra na posição (x, y, z) onde se encontra o microobjeto. A microgarra está afixada na ponta de um robô de alta precisão, que é controlado por um operador;

3. A micropartícula deve ser agarrada sem se aplicar inicialmente uma força significativa. Nesta etapa, se a microgarra for fechada muito acima ou abaixo do equador da micropartícula, pode ser que essa simplesmente escape, e o processo tenha que ser repetido;
4. Uma vez que a partícula esteja agarrada, ela é elevada para uma posição segura, e o sinal PRBS de entrada na microgarra é aplicado. O osciloscópio é então acionado para coletar o sinal do sensor de força (na verdade, o que o sensor fornece é uma tensão proporcional à força), sendo então transferido por um *pendrive* para o computador com MATLAB;
5. Realiza-se o procedimento de identificação com o conjunto de dados coletados do osciloscópio, obtendo-se então um modelo ARMAX, um OE e um BJ;

3.4.2 Cuidados adicionais necessários

O processo de posicionamento da microgarra é bastante delicado e demorado, pois além de movê-la para as coordenadas (x, y) onde está a micropartícula, é necessário levá-la ao nível onde está o equador da partícula (coordenada z). Ao se aproximar deste nível, o operador deve redobrar o cuidado, para evitar que a microgarra encoste na base de vidro, danificando-a. De fato, algumas microgarras foram perdidas até se adquirir a perícia necessária (vide Fig. 2b).

As micropartículas que foram utilizadas, que tinham diâmetro menor que $30 \mu\text{m}$, foram difíceis de encontrar na amostra. O processo de fabricação destas produz uma grande dispersão nos diâmetros. A busca teve que ser feita com auxílio do microscópio e do software de processamento de imagens, o que também é um processo demorado.

Conforme foi dito anteriormente, as forças eletrostáticas de Van der Waals (dentre outras) são significativas nesta escala, de modo que muitas das micropartículas com este diâmetro estavam *coladas* em outras. Não foi possível portanto utilizar estas partículas, pois não tínhamos um método para separá-las. A amostra de partículas, por conta disso, foi pequena.

Por fim, a poeira presente no ambiente também causou dificuldades, pois partículas desta poderiam se depositar nos pentes de capacitores, conforme mostrado na Fig. 2a (o que chegou a acontecer durante os experimentos). O ambiente ideal para realizar estes experimentos é a *sala limpa*. Entretanto, o laboratório de micromanufatura do IPT ainda está construindo tal sala, de modo que procurou-se isolar a microgarra em uma caixa de acrílico para evitar a deposição de poeira.

3.4.3 Obtenção do Modelo com Incertezas para 19,0 kHz

Embora uma mesma microgarra possa ser usada um grande número de vezes nas aplicações (por conta de sua durabilidade), os microobjetos manipulados sempre serão diferentes. Conforme visto no modelo matemático base apresentado na Eq. 2.1, para cada microobjeto diferente, o valor do parâmetro k_0 pode variar. Deste modo, o modelo matemático deve poder conter incertezas em alguns parâmetros. Para chegar a estes modelo, serão feitos diferentes experimentos de identificação para a microgarra segurando diferentes microobjetos. Além disso, os pontos de contato entre a microgarra e o microobjeto podem mudar cada vez que se fizer esta manipulação, já que não há como garantir, mesmo com o auxílio do microscópio, onde serão estes pontos de contato. Em algumas vezes, pode ocorrer que o agarramento se dê exatamente no equador. Em outras, pode ser que se dê em algum paralelo acima ou abaixo. Deste modo, o experimento de identificação será repetido várias vezes para uma mesma micropartícula. Em suma, se forem selecionadas N partículas, para cada uma o procedimento da subseção 3.4.1 será repetido M vezes, o que significa um número total de $N.M$ experimentos. Todo este processo é bastante demorado, durando várias semanas. Os passos de 1 a 4 são feitos no laboratório, todos de uma vez. Após isso, o passo 5 é feito para todos os $N.M$ conjuntos de dados, já que esse passo só utiliza um computador com MATLAB.

Para cada um dos $N.M$ experimentos, obtemos um modelo ARMAX, um OE e um BJ, na forma de funções de transferência. Para facilitar o trabalho, adotamos uma notação mnemônica para os diversos modelos:

$$G \begin{array}{c} \text{tipo} \\ \downarrow \\ \text{arm} \\ \text{oe} \\ \text{bj} \end{array} \begin{array}{c} i \\ \downarrow \\ p \\ a \\ r \\ t \\ i \\ c \\ u \\ l \\ a \end{array} \begin{array}{c} j \\ \downarrow \\ t \\ e \\ s \\ t \\ e \end{array} (z) \quad (3.4)$$

A seguir, apresentam-se os resultados experimentais da identificação dos modelos.

3.5 Resultados da Identificação para 19,0 kHz

A seguir, apresentam-se os resultados do processo de identificação de sistemas para uma frequência de amostragem de $\omega_s = 19,0\text{kHz}$. Devido à dificuldade de se obter amostras de micropartículas com diâmetro menor que $30 \mu\text{m}$, foram utilizadas quatro micropartículas, conforme a Tab. 2.

Partícula	Diâmetro
1	27.08 μm
2	27.79 μm
3	25.04 μm
4	25.83 μm

Tabela 2 – Diâmetros das micropartículas utilizadas

Para considerar no modelo as incertezas oriundas dos pontos de agarramento (acima ou abaixo do equador), o procedimento experimental descrito na seção 3.4.1 foi repetido cinco vezes para as partículas um e dois, e três vezes para as partículas três e quatro, o que totaliza dezesseis experimentos. Para cada experimento, foram levantados um modelo ARMAX, um OE e um BJ.

Na Fig. 6, tem-se um exemplo do sinal PRBS aplicado na entrada da microgarra (em cima) e a respectiva resposta a este sinal, coletada no sensor de força da microgarra (embaixo).

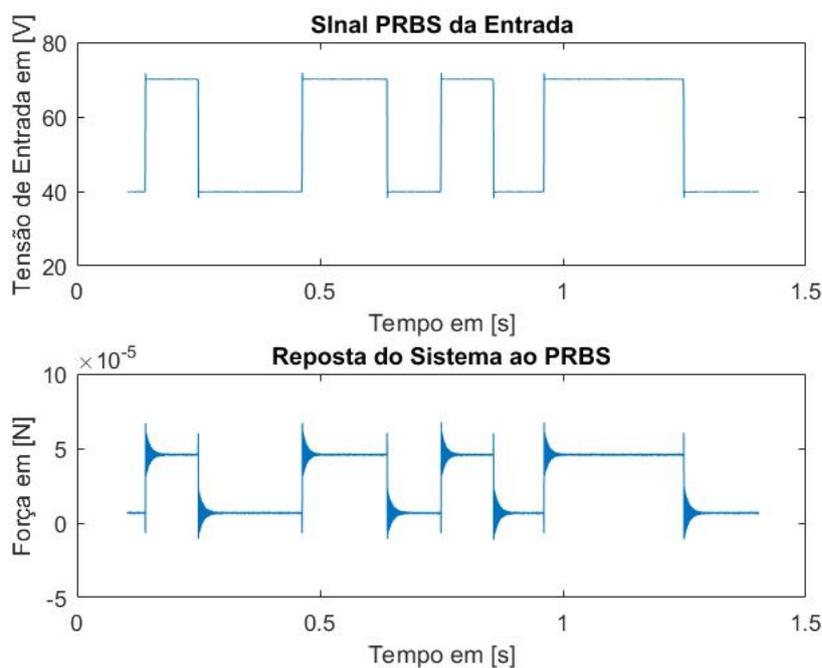


Figura 6 – Sinal PRBS adquirido pelo osciloscópio

Foram utilizadas funções do System Identification Toolbox do MATLAB para ajustar os modelos aos dados (sinais de entrada PRBS e respectivas forças geradas), onde o método de ajuste foi o mínimos quadrados. Deste modo, foram dezesseis aplicações das funções da toolbox. Em cada uma, e para cada modelo, as funções fornecem um conjunto de coeficientes das funções de transferência ajustadas. Na Eq. 3.5, tem-se uma função de transferência obtida, já respeitando a nomenclatura definida na Eq. 3.4. Trata-se de um

modelo Box-Jenkins correspondente ao primeiro experimento com a partícula dois.

$$G_{bj21}(z) = \frac{-0.04809z^3 + 0.1134z^2 - 0.07951z + 0.01934}{z^4 - 2.051z^3 + 1.257z^2 + 0.1561z - 0.2604} \quad (3.5)$$

Para cada modelo ajustado, registrou-se um índice de ajuste (índice FIT) fornecido pelas funções da System Identification Toolbox. Cada coeficiente da função de transferência está em uma faixa de valores do tipo $[c_{\min}, c_{\max}]$. O índice FIT indica a probabilidade dos coeficientes reais estarem dentro das faixas fornecidas. Portanto, um índice próximo de 100%, associado a faixas de valores de parâmetros estreitas, isto é $|c_{\max} - c_{\min}|$ pequeno, indica uma grande confiabilidade que o modelo ajustado seja bem representativo do sistema real.

3.5.1 Modelos ARMAX obtidos

Conforme foi dito, foram obtidos dezesseis modelo ARMAX, cada um correspondente a uma função de transferência tal como a apresentada na Eq. 3.5. Na Fig. 7, apresentam-se os diagramas de Bode para essas dezesseis funções de transferência, juntamente com os índices FIT. Nota-se que existe uma grande dispersão dos ganhos dos modelos nas baixas frequências. O pico de ressonância, em torno da frequência 10000 rad/s , aparece em todos os modelos, pois é a característica dinâmica mais marcante do sistema microgarra + microobjeto. Apesar dessas diferenças nas baixas frequências, os índices FIT são todos acima de 90%.

3.5.2 Modelos OE obtidos

Foram obtidos também dezesseis modelos Output Error, cujos diagramas de Bode são apresentados na Fig. 8. Também se nota uma grande dispersão nos ganhos para baixa frequência, e um pico de ressonância em torno da mesma frequência dos modelos ARMAX. Os índices FIT, entretanto, ficaram mais baixos que no caso do ARMAX, o que indica uma menor adequação deste tipo de modelo aos dados coletados.

3.5.3 Modelos BJ obtidos

Novamente, foram obtidos dezesseis modelos do tipo Box-Jenkins, cujos diagramas de Bode são apresentados na Fig. 9. Todos os dezesseis modelos tiveram um ganho muito próximo em baixas frequências, bem como praticamente a mesma frequência e altura do pico de ressonância. Há uma dispersão em altas frequências, o que é esperado em todo modelo identificado. Além disso, os índices FIT dos modelos ficaram todos acima de 94 %, que foram os melhores de todos. Deste modo, o modelo Box-Jenkins é o tipo mais adequado para a aplicação em questão.

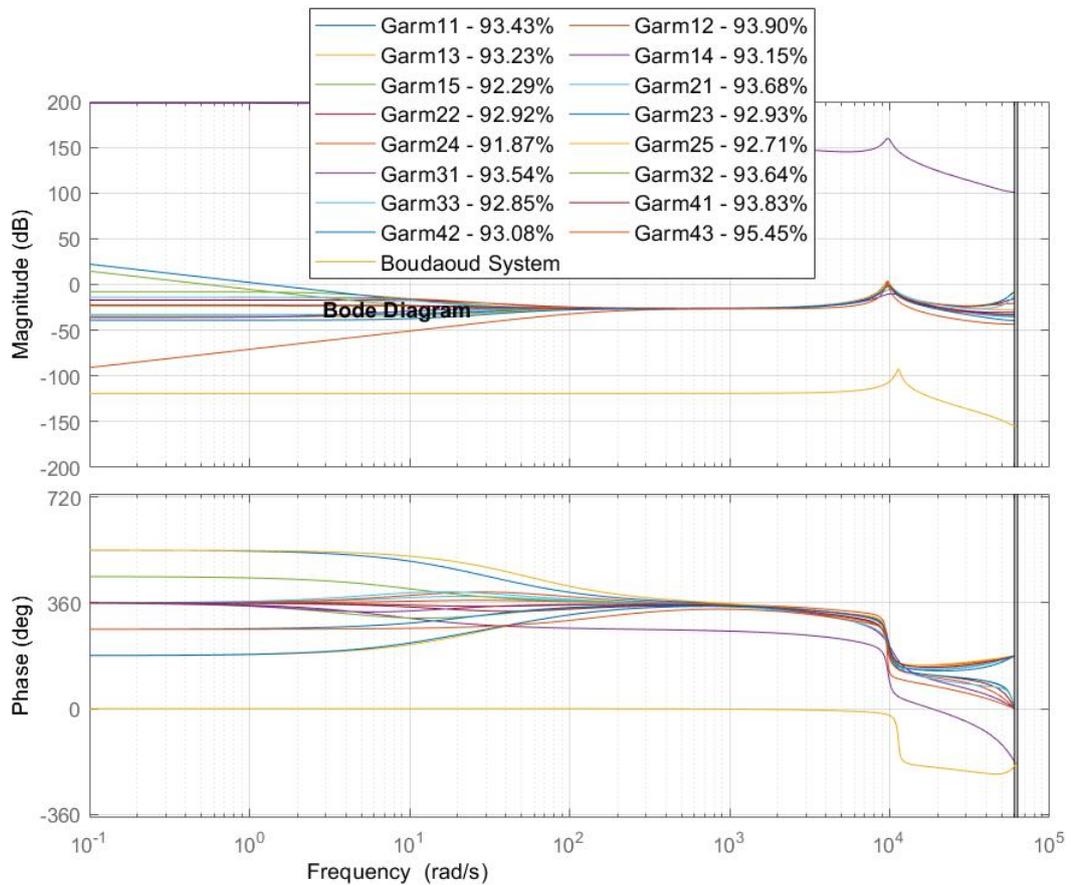


Figura 7 – Comparação entre os experimentos para o método ARMAX no diagrama de bode

A razão dos modelos tipo BJ serem os mais adequados neste caso pode ser verificada pela análise dos modelos na seção 3.2. Primeiramente, o modelo OE assume que todo que o ruído, que é branco e gaussiano, está presente saída do sistema, tal como se toda a fonte de incerteza fosse em erro de medida do sensor. Já o modelo ARMAX assume que o ruído adicionado à saída é colorido, isto é, filtrado de alguma forma. Entretanto, os pólos desse filtro seriam os mesmos da função de transferência que relaciona a entrada com a saída do sistema. Isto significa que o ruído presente nos dados é como e fosse um ruído branco filtrado pela própria planta (ruído de processo). Como os modelos ARMAX ficaram com uma significativa dispersão após a identificação, isso indica que esse tipo de modelo não é o melhor para os dados disponíveis. Já os modelos BJ, onde as funções de transferência entre entrada e saída e ruído branco e saída podem ser completamente diferentes, foram os que forneceram os melhores resultados (melhores ajustes aos dados). Isto indica que a natureza do ruído no sistema da microgarra, que é colorido, provem de outra fonte que não as perturbações na microgarra, nem tampouco o ruído de medida é dominante. Provavelmente são perturbações vindas de forças dominantes no ambiente microscópico, ou de vibrações vindas do ambiente.

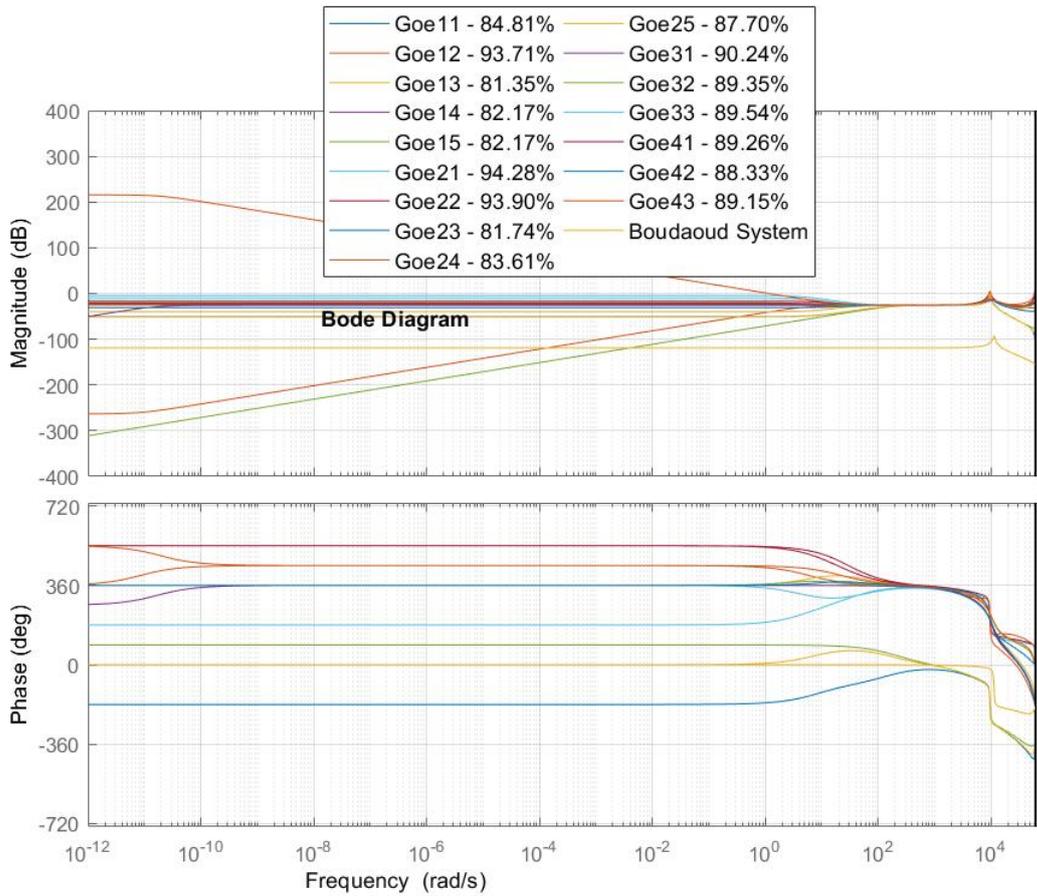


Figura 8 – Comparação entre os experimentos para o método OE no diagrama de bode

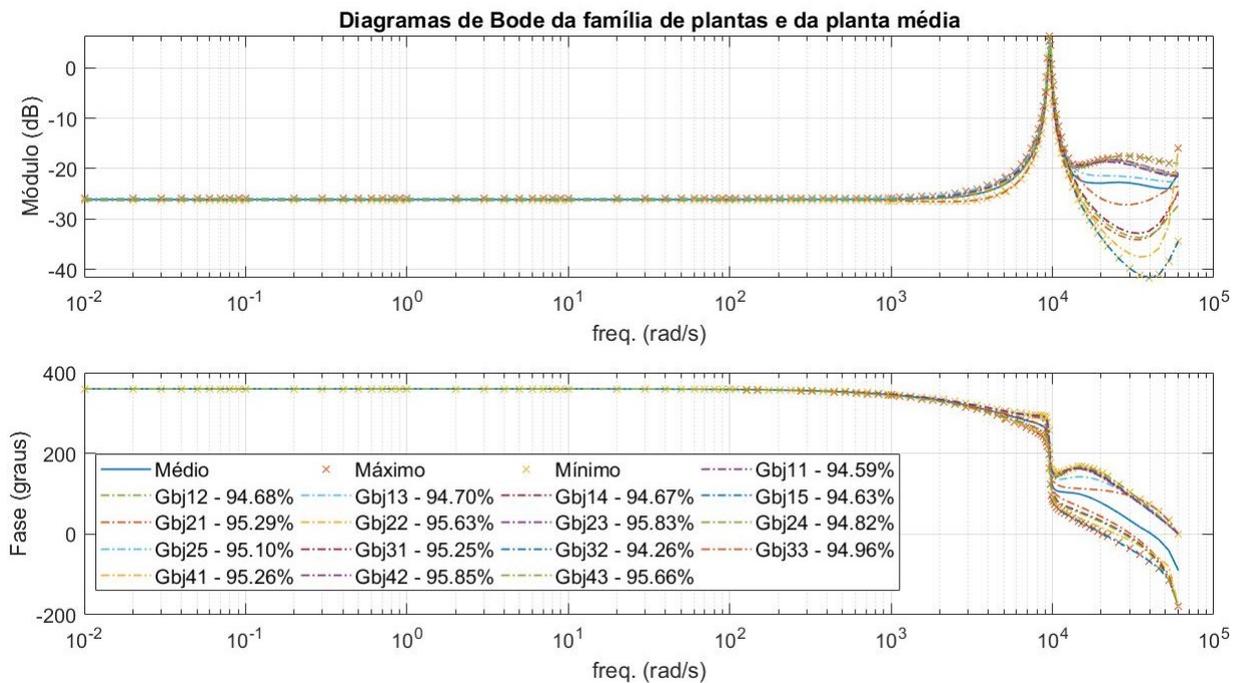


Figura 9 – Comparação entre os experimentos para o método BJ no diagrama de bode com Máximo, Mínimo e Médio

Importante ressaltar que os modelos BJ apresentam várias características já verificadas em (BOUDAUD; HADDAB; GORREC, 2013), tal como erro estacionário não nulo e frequência de ressonância muito próxima da deste trabalho, o que indica que nosso modelo está bastante coerente (apesar de haver pequenas diferenças entre nossa microgarra e aquela usada no referido artigo). Na Fig. 10, apresenta-se o diagrama de pólos e zeros para todos os modelo BJ. Nota-se que todos estes modelos são de fase não-mínima (para todo modelo há zero fora do círculo unitário), o que confirma a predição da Eq. 2.14. Os pólos e os zeros sofre uma pequena dispersão, mas agrupam-se em *clusters*, tal como deve ocorrer em famílias de plantas.

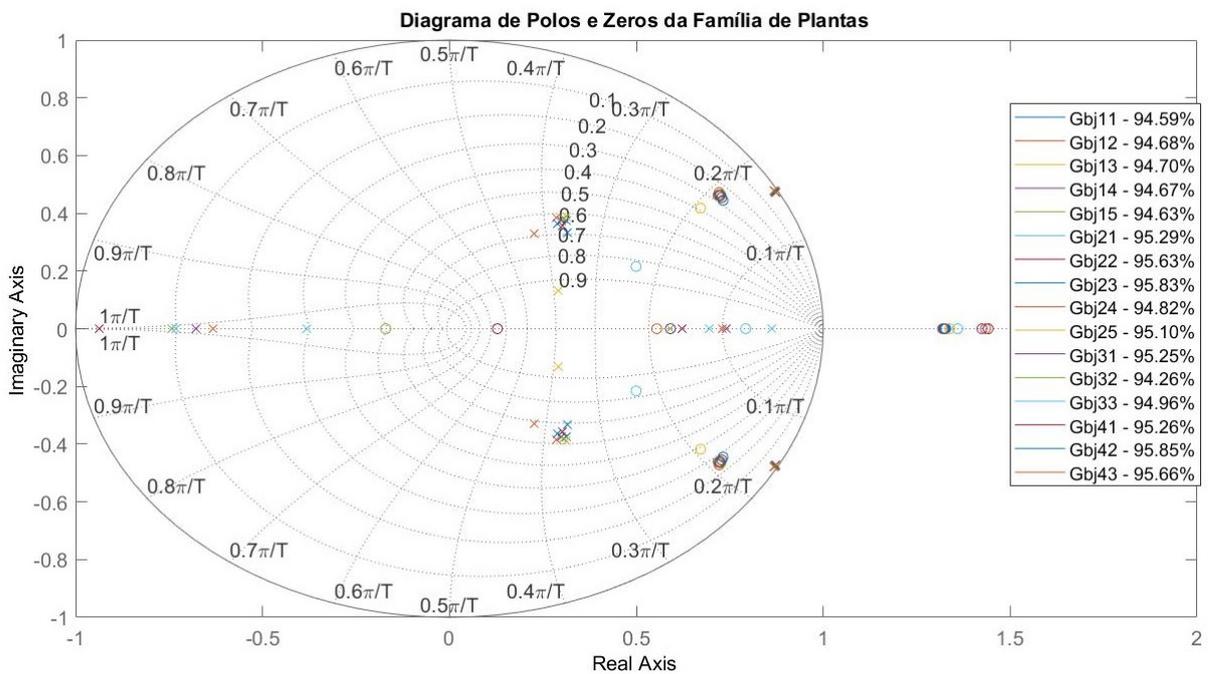


Figura 10 – Comparação entre os experimentos para o método BJ no diagrama de pólos e zeros

3.6 Obtenção da Família de Plantas

Considerando que: 1) se deseja manipular partículas de diferentes tamanhos, e como estas influenciam o modelo do sistema, e; 2) não se sabe exatamente em que ponto a partícula será agarrada, é interessante projetar um controlador de força que tenha estabilidade e um bom desempenho para todas estas situações. Para se conseguir isto, tem-se que projetar o controlador (que é único) tal que para toda a família de modelos obtidos nas seções anteriores, a estabilidade seja garantida, assim como bom desempenho. Uma ferramenta importante de projeto é a chamada *planta ou modelo médio*, que é obtido segundo o seguinte procedimento:

1. Para um conjunto de frequências dentro de uma faixa (de 10^{-2} rad/s a 10^5 rad/s), determinam-se os valores máximo e mínimo de módulo e fase dos diagramas de Bode de todos os dezesseis modelos;
2. Calculam-se os valores médios de módulo e fase para cada frequência, como sendo o valor máximo mais o valor mínimo dividido por dois.

Na Fig. 9, para o modelo BJ, tem-se que o modelo médio corresponde às linhas contínuas de módulo e fase, enquanto que os modelos identificados (membros da família) estão em linha tracejada. Entretanto, para que possamos aplicar as técnicas de Controle Robusto, tais como o LQG/LTR, apresentado em (CRUZ, 1996), e o H_∞ , apresentado em (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007), é necessário estimar uma função de transferência média, o que não é imediato dado somente o diagrama de Bode médio (obtido acima). Seria necessário ajustar uma função de transferência a esse diagrama de Bode (com a mesma ordem que os outros membros da família). Para tanto, seria necessário aplicar métodos numéricos extremamente custosos computacionalmente. Nas tentativas que realizamos, não conseguimos encontrar uma função que se ajustasse ao diagrama de Bode, pois os computadores que possuímos não têm a quantidade de memória suficiente, segundo a rotina do MATLAB que realiza este ajuste. Optamos então por escolher uma função de transferência da família (a que mais se aproximasse da média) e adotá-la para efeito de projeto. A que melhor se aproxima é o modelo da micropartícula 2 teste 1:

$$G_{bj21} = \frac{-0.04809z^3 + 0.1134z^2 - 0.07951z + 0.01934}{z^4 - 2.051z^3 + 1.257z^2 + 0.1561z - 0.2604} \quad (3.6)$$

que já foi apresentada anteriormente. No próximo capítulo, apresentam-se diversos projetos de controladores robustos de complexidade crescente, bem algumas simulações para a família de plantas escolhida.

4 Projeto dos Controladores Robustos

Neste capítulo, apresentamos o projeto de alguns controladores robustos para o controle de força da microgarra. Todos serão em tempo discreto, já prontos para serem implementados em computador, com uma frequência de amostragem $\omega_s = 19,0$ kHz, que foi a frequência utilizada na obtenção dos modelos por identificação de sistemas. Para dar uma ideia do funcionamento do controlador, observemos a Fig. 11. A variável que queremos controlar, que no caso é a força aplicada pela microgarra na micropartícula, é representada pela saída. Esta é medida pelo sensor de força (uma das hastes da microgarra), que adiciona ruído e erros (não intencionais) na medição. A força (saída) é um sinal gerado pela planta, que corresponde à microgarra com a micropartícula, e o seu modelo matemático (família de modelos) foi determinado no capítulo anterior. O sinal de controle aplicado à planta é a tensão aplicada na microgarra, que é gerada pelo controlador. Por fim, todos os efeitos ambientais, e que afetam o funcionamento da microgarra, são representados pelas perturbações. A princípio, as perturbações não são mensuráveis e nem controláveis. Um bom controlador robusto deve, entretanto, atenuar seus efeitos na força sobre a micropartícula.

O controlador sempre toma suas decisões (isto é, calcula o valor do sinal de controle aplicado na planta), em tempo real, baseado no valor do sinal de erro. Este sinal corresponde à diferença entre o sinal de referência (no caso, a força que se deseja que a microgarra aplique na micropartícula) e o sinal (força) medida pelo sensor. Para efeito de projeto matemático do controlador, assumiremos que esse é representado por uma função de transferência fixa $H(z)$ ou $K(z)$, enquanto que a família de modelos identificados no capítulo anterior é representada pela função de transferência incerta $G(z)$. Isso significa que estamos assumindo que os modelos são todos lineares e invariantes no tempo (SLIT), ainda que alguns deles tenham parâmetros incertos.

Como todo projeto de controlador, é necessário o uso do modelo matemático da planta $G(z)$, e já que desejamos que ele funcione bem para toda uma faixa de valores de diâmetro de micropartícula, iremos fazer os projetos olhando sempre para toda a família de modelos obtida na seção anterior. Assim, esse controlador também deverá funcionar bem mesmo se a micropartícula for agarrada em pontos diferentes (um pouco acima ou um pouco abaixo do equador). Na Fig. 12, tem-se o mesmo diagrama de blocos da Fig. 11, mas agora com representação matemática (onde se lê s na figura, leia-se z).

Considerando $F(z) \equiv 1$ (ou seja, que o sensor não tem dinâmica, pois é muito rápido), tem-se que a saída $Y(z)$ pode ser relacionada com as entradas $R(z)$ (transformada Z da referência, ou força desejada), $D(z)$ (perturbações) e $N(z)$ (ruído de medida) conforme a

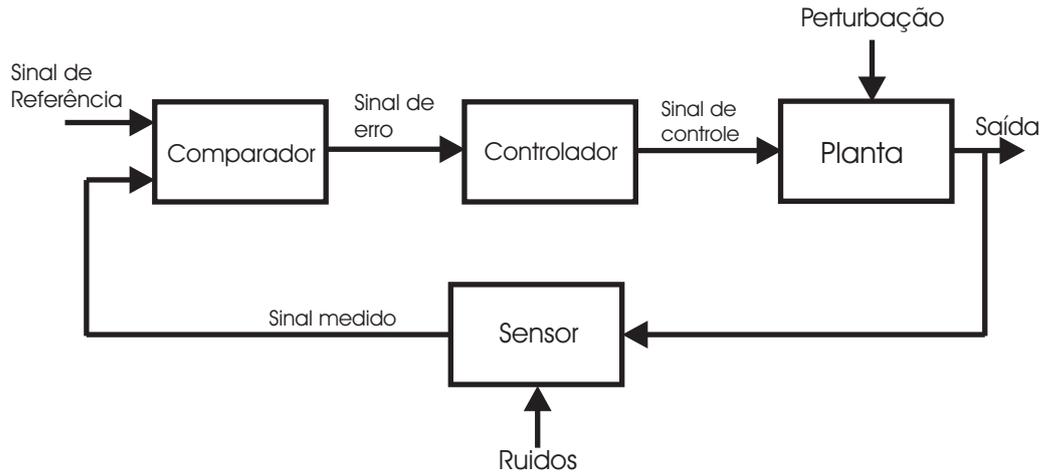


Figura 11 – Diagrama de Blocos do Sistema de Controle de Força

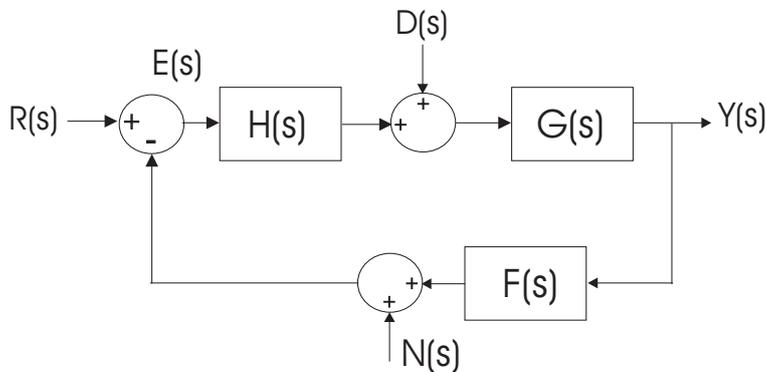


Figura 12 – Diagrama de Blocos de um SLIT Malha Fechada

Eq. 4.1:

$$Y(z) = \underbrace{\frac{G(z)H(z)}{1 + G(z)H(z)}}_{T(z)} R(z) + \underbrace{\frac{G(z)}{1 + G(z)H(z)}}_{G(z)S(z)} D(z) - \frac{G(z)H(z)}{1 + G(z)H(z)} N(z) \quad (4.1)$$

onde $T(z)$ é conhecida como *função sensibilidade complementar* e $S(z) = (1 + G(z)H(z))^{-1}$ é conhecida como *função sensibilidade*. Tem-se que sempre $S(z) + T(z) = 1$. Como dito anteriormente, este sistema é não linear (BOUDAUD et al., 2014). Entretanto, na faixa de operação em torno de 55 V (na faixa de 40 a 70 V aproximadamente) os modelos lineares e invariantes no tempo obtidos são uma boa aproximação. Inicialmente, iremos seguir a metodologia clássica de projeto, que costuma fornecer os controladores de menor ordem. Isto é desejado uma vez que quanto menor a ordem, mais simples é a implementação do controlador, ou seja, menor é o tempo de computação em tempo real necessário entre cada instante de amostragem.

Os três primeiros controladores projetados são: 1) Proporcional 2) Atraso de Fase e 3) Fase Não-Mínima com Integrador. Para esses três, segue-se aqui a metodologia clássica de projeto, que é bem explicada em (OGATA, 1987). Nesta metodologia, podemos

trabalhar diretamente com a família de modelos obtidos no capítulo anterior (capítulo 3). Já o quarto e último controlador é projetado usando-se a metodologia de controle robusto H_∞ (H infinito), que é apresentado na seção 4.4. Neste último, precisamos de um modelo/planta médio na forma de função de transferência (também obtido na seção anterior) e representações matemáticas das incertezas.

4.1 Projeto de Controlador Robusto Proporcional: Método Clássico

Todo projeto clássico de controlador em malha fechada, no método de Resposta em Frequência, começa com a análise do efeito do fechamento da malha para controlador unitário, ou seja, $H(z) = 1$. Na Fig. 13 estão os diagrama de Nyquist de todos modelos identificados, com controlador unitário, no qual podemos ver que todos são instáveis em malha fechada, pois envolvem duas vezes, no sentido horário, o ponto $-1 + 0j$ do plano complexo.

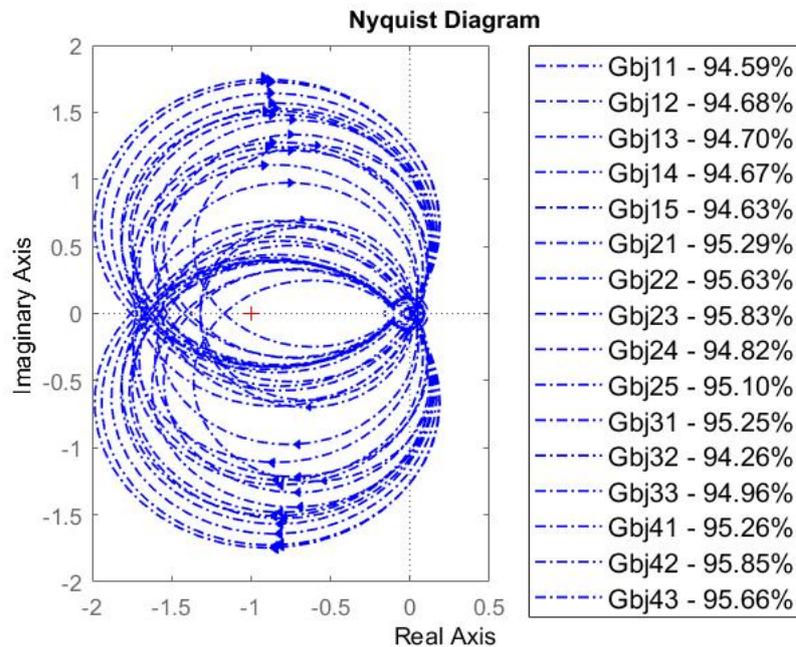


Figura 13 – Diagrama de nyquist dos modelos Box jenkins

Com um pouco de prática na metodologia clássica, entretanto, é possível visualizar o que se precisa fazer para se obter um controlador proporcional que estabilize o sistema para a família de plantas.

4.1.1 Projeto do controlador proporcional

A melhor solução para este tipo de controlador é inverter a fase em 180° (já que o sistema é de fase não-mínima). Deste modo, vamos buscar um controlador da forma $H(z) = -K$, onde a constante K será determinada como resultado do processo de projeto. Na Fig. 14, temos os diagramas de Nyquist para diferentes valores de K . O maior valor para garantir robustez de estabilidade é $K = 7$. Para valores maiores, o sistema em malha fechada pode ficar instável para pelo menos uma das plantas da família. Como se trata de um sistema de tipo zero, isto é a função de transferência em malha aberta $G(z)H(z)$ não possui integradores, o erro estacionário é tanto menor quanto maior for K . Os diagramas de Bode, em malha aberta e em malha fechada são apresentados na Fig. 15. Vê-se claramente que a altura do pico de ressonância é reduzida em malha fechada, o que significa que, ao se aplicar uma referência de força tipo degrau, o sobressinal será menor do que sem o controlador (ou seja, em malha aberta). Devido ao ganho ser negativo (em dB) as baixas frequências (na verdade, o melhor nome para isso é *atenuação*), então o erro estacionário será não nulo.

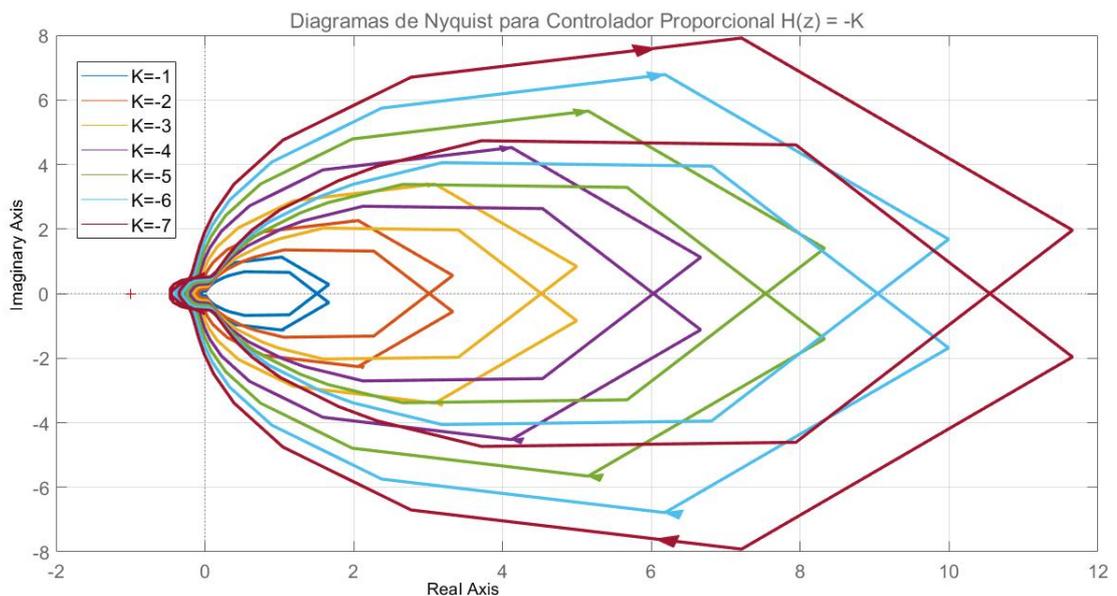


Figura 14 – Diagramas de Nyquist para Controlador Proporcional $H(z) = -K$.

4.1.2 Simulações com o controlador proporcional

Foram feitas simulações do sistema em malha fechada para uma referência de força do tipo degrau unitário, conforme apresentado na Fig. 16. Nota-se claramente que, se compararmos com a Fig. 6, que o sobressinal é bem menor porcentualmente. O valor final (isto é, estacionário) é, entretanto, bem menor que um (em torno de 45 % menor) o que indica que, qualquer que seja a força que pedirmos que a microgarra aplique, com

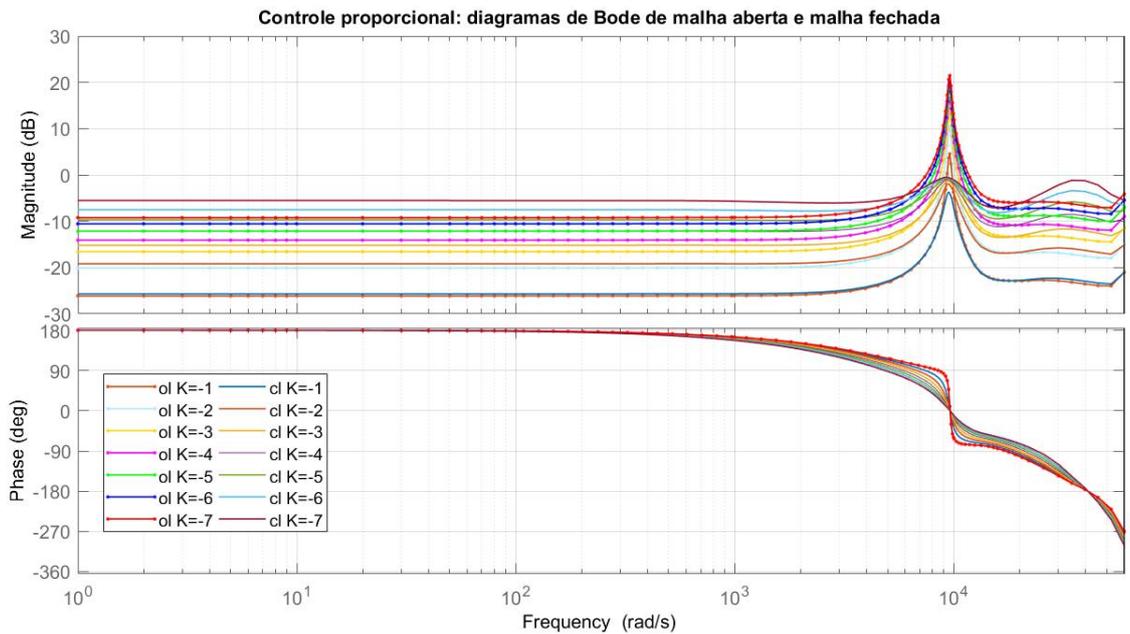


Figura 15 – Diagramas de Bode para Controlador Proporcional $H(z) = -K$: ol = malha aberta, cl = malha fechada

este controlador, será 45% menor que a desejada. A tensão que o controlador aplica na entrada da microgarra, para o degrau de um Volt na saída (a leitura do sensor é de um Volt, proporcional à força), é apresentado na Fig. 17.

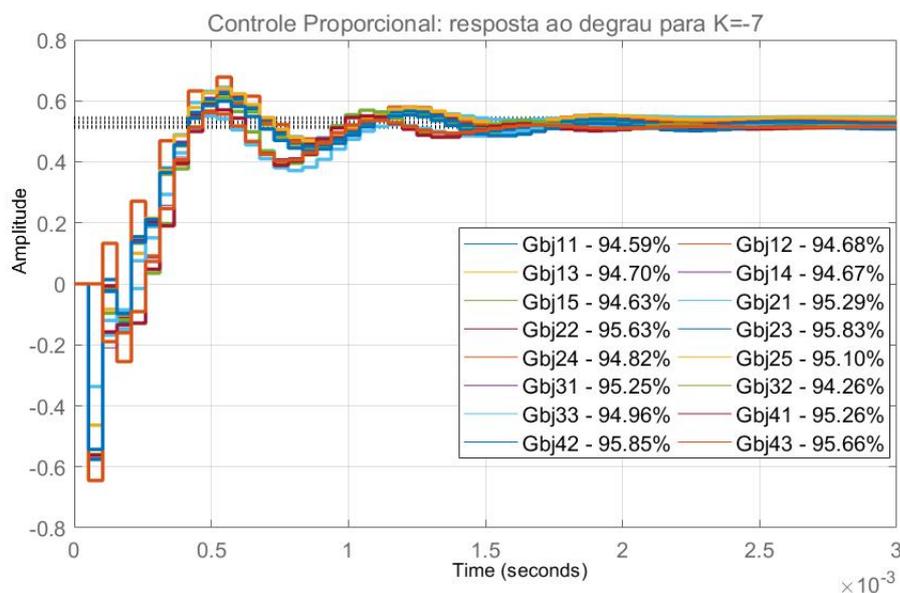


Figura 16 – Resposta ao degrau unitário para o controlador $H(z) = -K$.

Conclui-se que o controlador proporcional projetado, que é $H(z) = -7$, é robusto (ou seja, tem robustez de estabilidade e desempenho). Entretanto, o desempenho não está bom devido ao erro estacionário de em torno de 45% para a família de plantas. Para tentar

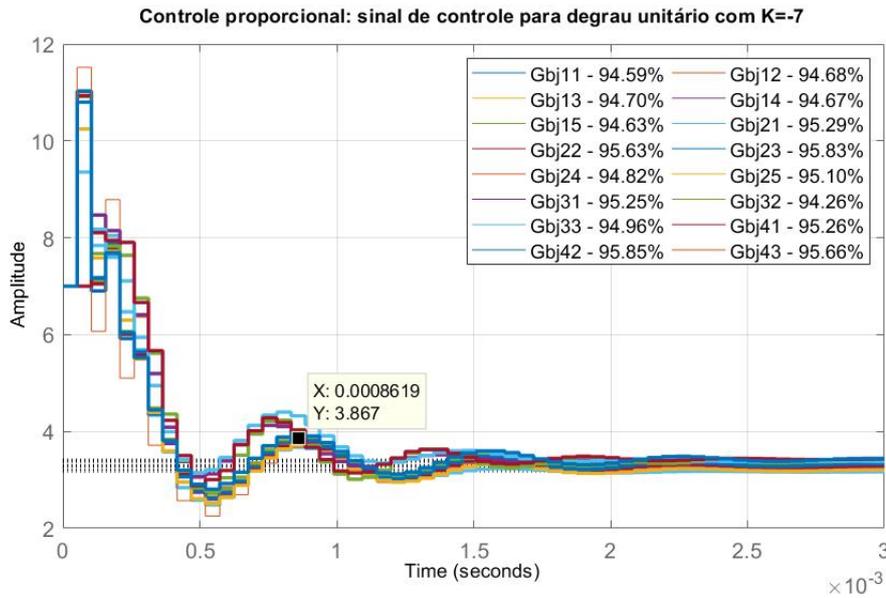


Figura 17 – Sinal de controle para degrau de entrada: $H(z) = -K$.

melhorar este desempenho, vamos projetar um controlador que sabidamente diminui o erro estacionário, ao custo de o sistema ficar mais lento, que é o controlador por atraso de fase.

4.2 Controlador de Atraso de Fase

O controlador por atraso de fase tem a função de transferência da forma:

$$H(z) = -K \frac{z + a}{z + b}$$

onde o pólo em b deve estar mais próximo do círculo unitário. O sinal negativo é necessário, como no caso do controlador proporcional, pelo fato da planta ser de fase não-mínima. Neste controlador, três parâmetros precisam ser ajustados. Para ter o melhor efeito, escolhemos $b = -0.9$ e $a = 0.9$, o que significa que o pólo está próximo de um. Para escolher o valor adequado de ganho K , fizemos uma busca de $K = 0.05$ a $K = 0.5$, como pode ser visto na Fig. 18. O menor valor que garante robustez de estabilidade (isto é, para todos os elementos da família de modelos) é $K = 0.5$ (valores maiores foram tentados, porém não se conseguiu robustez). O polo e o zero podem também ser mudados se necessário. Foram feitas simulações para resposta ao degrau unitário. Na Fig. 19 tem-se os diagramas de Bode de malha aberta e de malha fechada para os diferentes valores de K . O que se nota é que para valores mais próximos de $K = 0.5$, tem-se que o ganho em malha fechada em baixas frequências fica próximo de $0dB$, o que significa que o erro estacionário é próximo de zero para o modelo médio.

Na Fig. 20, tem-se a resposta ao degrau unitário, com o ganho $K = 0.5$, para os diferentes modelos da família. Para algumas delas, o controlador produz uma resposta

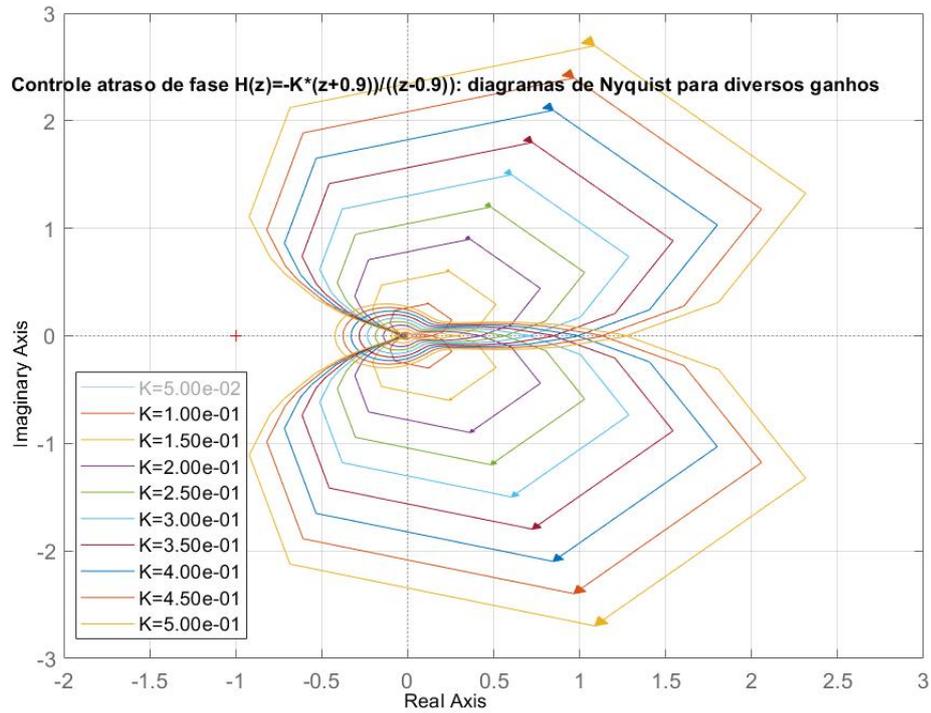


Figura 18 – Diagramas de Nyquist para Controlador Atraso de Fase: $H(z) = -K \frac{z+0.9}{z-0.9}$.

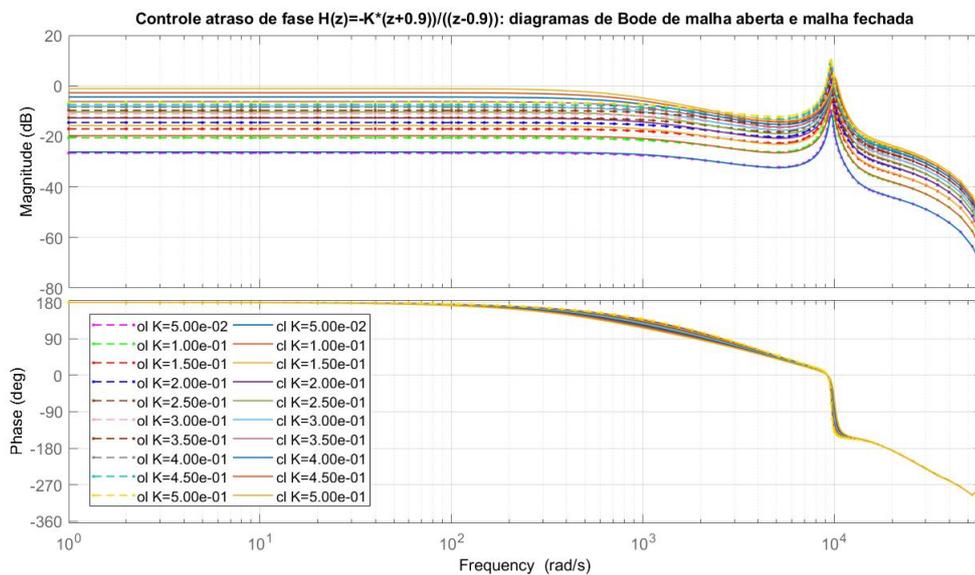


Figura 19 – Diagramas de Bode de Malha Aberta e Malha Fechada para Controlador Atraso de Fase: $H(z) = -K \frac{z+0.9}{z-0.9}$.

lenta e pouco amortecida, com erro estacionário maior. Para outras, a resposta é mais rápida e com bastante amortecimento. Na Fig. 21, tem-se o correspondente sinal de controle para cada modelo. Em comparação com os resultados obtidos com o controlador

proporcional, o que se nota é que o erro estacionário pode ser reduzido a 10 % na média, enquanto que o preço a pagar é que algumas respostas (para alguns modelos) podem ficar até 10 vezes mais lentos. Os sinais de controle também ficam em média duas vezes menores, com menos risco de se atingir a saturação (que vai depender do circuito eletrônico amplificador a ser projetado futuramente).

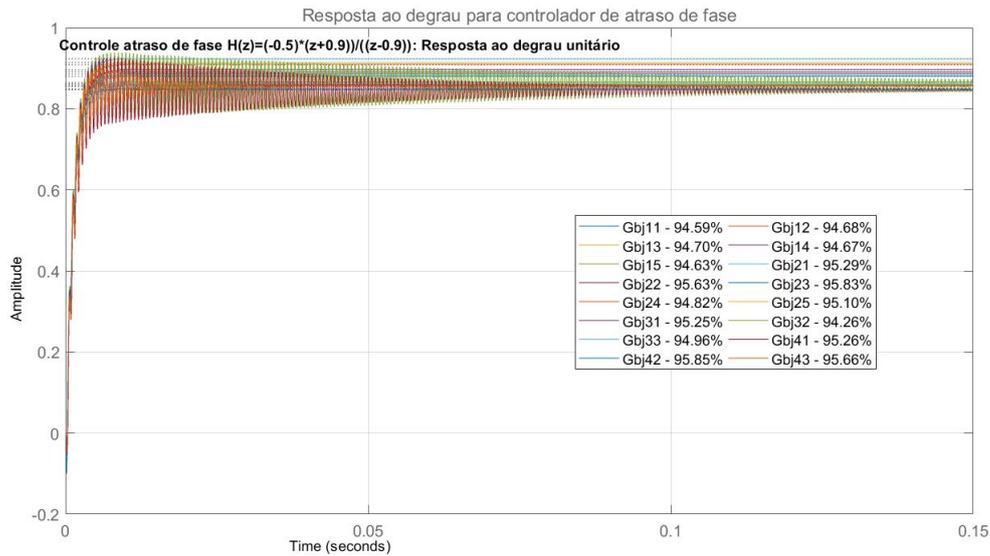


Figura 20 – Resposta ao Degrau Unitário para: $H(z) = -0.5 \frac{z+0.9}{z-0.9}$.

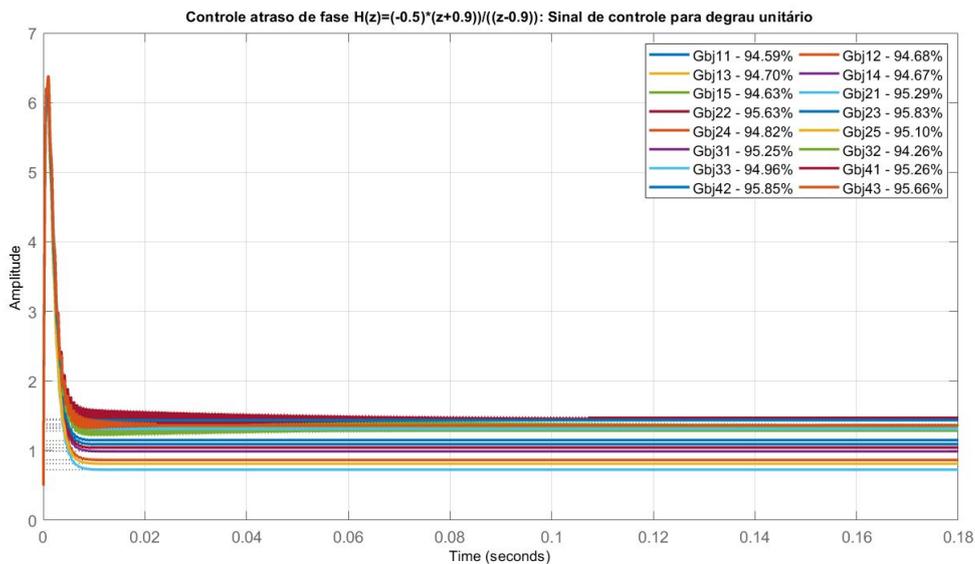


Figura 21 – Sinal de Controle para Degrau Unitário para: $H(z) = -0.5 \frac{z+0.9}{z-0.9}$.

Seria interessante se conseguíssemos um controlador que tivesse um integrador, mas que ainda assim tivesse uma boa robustez de estabilidade. A seguir, descrevemos o projeto de um controlador deste tipo.

4.3 Controlador de Fase Não-Mínima com Integrador

Controladores de fase não-mínima são poucos usados na prática, sem razão aparente. Este tipo de controlador possui um zero fora do círculo unitário, tal como os próprios modelos da microgarra. Esta solução foi pensada de modo que se conseguisse obter estabilidade nominal (e robusta) mesmo com a inserção de um integrador no controlador, de modo a obter erro estacionário nulo para resposta ao degrau. Sendo assim, consegue-se precisão total no valor final da força aplicada pela microgarra.

A função de transferência do controlador de fase não-mínima usado aqui é:

$$H(z) = -\frac{K(z-a)(z+b)}{(z-1)(z-c)} \quad (4.2)$$

Os valores dos parâmetros a, b, c foram escolhidos após algumas tentativas. Deixou-se para o final a escolha de K , pois a influência deste é sempre mais previsível. Variando-se o valor de $K = 0.05$ em diante, concluiu-se que o maior valor em que se consegue robustez de estabilidade, isto é, o sistema em malha fechada é estável para todos os membros da família, é $K = 0.5$. Na Fig. 22, tem-se os diagramas de Nyquist para o modelo médio + controlador para diferentes valores de K . Nota-se que a estabilidade para o modelo médio é assegurado. Não é possível ver neste gráfico, mas tal como nos casos anteriores, a robustez de estabilidade é assegurada. Já na Fig. 23 tem-se os diagramas de Bode de malha aberta e malha fechada. Nota-se que em malha aberta, isto é, para o caso da função de transferência $G(z)H(z)$, tem-se que o ganho é bem aumentado em baixas frequências por conta do integrador. Já no caso de malha fechada, tem-se que o ganho fica próximo de $0dB$, o que indica que o erro estacionário será praticamente zero, como queremos.

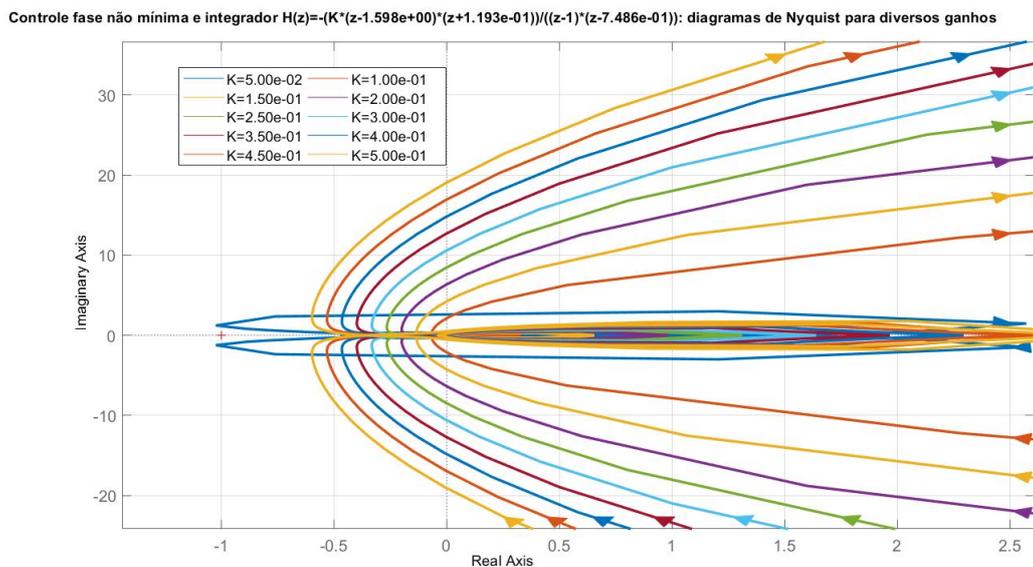


Figura 22 – Diagramas de Nyquist para o Controlador: $H(z) = -\frac{K(z-1.5980)(z+0.1193)}{(z-1)(z-0.7486)}$

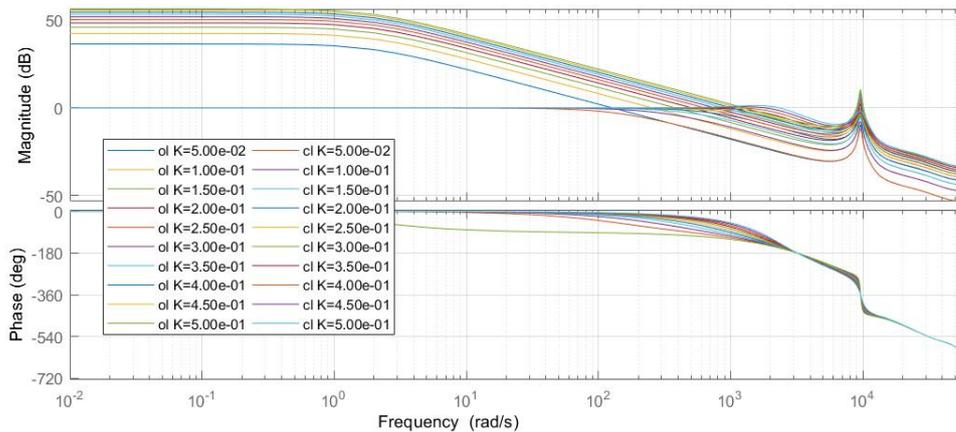


Figura 23 – Diagramas de Bode de malha aberta e de malha fechada para o Controlador:

$$H(z) = -\frac{K(z-1.5980)(z+0.1193)}{(z-1)(z-0.7486)}$$

A resposta ao degrau unitário pode ser vista na Fig. 24. Nota-se que o erro estacionário é nulo, pois o valor do sinal de força fica igual a um após aproximadamente 5.0 ms. Isto também caracteriza um sistema tão rápido quanto aquele com controlador proporcional. O custo porém dessa maior precisão e rapidez é um valor aumentado de tensão no sinal de controle, conforme pode ser visto na Fig. 25.

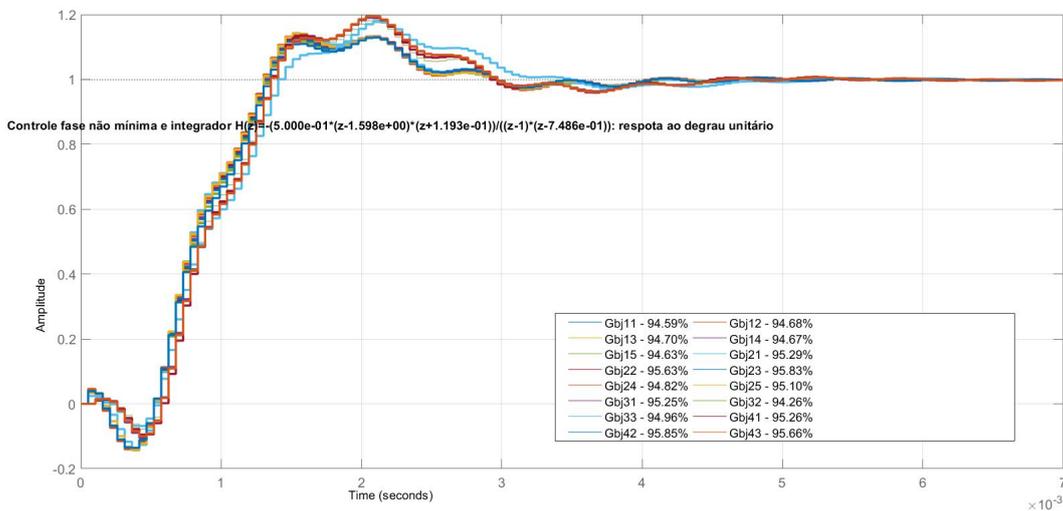


Figura 24 – Resposta ao degrau unitário com o Controlador: $H(z) = -\frac{K(z-1.5980)(z+0.1193)}{(z-1)(z-0.7486)}$

Como se pode ver, todos os controladores obtidos até agora são robustos. Entretanto, o desempenho depende da maior complexidade do controlador (quanto mais complexo, melhor o desempenho). Para ter boa precisão e velocidade, é necessário um controlador que forneça maiores valores de sinal de controle. Na próxima seção, iremos aplicar um método mais sistemático de projeto de controladores robustos.

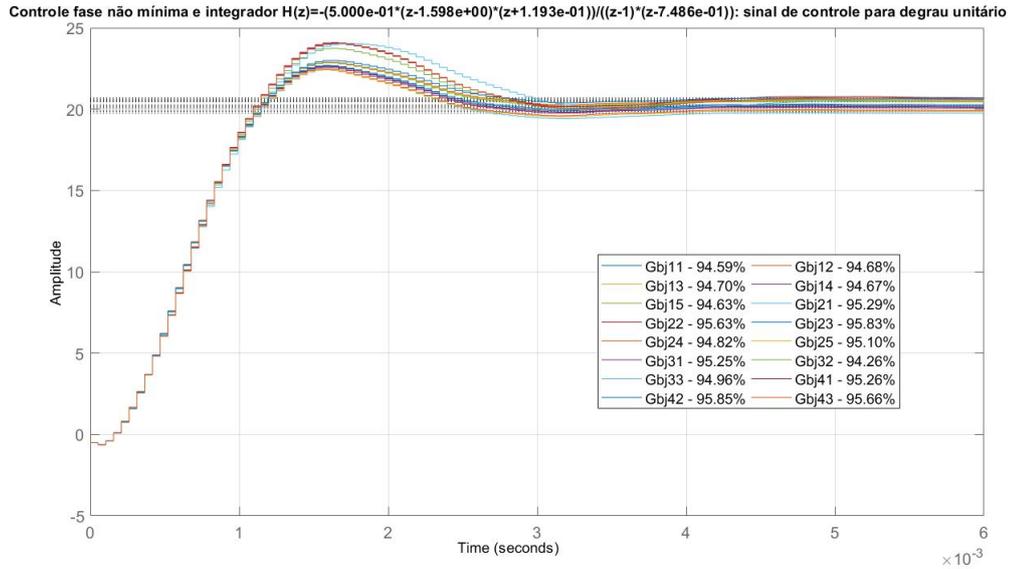


Figura 25 – Sinal de Controle ao degrau unitário para o controlador $H(z) = \frac{K(z-1.5980)(z+0.1193)}{(z-1)(z-0.7486)}$

4.4 Controlador H_∞ Sensibilidade Mista

Para fazer um projeto que dependa menos da tentativa e erro, vamos projetar um controlador robusto H_∞ , conforme descrito em (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2007). Em tal projeto, inicialmente se determina:

1. Uma função peso de incerteza $W_3(z)$, que modela a família de modelos/plantas;
2. Uma função peso de desempenho $W_1(z)$, que é ajustada de forma a forçar o controlador (que será projetado mais adiante) a ter o desempenho desejado;
3. A função peso de controle W_u , que deve ser ajustada de forma que penalize valores muito altos de sinal de controle.

Na Fig. 26, tem-se a família de plantas para o modelo BJ (em pontilhado) e a família de plantas ajustadas (linhas contínuas), de forma que possamos determinar a função peso $W_a(z)$. A função peso de incerteza ajustada que gera esta família de plantas é:

$$W_3(z) = \frac{1.5z^2 - 0.198z - 1.252}{z^2 + 0.53z - 0.063}$$

A função peso de desempenho deve garantir erro estacionário pequeno e pico de ressonância baixo, de modo a amortecer rapidamente a resposta ao degrau. Foi escolhida a função de primeira ordem:

$$W_1(z) = \frac{0.5z - 0.4479}{z - 0.9999} \quad (4.3)$$

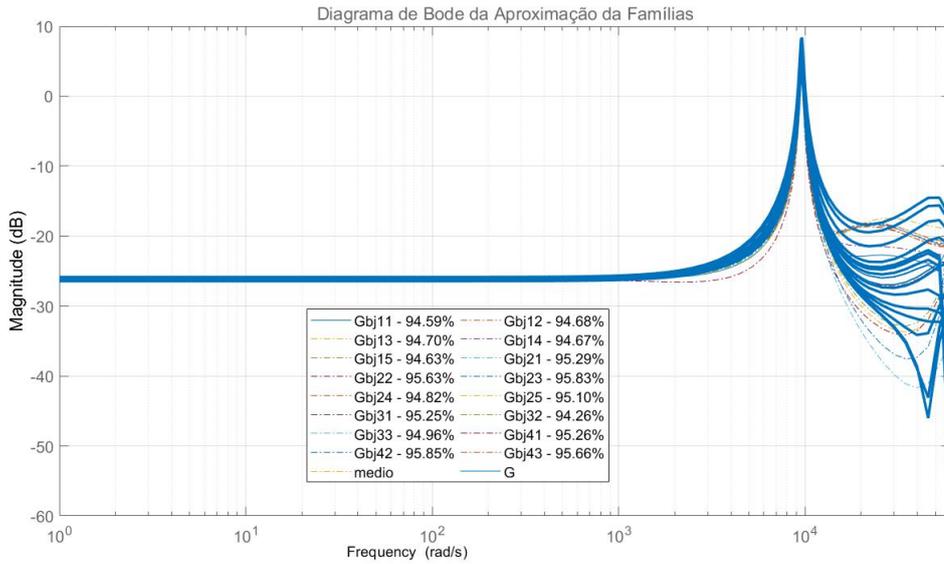


Figura 26 – Família de Plantas ajustada para as plantas identificadas.

onde o correspondente diagrama de Bode do inverso $1/W_1(z)$ é mostrado na Fig. 27 (em azul). A função sensibilidade $S(z)$ do sistema em malha fechada final deve ficar abaixo deste gráfico azul, como acontecerá quando o projeto for concluído. A função peso de controle foi escolhida como sendo (após algumas tentativas) como sendo constante igual a $W_u = 0.05$, de modo a não ter sinais de controle muito altos.

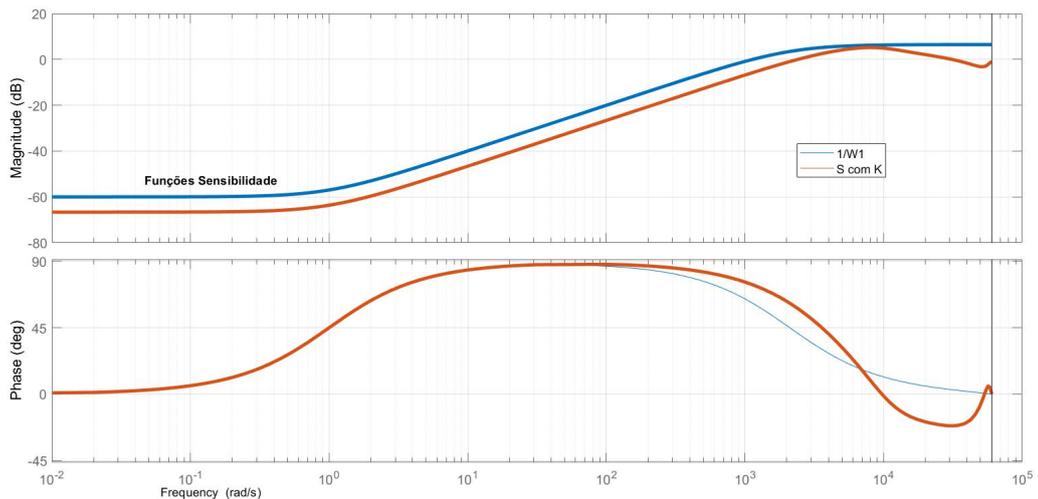


Figura 27 – Função Peso de Desempenho e Função Sensibilidade.

Após executar a função **mixsyn** do MATLAB, com as funções peso descritas acima, o controlador projetado (automaticamente) foi:

$$H(z) = \frac{6.711z^7 - 3.948z^6 - 8.803z^5 + 7.055z^4 + 4.232z^3 - 2.6z^2 - 0.8153z + 0.1027}{z^7 - 0.5284z^6 - 1.151z^5 + 0.5011z^4 + 0.3866z^3 - 0.169z^2 - 0.05025z + 0.01067}$$

Este controlador tem ordem alta (sete), o que é uma característica desta metodologia de projeto, já que alguns pólos acaba anulando alguns polos e zeros da planta. O fator γ , que é um parâmetro característico desta metodologia de projeto, ficou $\gamma = 1.1163$. Idealmente deveria ser $\gamma = 1$ para que as especificações fossem atendidas, mas como ficou próximo, podemos dizer que o projeto ficou satisfatório. O mapa de pólos e zeros da função sensibilidade complementar T obtida é mostrado na Fig. 28. Como e pode notar, há cancelamento de pólos e zeros da planta com pólos e zeros do controlador, o que é característico deste tipo de projeto. Para podermos comparar este projeto com os anteriormente feitos, plotamos os diagramas de Nyquist para este controlador com as diversas plantas da família (que é a mesma família de modelos BJ dos projetos anteriores), que são mostrados na Fig. 29.

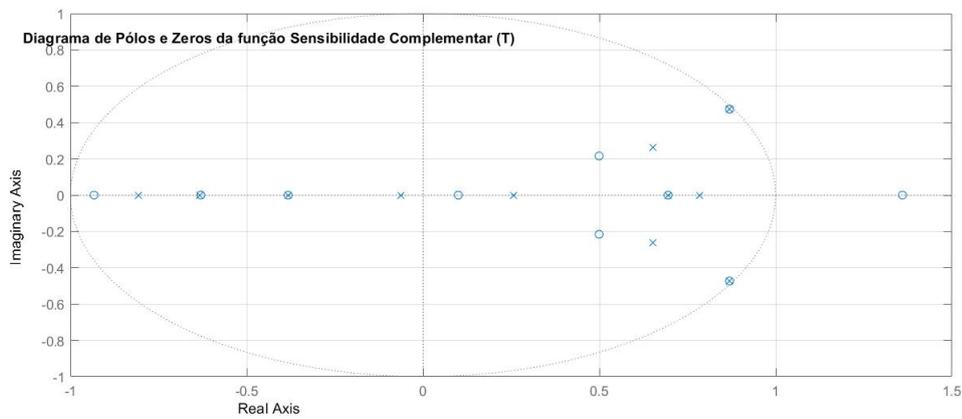


Figura 28 – Polos e Zeros de Malha Fechada.

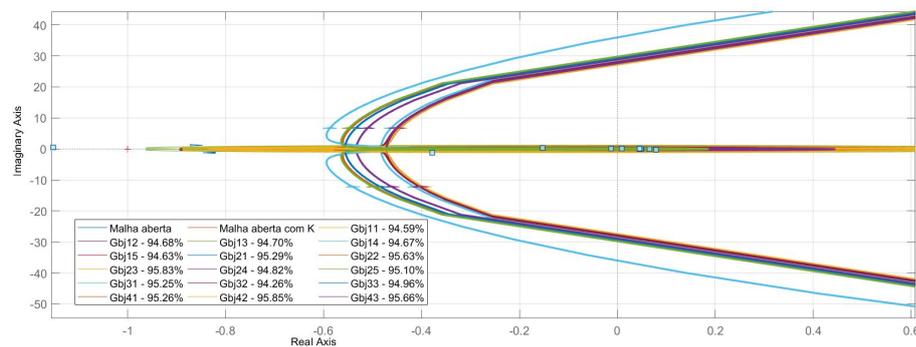


Figura 29 – Diagramas de Nyquist para o Sistema.

O diagrama de Bode do controlador $H(z)$ projetado é mostrado na Fig. 30. Nota-se que o ganho é alto nas baixas frequências, para que se ter o baixo erro estacionário pedido. O ganho também é bem baixo exatamente na frequência de ressonância da planta, de forma a atenuar este efeito. O diagrama de Bode da função de transferência KS , que corresponde ao controlador em série com a função sensibilidade, é apresentado na Fig. 31.

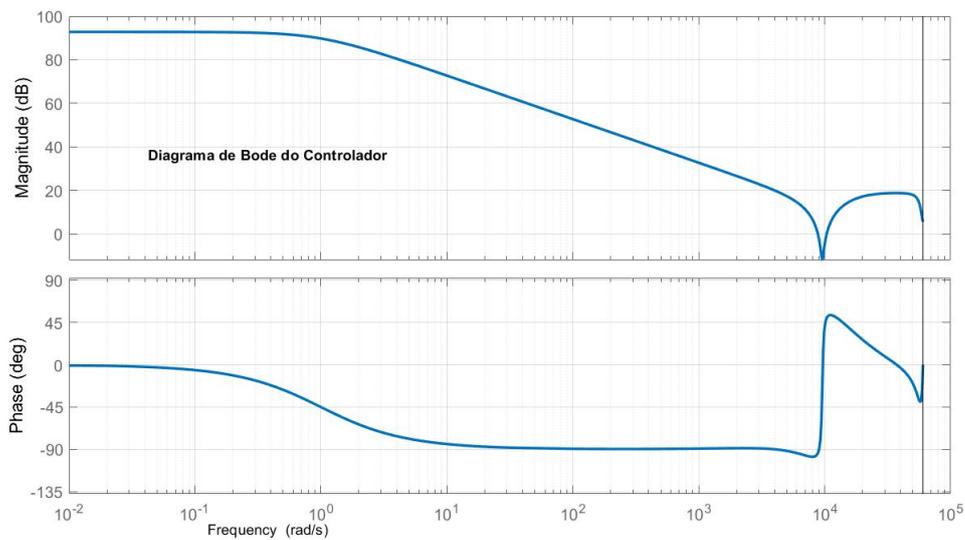


Figura 30 – Diagramas de Bode do Controlador.

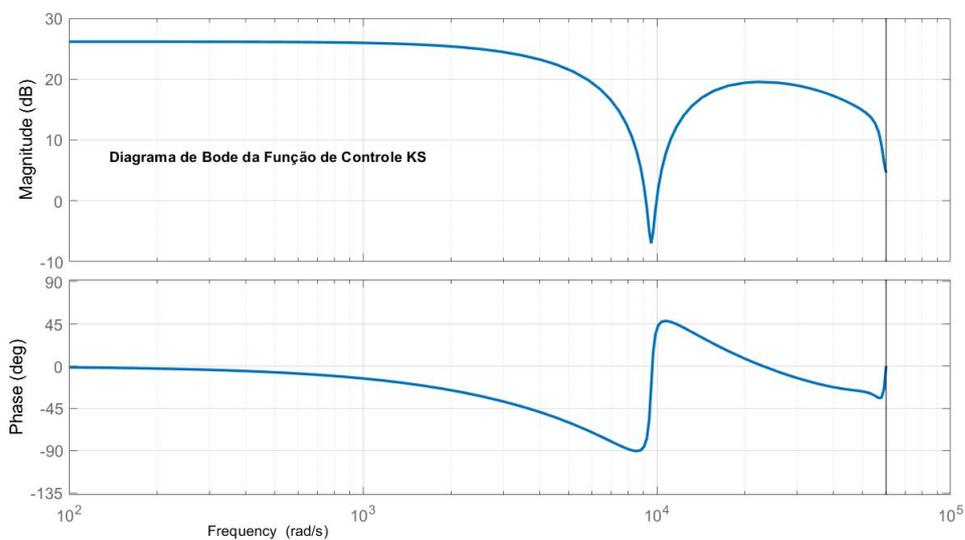


Figura 31 – Diagrama de Bode da Função KS (função de controle).

Para que possamos garantir a robustez de estabilidade, é necessário que o diagrama de Bode de módulo da função sensibilidade complementar T esteja abaixo do inverso da função peso de incerteza $1/W_3(z)$, o que ocorre como pode ser visto na Fig. 32. Deste modo, podemos dizer que o sistema projetado pelo método H_∞ é robustamente estável.

Para verificar a eficiência deste controlador, fizemos simulações de resposta ao degrau unitário, tal como foi feito para os outros controladores anteriormente projetados, para todos os modelos BJ da família, conforme apresentado na Fig. 33. Nota-se que o erro estacionário é praticamente nulo, o que indica uma alta precisão na força aplicada. A resposta é relativamente rápida, o que pode ser constatado pelo tempo que o sinal de força

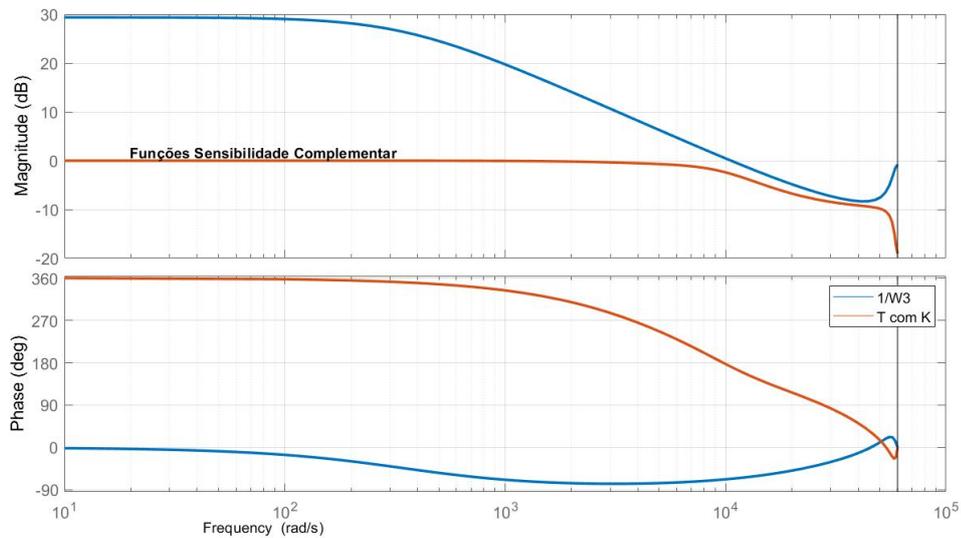


Figura 32 – Diagrama de Bode da Função Sensibilidade Complementar T e Inverso da Função Peso de Incerteza).

demora para atingir o valor estacionário (em torno de 6.0 ms). A frequência de oscilação pode mudar razoavelmente dependendo da planta (ou seja, da partícula que foi agarrada e como foi agarrada). O sinal de controle é apresentado na Fig. 34. Nota-se que o valor de tensão aplicado é tão alto quanto no projeto de controlador de fase não-mínima, o que indica que, não importando a metodologia de projeto, a precisão na força sempre vem ao custo de maior tensão aplicada na microgarra (o que não significa maior potência, pois a corrente aplicada pode ser bem pequena).

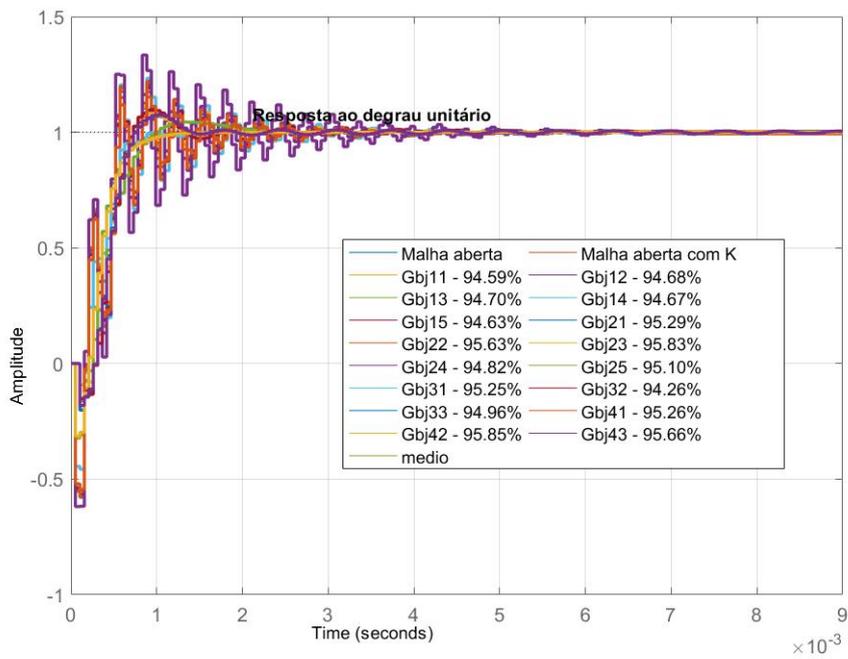


Figura 33 – Resposta ao Degrau Unitário: Controlador H_{∞} .

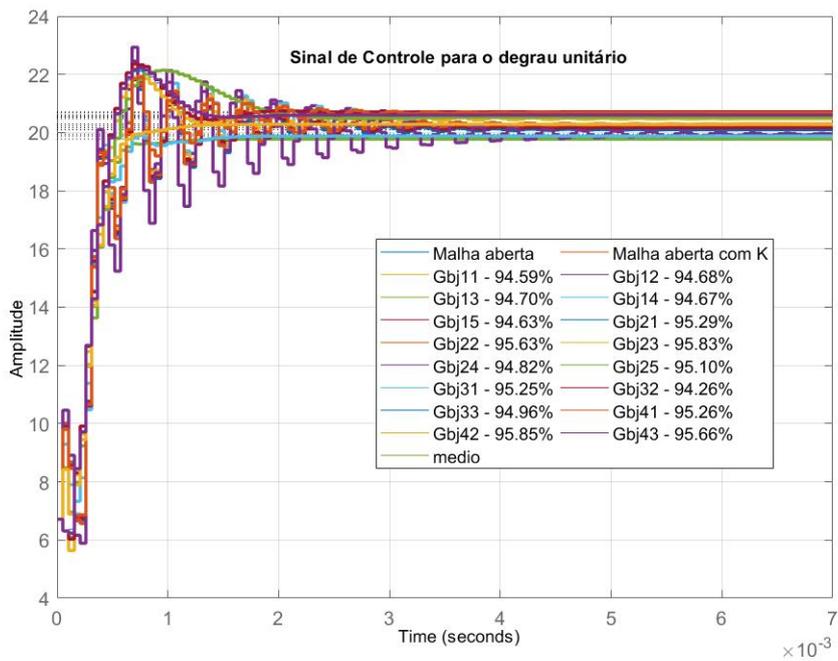


Figura 34 – Sinal de Controle: Controlador H_{∞} .

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Apresentaram-se aqui a modelagem matemática de uma microgarra comercial - modelo FT-G32 da FemtoTools - para alguns tipos de micropartículas agarradas - bem como projeto de controladores de força para estas microgarras. Devido às variações que podem ocorrer nos modelos por conta do tamanho das micropartículas (bem como a forma em que estão agarradas), os controladores precisam ser robustos, tanto do ponto de vista da estabilidade quanto do desempenho. Foram tentados três tipos de modelos diferentes (ARMAX, OE e BJ) sendo que o mais adequado para a aplicação em questão acabou sendo o BJ (Box-Jenkins).

A partir da família de modelos BJ, pode-se projetar controladores robustos. O primeiro controlador, proporcional, é o mais simples de se implementar (e também o que menos consome tempo de processador e memória no computador), porém não tem a precisão desejada de controle de força. O controlador de atraso de fase tem uma precisão melhor. Entretanto, é mais lento (tempo de acomodação maior). Estes dois controladores, por conta de precisão não muito alta, exigem menos esforço de controle (valores menores do sinal de controle). O controlador de fase não-mínima com integrador, por outro lado, é mais complexo do ponto de vista computacional, porém atinge melhor desempenho, com erro estacionário praticamente zero, e rapidez igual à atingida pelo controlador proporcional. Como lado negativo, os níveis de esforço de controle são maiores que os dois outros controladores, o que é necessário para se ter precisão de força. O controlador H_∞ também é de ordem alta, apresenta esforço de controle considerável, porém a precisão e a rapidez são muito bons.

O funcionamento destes controladores, por enquanto, só foi testado em simulações com os modelos matemáticos da microgarra + micropartículas. Para poder implementar este sistema de controle de força, é necessário ainda uma placa de aquisição (conversores AD e DA) com frequência de amostragem pelo menos até 20kHz e uma placa de amplificação de sinais (*drivers* de potência) que eleve a tensão do sinal de entrada da microgarra a valores compatíveis. Assim poderemos testar esses controladores na prática.

Embora outros trabalhos tenham desenvolvido modelos matemáticos e controladores para microgarras, os projetos e resultados neste trabalho permitiram o domínio de parte da tecnologia de micromanipulação, que tem muitas aplicações importantes, conforme dito anteriormente (BOUDAUD; HADDAB; GORREC, 2013). Para trabalhos futuros, como colaboração entre Escola Politécnica da USP (EPUSP) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), pretendemos produzir nossas próprias microgarras (técnica já dominada pelo grupo de micromanufatura do IPT), com geometrias e propriedades desejadas, e desenvolver controladores de força para estas, seguindo-se os passos apresentados neste relatório.

Referências

ASCHEPKOV, L. T. et al. *Optimal control*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 13.

BOSCH, P. P. van den; KLAUW, A. C. van der. *Modeling, identification and simulation of dynamical systems*. [S.l.]: crc Press, 1994. Citado na página 7.

BOUDAUD, M. et al. An output feedback lpv control strategy of a nonlinear electrostatic microgripper through a singular implicit modeling. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 28, p. 97–111, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 16 e 26.

BOUDAUD, M.; HADDAB, Y.; GORREC, Y. L. Modeling and optimal force control of a nonlinear electrostatic microgripper. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 1130–1139, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 5, 6, 7, 8, 23 e 41.

CARROZZA, M. C. et al. Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, IOP Publishing, v. 10, n. 2, p. 271, 2000. Citado na página 3.

CRUZ, J. J. d. Controle robusto multivariável. *Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil*, 1996. Citado na página 24.

HOF, P. Van den; BOMBOIS, X.; COURSE, L. N. D. System identification for control. *Delft Center for Systems and Control, TU-Delft. Lecture notes, Dutch Institute for Systems and Control (DISC)*, 2004. Citado na página 13.

KHEIR, N. *Systems modeling and computer simulation*. [S.l.]: Marcel Dekker Inc New York, 1988. Citado na página 7.

KIM, K. et al. Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic mems microgripper with two-axis force feedback. *Journal of micromechanics and microengineering*, IOP Publishing, v. 18, n. 5, p. 055013, 2008. Citado na página 3.

LIU, X. et al. In situ mechanical characterization of mouse oocytes using a cell holding device. *Lab on a Chip*, Royal Society of Chemistry, v. 10, n. 16, p. 2154–2161, 2010. Citado na página 3.

LIU, X. et al. Nanonewton force sensing and control in microrobotic cell manipulation. *The international journal of robotics research*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 8, p. 1065–1076, 2009. Citado na página 3.

LJUNG, L. System identification. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Wiley Online Library, 2001. Citado na página 15.

LJUNG, L. *Practical Issues of System Identification*. [S.l.]: Linköping University Electronic Press, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 6, 13 e 14.

OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1987. (Prentice-Hall International Editions). Citado na página 26.

SAKAR, M. S. et al. Cellular forces and matrix assembly coordinate fibrous tissue repair. *Nature communications*, Nature Publishing Group, v. 7, p. 11036, 2016. Citado na página 3.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. *Multivariable feedback control: analysis and design*. [S.l.]: Wiley New York, 2007. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 35.

SÖDERSTRÖM, T.; STOICA, P. *System identification*. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 1988. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

WEBER, A. et al. Measuring the mechanical properties of plant cells by combining micro-indentation with osmotic treatments. *Journal of experimental botany*, Oxford University Press UK, v. 66, n. 11, p. 3229–3241, 2015. Citado na página 3.

YOUNIS, M. I. Vibrations of lumped-parameter systems. In: *MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 13–56. Citado na página 3.