



**Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**  
**Coordenação de Matéria Condensada, Física**  
**Aplicada e Nanociência**

**Gabriel Rodrigo de Souza Gama**

**Uma Abordagem Alternativa Para**  
**Microatuadores Eletrotérmicos Em Vácuo:**  
**Da Simulação Ao Experimento *In Situ***

**Rio de Janeiro**

**2019**

**Gabriel Rodrigo de Souza Gama**

**Uma Abordagem Alternativa Para  
Microatuadores Eletrotérmicos Em Vácuo:  
Da Simulação Ao Experimento *In Situ***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em física do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas como parte do requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Física.

Orientadores: Dr. Alexandre Mello de Paula Silva

Dr. Rubem Luis Sommer

Rio de Janeiro

Dezembro de 2019

Agência de fomento e nº de processo: xxxxxxxx

Ficha catalográfica

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Biblioteca do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Xxxxx, Xxxx Xxxxxx Xxxxxxxx, 1xxx-

Xxxxxxxxxx xx xxxxxx xx xxxxxxxx xx xxxxxxxxxxxx xxxxxxxx x xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx / Xxxx

Xxxxxx Xxxxxxxx. – Rio de Janeiro, RJ : [s.n.], 2019.

Orientadores: Alexandre Mello de Paula Silva e Rubem Luis Sommer

Tese (doutorado) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, COMAN.

1. Xxxxxx. 2. Xxxxxxxxxxxxxxxxxx. 3. Xxxxxxxx. I. Xxxxx, Xxxxxx Xxxxxxxx, 19xx-

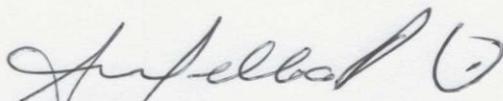
II.. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

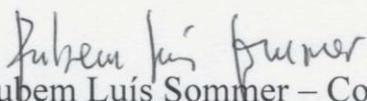
“UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA MICROATUADORES  
ELETROTÉRMICOS EM VÁCUO: DA SIMULAÇÃO AO EXPERIMENTO  
IN SITU”

**GABRIEL RODRIGO DE SOUZA GAMA**

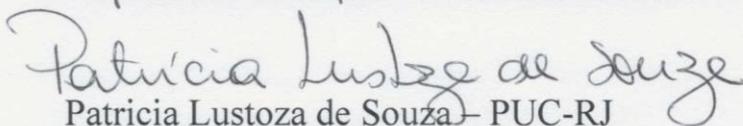
Tese de Doutorado em Física apresentada no  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas do  
Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação.  
Fazendo parte da banca examinadora os  
seguintes professores:



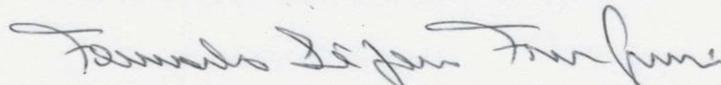
Alexandre Mello de Paula Silva – Presidente/Orientador/CBPF



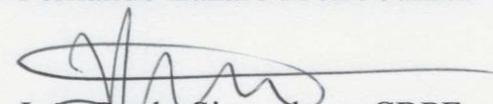
Rubem Luís Sommer – Coorientador/CBPF



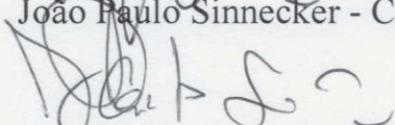
Patricia Lustoza de Souza – PUC-RJ



Fernando Lázaro Freire Junior - PUC-RJ



João Paulo Sinnecker - CBPF



Luiz Carlos Sampaio Lima - CBPF

Rio de Janeiro, 16 de dezembro de 2019.

*Em memória de*  
*Prf. André Luiz Pinto*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores e professores Dr. Alexandre Mello de Paula Silva e Dr. Rubem L. Sommer pelo compartilhamento dos conhecimentos, pela ajuda nas discussões, apoio durante momentos difíceis e pela grande paciência todo o período do doutorado.

Ao professor André Luiz Pinto, *In Memoriam*, pelas ideias, discussões e orientações.

À minha querida esposa, Daiana Gama, pelas noites em claro, pelas ajudas nas correções, pelo apoio nos momentos difíceis, pela compreensão e companheirismo durante o difícil período do doutorado. A ela minha eterna gratidão.

À coordenação de Pós-graduação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Prof. Dr. João Paulo Sinnecker, Elisabete Vicente de Souza (Bete) e José de Almeida Ricardo.

Aos meus estimados amigos, que muito me apoiaram durante essa jornada e contribuíram de forma direta ou indireta para esta tese: Horácio Jr., Bruno Correia, Roberta Dutra, Miguel Pedro Russano, Genildo Nonato e Cilene Labre.

À coordenação e toda equipe do LABNANO do CBPF.

Aos colaboradores e amigos do INL – International Iberian Nanotechnology Laboratory que me ajudaram de diversas formas durante o processo de fabricação. Ao Diretor geral do INL Dr. Paulo Freitas e ao Coordenador do Departamento de Micro e Nanofabricação do INL Dr. João Gaspar pelas discussões dos processos de fabricação, treinamentos e acesso às instalações; como também aos amigos Cláudia Coelho e Eurico Moreira, pelas longas horas dedicadas dentro da sala limpa, e ao amigo George Junior, pelo acolhimento no INL e pelo seu apoio.

Por fim, agradeço aos órgãos de financiamento CAPES, CNPq, FAPERJ e ao Projeto CBPF-INL que me possibilitaram realizar este trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho propõe a simulação e construção de um dispositivo microeletromecânico com capacidade de realizar um ensaio de tração dentro do microscópio eletrônico de transmissão para estudar os mecanismos de deformação de filmes finos nanoestruturados. O dispositivo baseia-se em atuadores eletrotérmicos de vigas inclinadas responsáveis por realizar força sobre a amostra, como também utiliza extensômetros capacitivos para medir o deslocamento e força exercidos sobre a amostra. A equação de Young simplificada foi usada para descrever a dissipação de calor proveniente do Efeito Joule em regime estacionário em vácuo no atuador eletrotérmico. A forma simplificada da equação de Young é capaz de fornecer a distribuição de temperatura, potencial elétrico e deslocamento de atuadores térmicos que possuam, ou não, propriedades físicas dependentes da temperatura como condutividade térmica, resistividade elétrica e coeficiente de dilatação linear. Os resultados numéricos propostos provenientes da aplicação da equação de Young simplificada aos atuadores eletrotérmicos, foram comparados com resultados de simulação de elementos finitos e apresentaram resultados satisfatórios. Uma instrumentação foi desenvolvida para medir o deslocamento do dispositivo dentro do Microscópio Eletrônico de Varredura, usando um terminal de passagem para vácuo (feedthrough), fornecendo uma resolução de décimos de micrômetros. Para o funcionamento fora do ambiente de vácuo, o estudo da variação de temperatura do dispositivo é discutido com valores experimentais sendo comparados com resultados de simulação baseada em elementos finitos. A simulação e o modelo numérico proposto descrevem o deslocamento do atuador até ~ 30 mA de corrente elétrica aplicada. Acima de 35 mA uma variação abrupta da resistividade é observada seguida por uma degradação da superfície do dispositivo em torno de 50 mA. As vigas inclinadas de silício do dispositivo fundem com 52 mA. Uma simulação de elementos finitos foi realizada para estudar o regime elástico e plástico de ensaio de tração dentro do Microscópio Eletrônico de Transmissão. Para a simulação foi utilizado um filme de cobre de ~ 30 nm de espessura. O dispositivo foi capaz de aplicar uma força de até 0,7 mN. Sua fabricação mostrou-se desafiadora e é discutida no trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Medida de deslocamento *in situ*; Análise de elementos finitos; Microatuadores; Dispositivos microeletromecânicos; Atuadores térmicos.

## ABSTRACT

The present work proposes the simulation and construction of a microelectromechanical device capable of performing a tensile test within the transmission electron microscope to study the deformation mechanisms of nanostructured thin films. The device is based on electrothermal actuators of inclined beams responsible for performing force on the sample, as well as using capacitive strain gauges to measure the displacement and force exerted on the sample. The simplified Young's equation was used to describe the heat dissipation coming from the Joule Effect in a stationary vacuum regime in the electrothermal actuator. The simplified form of Young's equation is able to provide the temperature distribution, electrical potential and displacement of thermal actuators that have, or not, physical properties dependent on temperatures such as thermal conductivity, electrical resistivity, and linear expansion coefficient. The proposed numerical results from the application of the simplified Young's equation to electrothermal actuators were compared with finite element simulation results and present satisfactory results. Instrumentation was developed to measure the displacement of the device inside the Scanning Electronic Microscope (SEM), using a feedthrough terminal, providing a resolution of tenths of micrometers. For operation outside the vacuum environment, the study of the temperature variation of the device is discussed with experimental values being compared with a finite element-based simulation result. The simulation and the proposed numerical model describe the actuator displacement up to ~30 mA of applied electric current. Above 35 mA an abrupt variation of resistivity is observed followed by a degradation of the device surface around 50 mA. The inclined silicon beams of the device merge with 52 mA. A finite element simulation was performed to study the elastic and plastic tensile test regime within the Transmission Electronic Microscope (TEM). For the simulation, a copper film of ~30 nm thickness was used. The device was able to apply a force of up to 0.7 mN. Its manufacture proved to be challenging and is discussed in the work.

**Keywords:** Displacement measurement; Finite element analysis; Microactuators; Microelectromechanical devices; Thermal actuators.

## SUMÁRIO

Agradecimentos .....	vi
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Sumário.....	ix
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xvi
Lista de abreviaturas e siglas .....	xvii
1. Introdução .....	1
1.1. Objetivos .....	2
1.2. Descrição dos capítulos .....	2
2.Fundamentos Teóricos.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.1. Dispositivos microeletromecânicos - MEMS .....	4
2.2. Microatuadores eletrotérmicos .....	6
2.3. Atuadores térmicos .....	7
2.4. Atuadores térmicos em formato de U .....	11
2.5. Atuadores térmicos em formato de V .....	16
2.6. Atuadores/sensores eletrostáticos .....	22
2.7. Mecanismos de deformação plástica e efeito hall-petch .....	29
3.Simulação MEF de atuadores térmicos .....	33
3.1. Simulação de dispositivo bimorfo .....	35
3.2. Simulação de dispositivo em U .....	36
3.3. Simulação de dispositivo em Z.....	37
3.4. simulação de dispositivos em V.....	40
3.5. Estudo da perda de calor por radiação .....	44
3.6. Cálculo da rigidez da célula de carga por MEF.....	46

3.7. Simulação de ensaio de tração .....	47
4.Proposta de uma abordagem numérica alternativa .....	52
4.1. Abordagem com $\kappa(T)$ e $\rho(T)$ .....	52
4.2. Abordagem para $\kappa_0$ e $\rho_0$ .....	61
5.Materiais e métodos.....	64
5.1. Equipamentos para microfabricação de MEMS .....	67
5.2. Fabricação do dispositivo sem furo passante.....	74
5.3. Suporte para medida no MEV .....	77
5.4. Obtenção de medida de deslocamento no MEV .....	79
5.5. Obtenção de medida de temperatura com câmera térmica .....	82
5.6. Fabricação do dispositivo para MET .....	83
6.Resultados e Discussão.....	86
6.1. Estudo do dispositivo MAET em vácuo .....	86
6.2. Estudo do dispositivo para ensaio de tração .....	90
6.3. Estudo da temperatura em ar.....	92
7.Conclusões .....	95
7.1. Trabalhos futuros .....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97
APÊNDICE A Simplificação da equação de Young .....	107
APÊNDICE B Equação de Young para conjunto 1.....	107
APÊNDICE C Solução da equação Young para conjunto 1 com Maple .....	108
APÊNDICE D Ajuste polinomial para $f_1$ e $f_2$ .....	109
APÊNDICE E Solução analítica para conjunto 1.....	110
APÊNDICE F Solução numérica para conjunto 1 usando Maple.....	114
APÊNDICE G Solução analítica para conjunto 3.....	118
APÊNDICE H Solução analítica para conjunto 3 com Maple .....	120
APÊNDICE I Solução analítica para conjunto 2.....	123

APÊNDICE J	Solução analítica para conjunto 2 usando Maple .....	126
------------	--	-----

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Esquema de atuador bimórfico, onde <math>r</math> é o raio de curvatura, <math>L</math> é o comprimento do dispositivo, <math>t_1</math> é a espessura do primeiro filme (maior coeficiente de dilatação linear), <math>t_2</math> é a espessura do segundo filme (menor coeficiente de dilatação linear) e <math>M</math> é o torque sofrido pelo dispositivo com a elevação de temperatura (adaptado de [14]).</i> .....	8
<i>Figura 2.2 – Micrografia de um sensor de fluxo de gás baseado em atuador bimórfico (adaptado de [44]).</i> .	8
<i>Figura 2.3 – Dispositivo bimórfico com movimento vertical (adaptado de [47]).</i> .....	9
<i>Figura 2.4 – Dispositivo de escaneamento de fibra óptica baseado em MAET bimórfico (adaptado de [48]).</i> .....	10
<i>Figura 2.5 – Micro espelho usando MAET bimórficos (adaptado de [49]).</i> .....	11
<i>Figura 2.6 – Esquema de MAET em formato de U, onde <b>L1</b> (e <math>L</math>) comprimento da viga quente, <b>L2</b> comprimento da viga fria e <b>L3</b> comprimento da viga de flexão (adaptado de [14]).</i> .....	12
<i>Figura 2.7 – Micropinça baseada em atuadores térmicos em U (adaptado de [53]).</i> .....	13
<i>Figura 2.8 – Micrografia de MEV de atuador térmico em U com três pernas (adaptado de [56]).</i> .....	13
<i>Figura 2.9 – Configuração de dispositivo MAET em U para deslocamento fora do plano (adaptado de [60]).</i> .....	14
<i>Figura 2.10 – Atuador térmico em formato de Z (adaptado de [62]).</i> .....	16
<i>Figura 2.11 – Micrografia de dispositivo MAET em V de silício policristalino (adaptado de [76])</i> .....	17
<i>Figura 2.12 - Micrografia de dispositivo para ensaio de tração em MET (adaptado de [39]).</i> .....	18
<i>Figura 2.13 – Três configurações mais comuns de dispositivos para ensaio de tração uniaxial. As representações são: Triângulo = atuador, retângulo = célula de carga e anel = atuador externo. <math>L</math> é o comprimento da amostra, e <math>\delta</math> é a deformação da amostra (adaptado de [93]).</i> .....	20
<i>Figura 2.14 – Micropinças de Ni fabricadas por eletrodeposição (adaptado de [92])</i> .....	21
<i>Figura 2.15 – Interruptores óticos feitos com atuadores em V (daptado de [95]).</i> .....	22
<i>Figura 2.16 – Esquemático de capacitores de vigas paralelas e interdigitais.</i> .....	23
<i>Figura 2.17 – Esquema para medida de variação de capacitância com o MS3110 (adaptado de [39]).</i> .....	26
<i>Figura 2.18 – Sensor eletroestático utilizado para medir força gerada por mosca (adaptado de [103]).</i> .....	27
<i>Figura 2.19 – MEMS eletroestático para manipulação de DNA (adaptado de [104]).</i> .....	28
<i>Figura 2.20 – Micropinça a base de atuador eletroestático (adaptado de [105]).</i> .....	28
<i>Figura 2.21 – MEMS para ensaio de tração in situ com atuador eletroestático (adaptado de [99,106]).</i> .....	29
<i>Figura 2.22 – Gráfico de dureza por inversão da raiz quadrada do tamanho médio de grão (adaptado de [120])</i> .....	31
<i>Figura 2.23 – Esquema mostrando junções triplas de um contorno de grão, <math>d</math> é o diâmetro médio do grão.</i>	32
<i>Figura 3.1 – Desenho utilizado para simulação usando óxido de silício.</i> .....	34

<i>Figura 3.2 - Temperatura das placas em função da área das placas para <math>U = 7,5V</math> de tensão.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.3 – Simulação de atuador eletrotermico cantilever com plataforma de silício com trilha de Au Distribuição de temperatura, (b) distribuição de temperatura na trilha de Au para 8 voltagens diferentes, (c) distribuição de deslocamento, (d) distribuição de deslocamento na trilha de Au para 8 voltagens diferentes aplicadas entre os terminais.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.4 – Simulações MEF de atuador térmico em formato de U para conjunto 1. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.5 – Simulação MEF para perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de U. Conjunto 1: (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (b) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>. Conjunto 2: (c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (d) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.6 – Simulações MEF de atuador térmico em formato de Z. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.7 – Simulação MEF para perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de Z. Conjunto 1: (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (b) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>. Conjunto 2: (c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (d) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.8 – Deslocamento por voltagem de artigo de Zhang (adaptado de [67]). ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.9 – Simulação MEF de um atuador térmico em V. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.10 – Simulação MEF para perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de V. Conjunto 1: (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (b) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>. Conjunto 2: (c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (d) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.11 – Perfil de simulação MEF de atuador térmico em V com vigas dissipadora de calor. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.12 – Simulação MEF para conjunto 1 de perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de V com vigas dissipadora de calor. (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (b) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>(c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (d) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.13 – Simulação MEF para conjunto 2 de perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de V com vigas dissipadora de calor. (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (b) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>(c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>; (d) deslocamento por ddp para <math>h = 5, 10, 15</math> e <math>20\mu m</math>.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.14 – (a) simulação de perda de calor por radiação e (b) simulação de distribuição de temperatura. Para as simulações foi usada as propriedades físicas do conjunto 1 Tabela 2.2 para <math>U = 9V</math>.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.15 – Simulação de temperatura com perda de calor por radiação. Com propriedades físicas do (a) conjunto 1 e (b) conjunto 2 da Tabela 2.2. ....</i>	<i>46</i>

<b>Figura 3.16</b> – Simulação MEF para ensaio de tração com CP de cobre. (a) Amostra de cobre em simulação de ensaio de tração com $U = 8$ V. A amostra tem $10\ \mu\text{m}$ de comprimento, $4\ \mu\text{m}$ de largura e $30\ \text{nm}$ de espessura. (b) Simulação de curva tensão x deformação para CP de cobre da figura (a). (c) deslocamento do atuador térmico e da célula de carga. (d) Simulação de temperatura máxima, temperatura da parte superior e parte inferior do corpo de prova.....	49
Figura 3.17 – Micrografia de dispositivo com viga partida durante processo de fabricação.....	51
Figura 3.18 – Simulação MEF de distribuição de temperatura em °C. Propriedade físicas da Tabela 2.2 a $U = 8$ V. (a) conjunto 1 e (b) conjunto 2. ....	51
Figura 4.1 – Esboço de um dispositivo MAET em forma de V. Comprimento da viga $L_0 = 300\ \mu\text{m}$ , $b = 8\ \mu\text{m}$ de largura, $\vartheta = 10^\circ$ de inclinação e largura da plataforma central de $b_s = 40\ \mu\text{m}$ . Todo a geometria possui uma espessura de $h = 5\ \mu\text{m}$ . ....	54
Figura 4.2 – Resultado de simulação MEF (bolinhas vermelhas) e modelo proposto (quadrados pretos) para temperatura na plataforma central em função da tensão aplicada entre os terminais. ....	55
Figura 4.3 – Temperatura em função do potencial elétrico ao longo do comprimento da viga para diferentes voltagens ( $U$ ). ....	56
Figura 4.4 – Simulação MEF e Modelo proposto da função potencial elétrica vs. comprimento para o dispositivo MAET em forma de V. $r_1, r_2, r_3$ e $r_4$ são constantes da função de potencial elétrico. Os resultados de simulação de linha reta (linha reta) e nossa. ....	59
Figura 4.5 – Distribuição do potencial elétrico e campo elétrico no dispositivo MAET para $U = 8$ V. As linhas vermelhas transversais são as linhas equipotenciais e as setas vermelhas são os campos elétricos. (a) $b_s = 2\ \mu\text{m}$ e (b) $b_s = 40\ \mu\text{m}$ . ....	59
Figura 4.6 – Deslocamento por voltagem elétrica dos conjuntos 1, 2 e 3 da Tabela 2.2 para simulação de MEF e modelo proposto. Dispositivo MAET em forma de V, para uma largura da plataforma central de $2\ \mu\text{m}$ . Os pontos de dados estão ligados por linhas apenas para ilustração.....	62
Figura 5.1 – Porta amostra da Hummingbird com micrografia de MEV de chip comercial. ....	64
Figura 5.2 – Micrografia de MEV do dispositivo para ensaio de tração.....	65
Figura 5.3 – Micrografia de MEV do dispositivo para ensaio de tração. Região da amostra (seta vermelha) e vigas dissipadora de calor (setas amarelas).....	66
Figura 5.4 – Forno YES-310TA Vapor Prime.....	67
Figura 5.5 - Sistema SPTS Primaxx HF vapor etcher para remoção de óxido de silício.....	68
Figura 5.6 – SPTS PEGASUS DRIE - método Bosch (adaptado de [97]). ....	69
Figura 5.7 – APS OXIDE ETCHER. Dispositivo para ataque de dielétricos. ....	70
Figura 5.8 – SPTS PECVD. Dispositivo para deposição de $\text{SiO}_2$ , $\text{SiNx}$ e Si amorfo. ....	70
Figura 5.9 – Sistema para remoção de resiste PVA TEPLA Plasma Asher.....	71
Figura 5.10 – SUSS MA6BA6 MASK ALIGNER, sistema de alinhamento entre faces do substrato. ....	72
Figura 5.11 – DWL 2000, sistema de litografia de escrita direta. ....	72
Figura 5.12 – Sistema para corte de substrato, Dicing Saw DAD 3350. ....	73
Figura 5.13 – Sistema para aplicação de resiste e revelação, Optical Photoresist, SUSS Gamma. ....	74

<i>Figura 5.14 – Etapas para o processo de fabricação, (a) ponto inicial; a bolacha de SOI; (b) aplicação de resiste; (c) litografia a laser; (d) DRIE no silício condutor; (e) plasma asher; (f) ataque com vapor de HF.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.15 – Micrografia ótica do processo de fabricação após: (a) revelação de 120s; (b) DRIE de 5µm de silício condutor; (c) corte parcial de cada dispositivo (dicing); (d) ataque com vapor de HF; (e) remoção do dispositivo com fita adesiva. (f) micrografia de SEM após HF.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.16 – (a) Terminal de Passagem para Vácuo instalado em um MEV JEOL comercial. (b) Circuito de suporte, porta-chip e 4 pastilhas com os MEMS. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.17 – (a) Esboço de três ligações com fio com rebaixo (adaptado de [142]). (b) Micrografia de FAB de ouro presa em rebaixo. Na sequência: em terminal de prata, em rebaixo e em furo passante.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.18 – Micrografia de pastilhas com MEMS, coladas com cola prata e conexão feita com fio de Au.</i>	<i>78</i>
<b>Figura 5.19 – Foto da parte interna da câmara de vácuo de um MEV. ....</b>	<b>79</b>
<i>Figura 5.20 – Imagens de deslocamento no MEV do dispositivo MAET. (a) dispositivo com 10 pares de vigas inclinadas, mostrando sentidos da passagem de corrente (38mA). Também é mostrado as regiões de cortes FIB, bem como a região para as medições de deslocamento MAET; (b) deslocamento da borda da plataforma central do MAET. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.21 – Micrografia de MEV mostrando desvios da interação magnética. Medidas na região fixa próxima ao atuador térmico, conforme indicado.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.22 - Interferência eletromagnética externa durante aquisição no MEV. A distância de trabalho usada para esta micrografia foi de 12mm e a voltagem de aceleração do feixe de elétrons foi de 15KV. ....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.23 - Sistema de medida de temperatura. (a) Configuração com câmera térmica da Optotherm IS640 sem lente (obtido de <a href="http://www.optotherm.com">www.optotherm.com</a>), (b) circuito auxiliar INL, (c) micrografia ótica de pastilhas de silício com fios de alumínio.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.24 – Esquema para fabricação de dispositivo para ensaio de tração in situ com furo passante. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.25 - Micrografia ótica de processo de fabricação do dispositivo com furo passante. Processo de fabricação após: (a) ataque químico do alumínio e limpeza no plasma asher; (b) ataque a plasma e limpeza com plasma asher na parte traseira; (c) DRIE do silício condutor ; (d) redução de espessura do silício condutor; (e) Libertação da camada de sacrifício do SiO<sub>2</sub> por vapor de HF; (f) Ampliação do dispositivo fabricado. ....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.1 - (a) Tensão U (V) versus corrente I (mA) para o dispositivo MAET. Para esta avaliação do gráfico, as correntes +I e -I foram variadas enquanto as voltagens foram medidas. (b) Resistividade do MAET e comportamento da temperatura média em relação à corrente aplicada (mA) avaliada a partir das medições experimentais. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.2 – Dados experimentais de medida histerese elétrica com variação contínua e gradual. ....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 6.3 – Micrografia de defeitos na superfície do dispositivo após 50mA de corrente aplicada. ....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.4 – Resultado gráfico de simulação MEF de temperatura para dispositivo. Passagem de corrente de 50mA. ....</i>	<i>89</i>

<i>Figura 6.5 – Gráfico de deslocamento versus corrente para dados experimentais, simulação MEF e Modelo proposto. Os parâmetros conjunto 1 da Tabela 2.2, usando a resistividade e <math>\rho = 9,93 \times 10^{-5} \Omega m</math> são usados para nossa abordagem e simulação MEF. Linhas no gráfico para guiar os pontos de dados.</i>	90
<i>Figura 6.6 – Gráfico de deslocamento vs. voltagem elétrica de dados experimentais e simulação.</i>	91
<i>Figura 6.7 – Gráficos de simulação MEF e dados experimentais: (a) Força vs. Voltagem, (b) Força vs. Deslocamento.</i>	92
<i>Figura 6.8 – Simulação MEF de distribuição de temperatura para <math>U = 9,5V</math>. (b) imagem de MEV de momentos antes da fusão do dispositivo, <math>U=9,6V</math>.</i>	92
<i>Figura 6.9 – Distribuição de temperatura em °C no MAET para tensão <math>U = 8 V</math>: (a) medida experimental (b) simulação MEF usando conjunto 2.</i>	93
<i>Figura 6.10 – Gráfico de dados experimentais e simulação MEF para temperatura em função da tensão da DA.</i>	94
<i>Figura 6.11 – Micrografia de câmera térmica mostrando distribuição de temperatura no porta-chip e nas pastilhas de silício para uma tensão <math>U = 10V</math>.</i>	94
<i>Figura D.1 – Ajuste polinomial de <math>f1</math></i>	109
<i>Figura D.2 – Ajuste polinomial de <math>f2</math></i>	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades estruturais do silício e outros materiais. (Tabela retirada da referência [17]).....	4
Tabela 2.2 - Resumo das propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do silício monocristalino condutor. ...	5
Tabela 4.1 – Valores de coeficiente do ajuste linear para curvas da Figura 4.3. A temperatura dos terminais $T_0$ foi definida como 293.15K, $f_1$ é o coeficiente linear e $f_2$ é o coeficiente quadrático. $\sigma f_i$ é o erro para o respectivo coeficiente. ....	57
Tabela 5.1 - Dimensão e símbolos do Microdispositivo .....	66
Tabela E.1 Constantes para equação de potencial elétrico .....	111

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MAET – Microatuador eletrotérmico

MEMS – Dispositivos microeletromecânicos

CP – Corpo de prova

MET – Microscópio Eletrônico de Transmissão

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

Ex.C – Extensômetro capacitivo.

SOI – *Silicon on Insulator* – Silício sobre isolante

TPV – Terminal de passagem de vácuo – Feedthrough

PECVD – Plasma-enhanced chemical vapor deposition – Deposição de vapor químico melhorado com plasma

INL – International Iberian Nanotechnology Laboratory

MEF – Finite element method – Simulação de elementos finitos

E – Módulo de Young isotrópico;  $E_{x,y,z}$  módulo de Young ortotrópico

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

# 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se miniaturizar dispositivos e sensores está diretamente relacionada com a necessidade de se consumir menos energia, produzir sensores que possam integrar-se a circuitos eletrônicos, aumentar a capacidade e velocidade de resolução de problemas, minimizar problemas médicos invasivos, como também otimizar dispositivos e técnicas para que se tornem dispositivos mais inteligentes.

O aprimoramento de ferramentas se faz necessário para a evolução da humanidade como um todo, de forma que a microfabricação e a nanotecnologia sejam umas das maneiras mais importantes pela qual a humanidade está moldando seu próprio destino em vez de ficar à mercê da evolução.

A construção/invenção de microprocessadores, microcontroladores e microssensores, levou a humanidade à terceira revolução industrial [1,2]. Por causa da evolução/criação da internet, de processadores cada vez mais eficientes, do entendimento cada vez maior de redes neurais, da construção/manipulação de grandes bancos de dados, o mundo vive a quarta revolução industrial, também conhecida como internet das coisas [2,3]. Por este motivo, micromáquinas, ou sistemas micro/nanoeletromecânico (MEMS/NEMS), vêm surgindo como um conjunto de ferramentas para resolver problemas específicos da indústria, e não como uma nova indústria monolítica com soluções genéricas para todos os problemas de fabricação [4].

A área de MEMS possui diversas aplicações que envolvem sensores para veículos como acelerômetros, giroscópios, microdispositivos para impressão de tintas, dispositivos para melhoramento de monitores, *display* (como por exemplo telas dobráveis) e sensores integrados a celulares [1]. Um exemplo muito interessante de sensores são aqueles utilizados para escaneamento tridimensional de digitais que utilizam uma matriz de sensores piezoelétricos, que vibram em alta frequência para escanear digitais [5].

Estruturas maiores e mais resistentes são possíveis a partir de ligas metálicas mais duras e resistentes. Nesse contexto tecnológico, os dispositivos MEMS têm um papel muito importante, e podem ser utilizados como ferramenta para estudar esses novos materiais. Um tipo muito comum de MEMS utilizado para estudar as propriedades mecânicas dos materiais são os atuadores eletrotérmicos, que utilizam energia térmica para realizar um teste de tração em filmes e nanofios. Estes dispositivos utilizam o calor gerado por uma corrente elétrica

para realizar alguma função, como por exemplo movimentar micropiças, girar microengrenagens, movimentar microespelhos e até manipular DNA e células [6–8].

Os atuadores eletrotérmicos, como o nome sugere, são extremamente dependentes das propriedades térmicas, elétricas e mecânicas do material. Compreender e avançar em rotas de fabricação, desenvolver técnicas mais eficientes para fabricação de novos dispositivos, propor e testar modelos que possam descrever atuadores eletrotérmicos, tem sido um grande esforço da ciência, como é possível se verificar analisando as literaturas mais recentes [9–16].

### 1.1. OBJETIVOS

- I. Projetar e simular um dispositivo para ensaio de tração de nanomateriais para funcionamento dentro dos microscópios eletrônicos;
- II. Desenvolver um modelo alternativo que descreva a temperatura, deslocamento e potencial elétrico na parte motora dos dispositivos para ensaio de tração;
- III. Propor uma rota de fabricação para se construir tal dispositivo, desenvolver e instalar um sistema de instrumentação para medida do deslocamento do dispositivo para ser utilizado em microscópios eletrônicos.

### 1.2. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O texto destinado à apresentação da pesquisa e tese de Doutorado está estruturado em 6 capítulos:

- O capítulo 1 - Introdução - aborda o tema a ser analisado por meio de justificativa da necessidade da pesquisa, no contexto de rotas de microfabricação, descrição teórica, numérica e simulada de dispositivo MEMS para ensaio de tração *in situ*;
- O capítulo 2 - ***Erro! Fonte de referência não encontrada.*** - é abordado uma revisão completa do estado da arte em dispositivos MEMS, com as mais diversas aplicações, com ênfase em dispositivos para ensaio de tração *in situ*;
- O capítulo 3 - Simulação MEF de atuadores térmicos - são discutidos principais aspectos e características dos principais atuadores térmicos encontrados na literatura, dando ênfase em aspectos térmicos e mecânicos dos dispositivos. Ao final, é feita uma simulação de ensaio de tração *in situ* de um corpo de prova de cobre;

- O capítulo 4 - Proposta de uma abordagem numérica alternativa - descreve um novo modelo alternativo para atuadores térmicos em formato de V, levando em conta propriedades físicas que dependam da temperatura, como condutividade térmica, resistividade elétrica e coeficiente de dilatação linear. O modelo alternativo também é usado para descrever deslocamento e distribuição de temperatura para materiais que não possuam dependência com a temperatura;
- No capítulo 5 - Materiais e métodos - são descritos os principais instrumentos usados para fabricação dos MEMS, as técnicas e rotas utilizadas para fabricação dos dispositivos para ensaio de tração, com e sem furo passante, das técnicas de medidas dentro do MEV e da fabricação dos instrumentos utilizados para obtenção de medidas dentro do microscópio, além do equipamento usado para fazer o mapeamento de temperatura do atuador eletrotérmico no ar;
- No capítulo 6 - Resultados e Discussão - são listados os resultados obtidos em conformidade com o programa de experimentos, que compreende a avaliação e análise da caracterização do dispositivo para ensaio de tração e comparação com o modelo numérico proposto;
- No capítulo 7 – Conclusão - são relatadas as conclusões dos experimentos realizados e discutidos no capítulo anterior, com vista aos objetivos e às hipóteses de trabalho consideradas no Capítulo 1 e no Capítulo 4. Também sugere trabalhos adicionais necessários para o preenchimento das lacunas de exploração deixada neste trabalho.

## 2. ESTADO DA ARTE EM MEMS

### 2.1. DISPOSITIVOS MICROELETROME CÂNICOS - MEMS

Sistemas microeletromecânicos (MEMS, do inglês: *Microelectromechanical Systems*) consistem em dispositivos atuadores ou sensores que podem coletar informação de um sistema ou responder a um sinal elétrico proveniente um circuito externo [17]. Grande parte dos dispositivos MEMS encontrados na literatura [18–27] baseia-se, principalmente, em materiais semicondutores como silício e isolantes como óxido de silício.

O silício é o material mais utilizado para construção dos MEMS devido as amplas técnicas e maquinário para fabricação de circuitos integrados utilizados nas indústrias, pelo vasto conhecimento das propriedades mecânicas, térmica e elétrica. Além disso, o material possui uma considerável viabilidade econômica para produção de substratos de alta pureza, rigidez semelhante à do aço inoxidável, densidade quase quatro vezes menor do que o aço, condutividade térmica superior (se comparado ao aço inoxidável, óxido de alumínio, óxido de silício e quartzo) [17,28]. A Tabela 2.1 mostra propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do silício monocristalino em comparação com outros materiais.

**Tabela 2.1** - Propriedades estruturais do silício e outros materiais. (Tabela retirada da referência [17])

Propriedades	Si {111}	Aço inox	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Quartzo
Módulo de Young (GPa)	190	200	70	303	73	107
Coefficiente de Poisson	0.22	0.3	0.33	0.21	0.17	0.16
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2.3	8	2.7	3.8	2.3	2.6
Tensão de escoamento (GPa)	7	3.0	0.17	9	8.4	9
Coef. de exp. térmica (10 <sup>-6</sup> /K)	2.3	16	24	6	0.55	0.55
Condução térmica a 300K (W/cm K)	1.48	0.2	2.37	0.25	0.014	0.015
Temperatura de fusão (°C)	1410	1500	660	2000	1700	1600

Basicamente, na fabricação de MEMS pode-se utilizar o Silício amorfo, policristalino e monocristalino [17,29]. Apesar disso, também são empregadas estruturas conhecidas com silício sobre isolante (SOI, do inglês: *silicon on isolator*) na manufatura de MEMS. Estruturas SOI são substratos compostos por uma camada de silício condutor monocristalino (com espessura da ordem de 5 um a 50 um, dependendo da aplicação), uma

camada isolante de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$  -normalmente de 2  $\mu\text{m}$ ) e uma camada manipuladora (*handler layer*) de Silício semiconductor (normalmente de 650  $\mu\text{m}$ ). O silício pode se tornar condutor com a introdução de impurezas como por exemplo fósforo, arsênio, antimônio e bismuto. A produção desse tipo de substrato é feita usando-se dois substratos de silício, onde se oxida a superfície do primeiro em um forno a 1300 °C e adere-se ao segundo a uma temperatura de 1100 °C. Em seguida, um dos lados é polido até chegar na espessura desejada [17].

Na Tabela 2.2 é mostrada característica elétrica e térmica do silício condutor, onde o Conjunto 1 mostra as propriedades físicas do silício policristalino, o Conjunto 2 mostra as propriedades físicas do silício monocristalino e o Conjunto 3 mostra as propriedades gerais do silício condutor, onde E é o Módulo de Young,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson, G é o módulo de cisalhamento,  $\rho$  é a resistividade elétrica,  $\kappa$  é a condutividade térmica e  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação linear.

**Tabela 2.2** - Resumo das propriedades mecânicas, térmicas e elétricas do silício condutor dopado.

	Módulo de Young <sup>a</sup>	$E = E_x = E_y = 169 \text{ GPa}$ $E_z = 130 \text{ GPa}$	[30]
	Coeficiente de Poisson <sup>a</sup>	$\nu = \nu_{zx} = 0.28, \nu_{yz} = 0.36$ $\nu_{xy} = 0.064$	[30-32]
	Coeficiente de cisalhamento <sup>a</sup>	$G_{yz} = G_{zx} = 79.6 \text{ GPa}$ $G_{xy} = 50.9 \text{ GPa}$	[30]
1	Resistividade elétrica <sup>b</sup>	$\rho(T) = \rho_0 [1 + \gamma(T - 273)] \Omega m$ $\rho_0 = 5.1 \times 10^{-5}, \gamma = 3 \times 10^{-3}$	[32,33]
	Condutividade térmica <sup>b</sup>	$\kappa(T) = 210658 T^{-1.2747} \text{ W}(mK)^{-1}$	[32-34]
	Coeficiente de expansão térmica <sup>b</sup>	$\alpha(T) = -4 \times 10^{-12} T^2 + 8 \times 10^{-9} T$ $+ 4 \times 10^{-7} K^{-1}$	[35]
2	Resistividade elétrica <sup>c</sup>	$\rho_{0p} = 13 \times 10^{-5} \Omega m$	[36]
	Condutividade térmica <sup>c</sup>	$\kappa_0 = 130 \text{ W}(mK)^{-1}$	[34,36]
	Coeficiente de expansão térmica <sup>c</sup>	$\alpha(T) = 3.725 \times 10^{-6} \{1$ $- \exp[1 - 5.88 \times 10^{-3}(T - 124)]\}$ $+ 5.548 \times 10^{-10} T K^{-1}$	[36,37]
3	Coeficiente de expansão térmica	$\alpha_0 = 2.6 \times 10^{-6} K^{-1}$	[10,12,37,38]
	Resistividade a partir de medidas experimentais <sup>d</sup>	$\rho_{0m} = (9.93 \pm 0.02) \times 10^{-5} \Omega m$	

<sup>a</sup> Propriedades mecânicas, <sup>b</sup> Propriedades elétricas/térmicas retiradas do trabalho de Zhu et al, <sup>c</sup> Propriedades elétricas/térmicas retiradas do trabalho de Pantano et al, <sup>d</sup> Resistividade experimental (cálculo mostrado no Capítulo 5.4)

Também, é apresentado um resumo das propriedades mecânicas do silício monocristalino condutor que foram utilizadas nas simulações mostradas nos capítulos seguintes, as quais levam em conta as características ortotrópicas<sup>a</sup> do Silício monocristalino [17,30].

O Conjunto 1 da Tabela 2.2 apresenta as propriedades físicas do Silício policristalino e dopado, cuja resistividade elétrica e a condutividade térmica são dependentes da temperatura. Filmes de Silício policristalino podem ser obtidos por meio de deposição química a baixa pressão (LPCVD, do inglês: *Low Pressure Chemical Vapor Deposition*) ou plasma assistido (PECVD, do inglês: *Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition*). Deposições por via química (e por vias físicas) normalmente possuem uma limitação na espessura máxima [17,39], o que faz com que seja mais comum a utilização de substratos SOI na indústria. Por causa da estrutura policristalina, o silício depositado por LPVCD possuiu rigidez mecânica isotrópica [39].

No conjunto 2 da Tabela 2.2 são apresentadas as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas para o silício monocristalino. No conjunto 3 da Tabela 2.2 são mostradas propriedades gerais e constantes do silício condutor, ou seja, propriedades que fornecem resultados aproximados para silício monocristalino e policristalino.

## 2.2. MICROATUADORES ELETROTÉRMICOS

Microatuadores eletrotérmicos (MAET) fazem parte de uma subclasse dos MEMS. Eles são dispositivos que utilizam energia térmica para realizar deslocamento no plano ou pra fora dele [40]. Os dispositivos MAET usam dilatação térmica para movimentar uma parte de sua estrutura. Este movimento é representado simplificadaamente por meio da seguinte equação:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T \quad (2.1)$$

, onde  $\Delta L$  é a dilatação de uma viga,  $L_0$  é o comprimento inicial de uma viga,  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação linear e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura. A variação de temperatura é avaliada

---

<sup>a</sup> Qualidade de material cujas propriedades mecânicas são únicas e dependem das direções ortogonais em que são observadas.

por meio da dissipação de calor por Efeito Joule através da passagem de corrente elétrica pelo dispositivo [41].

### 2.3. ATUADORES TÉRMICOS

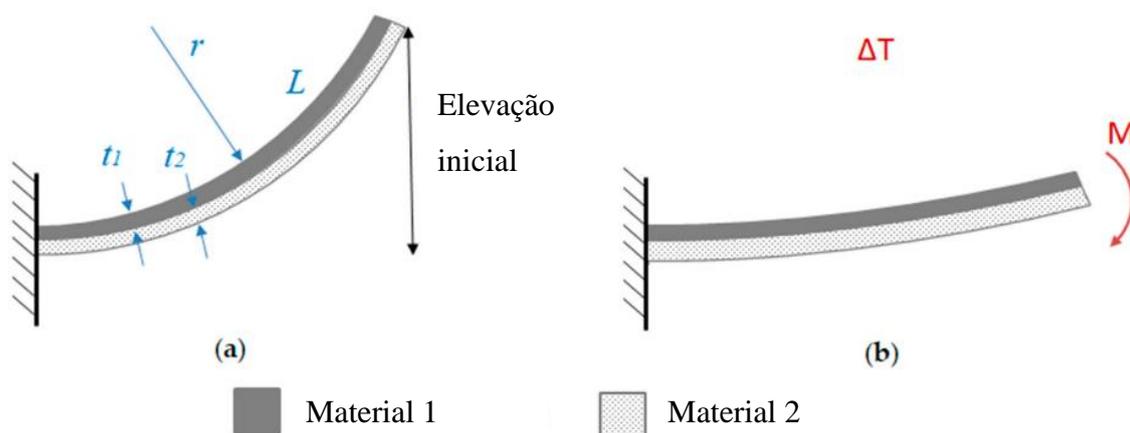
Um dos primeiros atuadores térmicos encontrados estudados na literatura são os atuadores térmicos bimórficos [42], que são dispositivos fabricados com dois (ou mais) materiais distintos que operam baseados na diferença entre os coeficientes de dilatação linear dos respectivos filmes utilizados. Um esquema do funcionamento de um atuador térmico bimórfico pode ser encontrado na Figura 2.1. Na figura, os dois filmes foram depositados sobre uma camada de sacrifício e depois houve uma liberação dessas estruturas, levando à uma elevação inicial por causa da tensão superficial. Quando submetido à variação de temperatura, a diferença de dilatação dos filmes gera um torque que movimenta a estrutura.

Petersen foi um dos primeiros cientistas a propor dispositivos MAET funcionando como relês. Basicamente, no dispositivo proposto, após a passagem de corrente elétrica, a viga de um *cantilever* realiza uma deflexão para realizar uma conexão elétrica, que por conseguinte a movimentação da válvula se dá pelo aquecimento e expansão térmica de dois materiais componentes do dispositivo. O processo de fabricação do dispositivo foi baseado no processo de fabricação de circuitos integrados que já era estabelecido na década de 60 e 70 [42].

A intensidade, direção e sentido do deslocamento do atuador no dispositivo pode ser controlado alterando o tipo de material, a ordem das camadas depositadas e o comprimento. Este avanço tecnológico foi alcançado na década de 80 por Riethmüller e Benecke [43]. Moser, Lenggenhager e Baltes [44] se basearam no Efeito Seebeck<sup>b</sup> para mostrar que o ajuste da configuração do *cantilever* pode ser usada para construir sensores de fluxo de gás. Na Figura 2.2 é mostrado o sensor de fluxo gás construído por Morse, Lenggenhager e Baltes que utiliza o Efeito Seebeck, de forma que a diferença de temperatura entre a ponta do *cantilever* e o substrato de silício é proporcional ao fluxo de gás que interage com a ponta do *cantilever*.

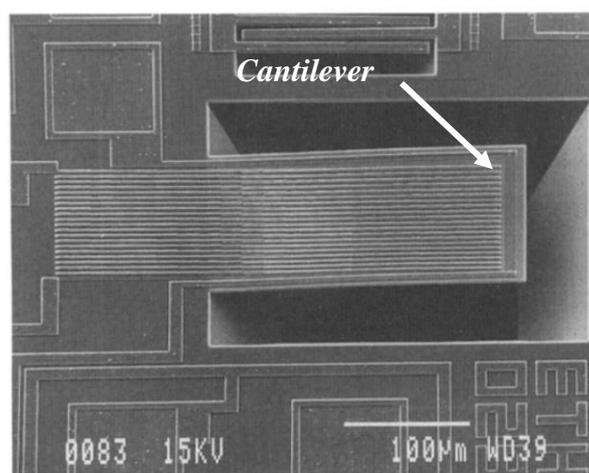
---

<sup>b</sup> Efeito Seebeck é a aparição de uma corrente elétrica quando dois materiais distintos e condutores, quando acoplados, são submetidos à uma diferença de temperatura [147].



**Figura 2.1** – Esquema de atuador bimórfico, onde  $r$  é o raio de curvatura,  $L$  é o comprimento do dispositivo,  $t_1$  é a espessura do primeiro filme (maior coeficiente de dilatação linear),  $t_2$  é a espessura do segundo filme (menor coeficiente de dilatação linear) e  $M$  é o torque sofrido pelo dispositivo com a elevação de temperatura (adaptado de [14]).

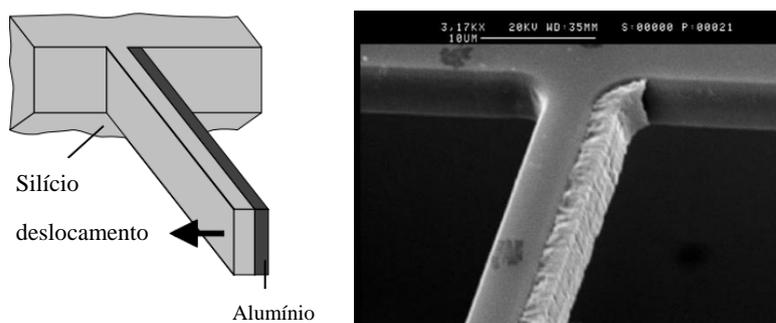
Parameswara e colaboradores [45] estudaram atuadores térmicos e mostraram a possibilidade de deslocamentos de até  $4 \mu\text{m}$  com potência de  $6 \text{ mW}$  aplicada e frequências de trabalho com ciclos até  $2 \text{ KHz}$ . Ainda, eles também mostraram que para MAETs em formato de *cantilever* o deslocamento máximo está relacionado com a frequência em que o dispositivo é acionado. Todavia, para geometrias de MAET suspensos em formato quadrangular, o deslocamento é praticamente constante conforme aumenta-se a frequência de trabalho.



**Figura 2.2** – Micrografia de um sensor de fluxo de gás baseado em atuador bimórfico (adaptado de [44]).

Atuadores térmicos em formato de *cantilever* baseados em substratos de GaAs e ligas de GaAs foram fabricados e testados por Lalinsky e colaboradores [46]. Eles utilizaram um diodo Schottky como sensor para medir a temperatura da ponta do *cantilever*. Por conseguinte, foi possível observar uma deflexão de 25  $\mu\text{m}$  com potência de 8 mW aplicada para uma resposta de 10ms (deflexão máxima).

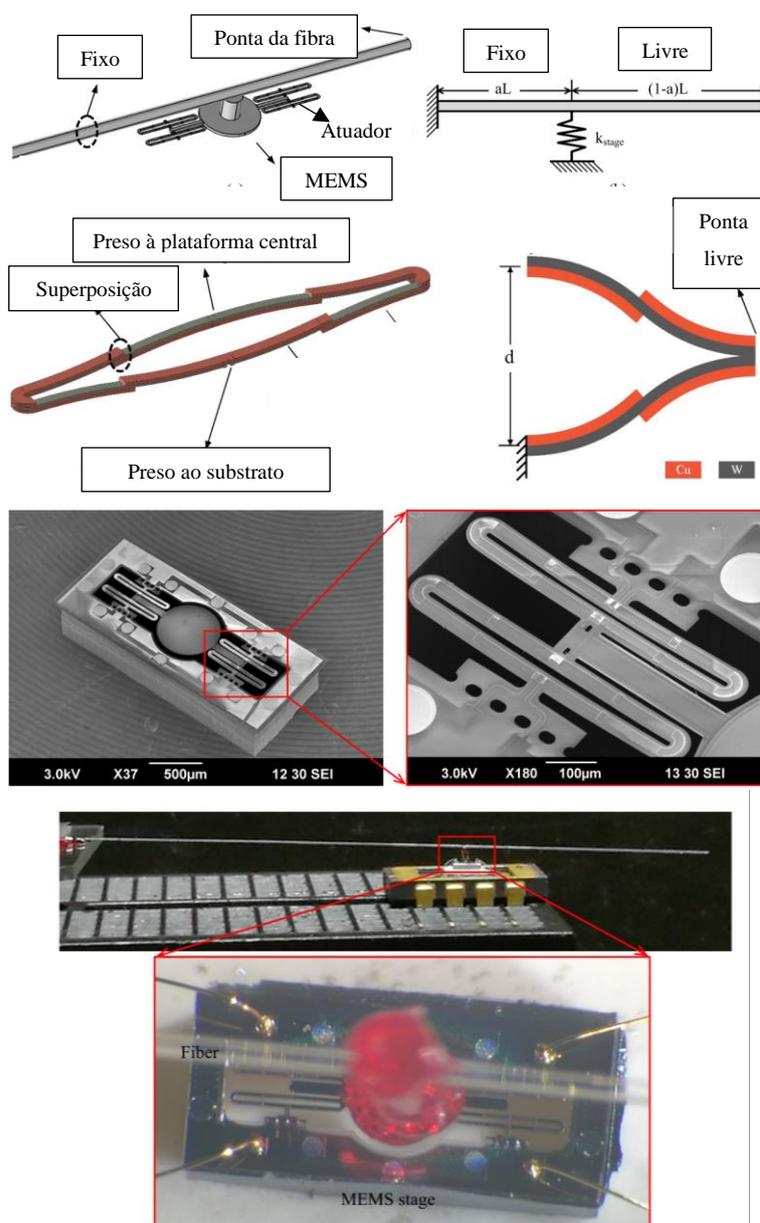
Potekhina e Wang [14] demonstraram que pela natureza da geometria dos atuadores bimórficos, não é possível que esses dispositivos realizem deslocamento vertical. Não obstante, Sehr e colaboradores [47] utilizaram uma rota engenhosa para fabricação de um dispositivo bimórfico que permite um deslocamento dentro do plano. A Figura 2.3 mostra o atuador bimórfico fabricado por Sher e colaboradores. O dispositivo é capaz de alcançar um deslocamento central de 4,5  $\mu\text{m}$  para uma potência de 3 mW aplicada.



**Figura 2.3** – Dispositivo bimórfico com movimento horizontal (adaptado de [47])

Zhou e colaboradores [48] propõem um dispositivo MAET baseado em atuadores bimórficos, capaz de movimentar uma plataforma circular para fazer o escaneamento de imagens com aplicações em microendoscopia. A Figura 2.4 mostra o dispositivo fabricado por Zhou e colaboradores. O dispositivo é construído utilizando-se dois filmes, cobre e tungstênio, com coeficiente de dilatação linear distintos, arranjados de tal forma que, quando aquecido, desloca precisamente uma plataforma circular ligada ao atuador térmico. O aquecimento é feito por meio de dissipação de calor por Efeito Joule, ou seja, com a passagem de corrente elétrica pelo atuador térmico, a diferença de dilatação térmica entre os filmes de cobre e tungstênio movimenta o atuador térmico para cima, puxando a plataforma circular na mesma direção. Para uma voltagem de 1,8 V, o dispositivo é capaz de gerar 0,7 mN de força, realizando um deslocamento vertical de até 53  $\mu\text{m}$ . Após a fabricação, Zhou e colaboradores prenderam na plataforma circular uma fibra ótica que foi utilizada para realizar escaneamentos de imagens, ou seja, com a aplicação de uma corrente elétrica a

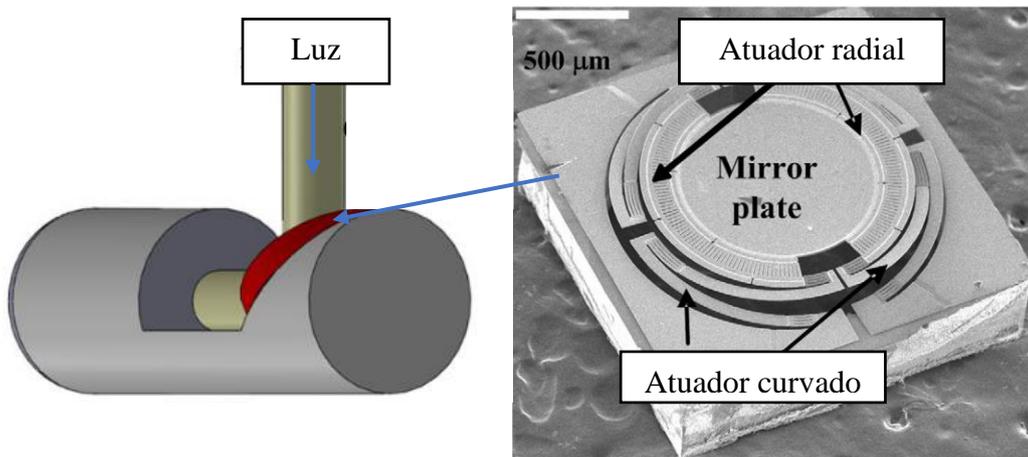
plataforma circular central se movimenta e a fibra ótica, que está presa a esta plataforma circular, faz o escaneamento.



**Figura 2.4** – Dispositivo de escaneamento de fibra ótica baseado em MAET bimórfico (adaptado de [48]).

Liu, Pal e Xie utilizaram atuadores bimórficos curvados e radiais para construir espelhos circulares de alumínio para escaneamento em 2D e 3D. Na Figura 2.5 é possível encontrar uma micrografia do espelho fabricado e um esquema da aplicação do MEMS. De forma semelhante ao dispositivo fabricado por Zhou e colaboradores mostrado no parágrafo anterior, a passagem de uma corrente elétrica permite a movimentação de uma plataforma circular onde foi depositado um metal para refletir a luz incidente. Cada braço do espelho é

feito de três atuadores de Al/W, e devido à geometria proposta, é possível movimentar o espelho em mais direções do que a configuração proposta por Zhou. Para baixas voltagens, uma inclinação de cerca de  $\pm 11^\circ$  é alcançada para uma voltagem de 0,6 V. Um deslocamento vertical de 227  $\mu\text{m}$  é alcançado quando uma voltagem de 0,8 V é aplicada.



**Figura 2.5** – Microespelho usando MAET bimórficos (adaptado de [49]).

## 2.4. ATUADORES TÉRMICOS EM FORMATO DE U

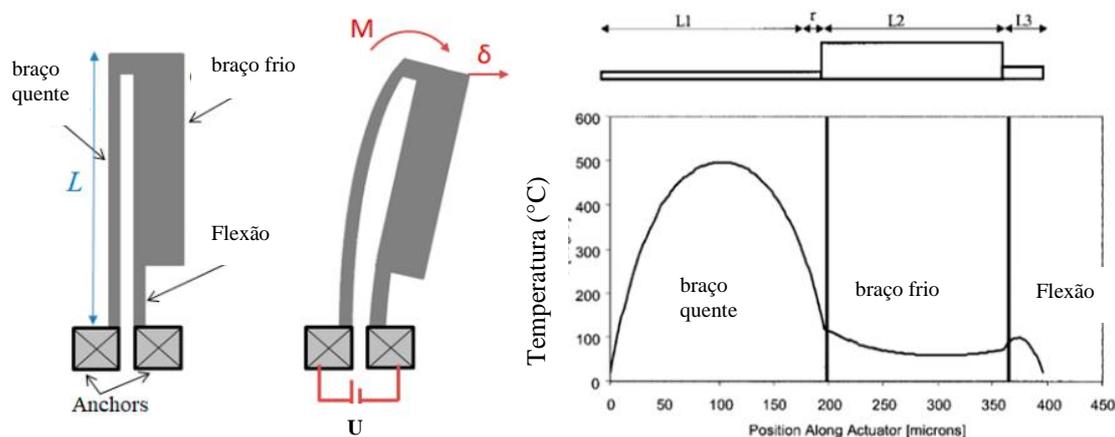
Atuadores térmicos em formato de U, ou também chamados de atuadores térmicos de dupla viga [50], utilizam vigas com largura e comprimentos distintos para realizar deslocamento dentro do plano. A Figura 2.6 mostra um esquema de um atuador térmico em formato de U e a distribuição de temperatura em cada viga. Devido ao fato de as vigas terem seções retas diferentes, a temperatura em um dos braços será maior (braço quente) em relação ao outro braço (viga fria). Essa diferença de temperatura proporciona um diferencial de dilatação térmica movimentando lateralmente o dispositivo.

Guckel [51], propõem que o deslocamento do MAET é regido pela seguinte equação

:

$$\Delta L = \frac{\alpha \Delta T L_0^2}{g \left( c_1 + c_2 \frac{h^2}{g^2} \right)} \quad (2.2)$$

onde  $h$  é a espessura,  $g$  é a separação entre as placas,  $L_0$  é o comprimento do braço quente e  $c_1$  e  $c_2$  são constantes que depende da seção reta das vigas. O cálculo da variação de temperatura é feito com base na variação da resistividade conforme o dispositivo aquece. Deste modo, medindo-se a resistividade é possível estimar a temperatura do dispositivo, desde que a resistividade mude com a temperatura.



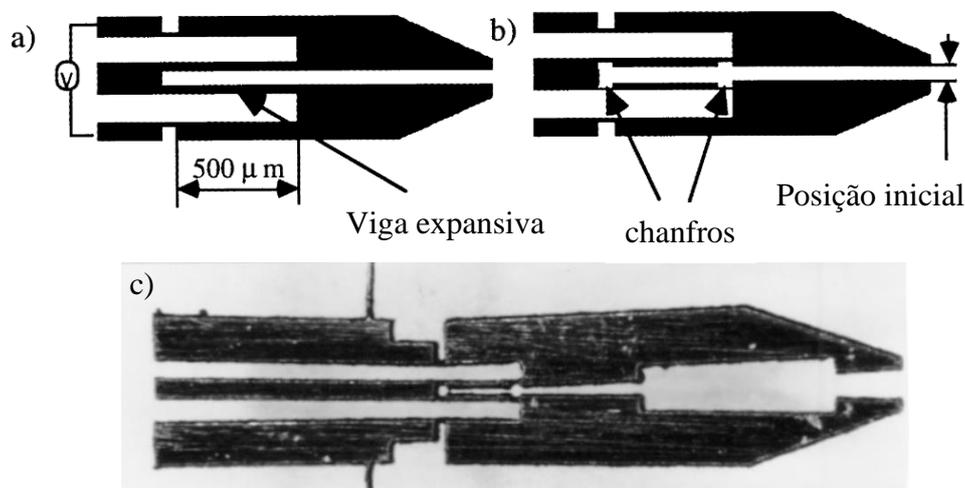
**Figura 2.6** – Esquema de MAET em formato de U, onde  $L_1$  (e  $L$ ) comprimento da viga quente,  $L_2$  comprimento da viga fria e  $L_3$  comprimento da viga de flexão (adaptado de [14]).

O material para fabricação do dispositivo MAET pode ser feito partir de qualquer filme condutor. Comtois [52] propõe a produção de um dispositivo que é composto pela combinação em paralelo de diversos atuadores em U. Este é capaz de deslocar  $10 \mu\text{m}$  para uma potência de 25 mW. O autor utilizou a equação (2.2) com os valores das constantes  $c_1$  e  $c_2$  sendo 0,77 e 0,38, respectivamente.

Lerch e colaboradores [53] basearam-se em atuadores em formato de U para construir micropinça, o qual permite a manipulação de pequenos objetos. Para uma corrente de 1 A, e um tempo de até 16ms, as micropinças proporcionam uma abertura de  $100 \mu\text{m}$ . Para uma outra configuração, pinças sem chanfros, é possível obter uma abertura de  $25 \mu\text{m}$  para uma corrente elétrica de 0,5 A. Na Figura 2.7 (a) e (b) é possível encontrar dois esquemas e uma micrografia ótica das micropinças.

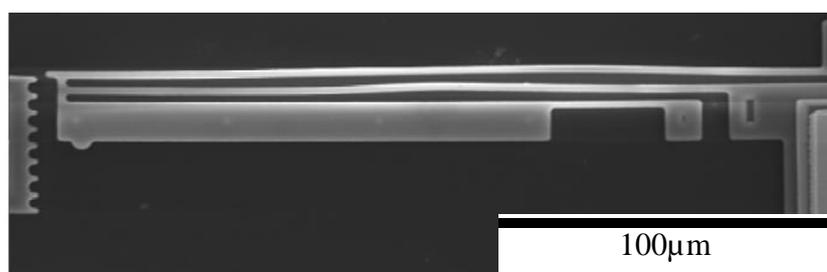
Lin e Chiao [54] tentaram pela primeira vez descrever o comportamento da temperatura das vigas de dispositivos MAET em formato de U quando submetidos a aplicação de uma diferença de potencial elétrico. Os autores se basearam em uma equação de conservação de calor em sólidos, e mostraram que a temperatura nas vigas do dispositivo MAET varia com o cosseno hiperbólico do comprimento, a partir dos valores da condutividade térmica e resistividade elétrica tomados como constantes. Em seus resultados

experimentais, os pesquisadores mostraram que o consumo de corrente elétrica aumenta com a largura da viga, e varia linearmente com a razão espessura/largura, chegando a valores de 70 mA para uma ddp de 15 V e até 15 mA para uma ddp de 25 V.



**Figura 2.7** – Micropinça baseada em atuadores térmicos em U (adaptado de [53]).

Em outra geometria semelhante, Burns e Bright [55], e Yan, Khajepour e Mansour [56] adicionaram uma segunda viga quente e com um comprimento maior, resultando em um dispositivo com duas vigas quentes e uma viga fria. A Figura 2.8 mostra uma micrografia de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para um atuador em formato de U com duas vigas finas de mesma seção reta e comprimentos distintos e uma terceira viga com seção reta maior. Os autores concluíram que a diferença de dilatação linear leva ao deslocamento na extremidade do dispositivo. Baseando-se nesse modelo de atuadores térmicos, Pan e Hsu [57] construíram uma micropinça de Silício policristalino dopado, onde foi possível alcançar deslocamentos de até 20 μm à temperaturas de 700°C para uma ddp de 12V resultando em uma força de 3,5 μN.

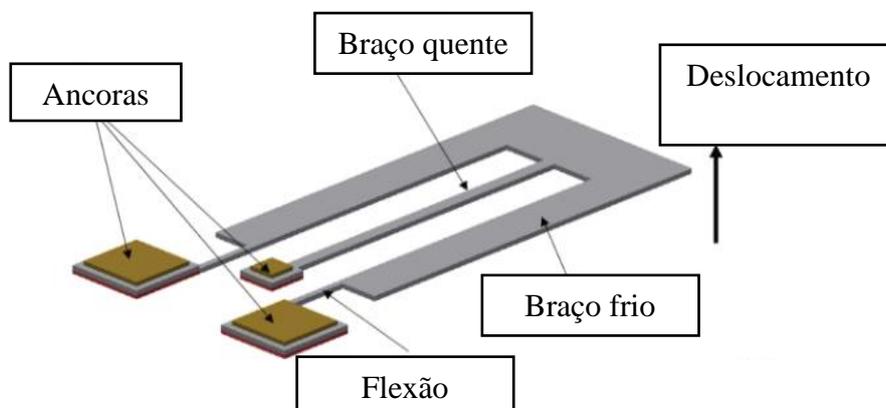


**Figura 2.8** – Micrografia de MEV de atuador térmico em U com três pernas (adaptado de [56]).

Butler, Bright e Cowan [58] desenvolveram um estudo sobre a influência do tempo de um pulso de onda quadrada (período de 32 ms) em atuadores térmicos em formato de U e em microespelhos movidos por atuadores térmicos. Os autores argumentam, também, que a perda de calor por radiação é uma grandeza física que deve ser considerada para temperaturas de trabalho acima de 1000 °C, pois a temperatura na viga de Si não é uniforme. Fora isso, também propuseram um espelho em formato de prato que é posicionado por atuadores térmicos.

Huang, Ka e Lee [59] propuseram uma equação para descrever analiticamente o comportamento de microatuadores térmicos em formato de U feitos de Si dopado e policristalino. No modelo proposto, a resistividade elétrica recebe uma característica de dependência linear em relação à temperatura; a condutividade térmica e o coeficiente de dilatação térmica são considerados independentes da temperatura. Da mesma forma que Butler, Bright e Cowan [58], o estudo de Huang, Ka e Lee [60] também mostra que a perda de calor por radiação térmica só se torna significativa para altas temperaturas. A razão entre a viga fria e a viga quente que otimiza o deslocamento no dispositivo tem valor igual a 0,9. Ainda, os valores para corrente e tensão elétrica são bem mais baixos em comparação com os respectivos valores encontrados por Lin e Chiao [54] (5 mA para uma ddp de 6 V para deslocamentos de até 17  $\mu\text{m}$ ).

Apesar dos atuadores térmicos em formato de U serem usados para deslocamento no plano, é possível usar uma configuração onde o atuador realize movimento para fora do plano. A Figura 2.9 mostra um esquema para um atuador térmico que realiza deslocamento para fora do plano.

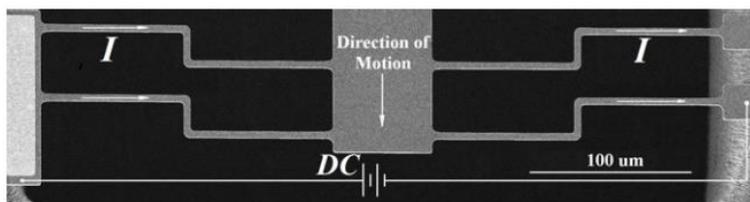


**Figura 2.9** – Configuração de dispositivo MAET em U para deslocamento fora do plano (adaptado de [60]).

Esta configuração possui um braço quente e dois frios. Os braços frios são ligados no mesmo terminal e o braço quente em outros, de forma que a corrente flui dos braços frios para o quente (ou vice-versa). Como a dilatação térmica do braço quente é maior do que a do frio, e como o braço quente está limitado a se mover no plano, a resultante das forças move o dispositivo para cima. Neste contexto, Lara-Castro e colaboradores [61] estudaram um sistema baseado em atuadores térmicos em formato de U com a possibilidade de movimentação do espelho com deslocamento fora do plano.

Em 2010, Guan e Zhu [62] propuseram um novo tipo de dispositivo MAET o qual batizaram de atuador térmico em formato de Z. A Figura 2.10 mostra um atuador térmico em formato de Z. Esse tipo de dispositivo possui um arranjo composto de dois pares de vigas verticais ligados por uma viga a 90°. Com a passagem de corrente elétrica, as vigas dilatam e movimentam a plataforma central. A rigidez dos atuadores térmicos feito de apenas um material (formato de U, Z e V) tem seu deslocamento e sua rigidez alterada por causa da geometria, isso significa que seção reta, comprimento e inclinação das vigas alteram a rigidez (*stiffness*) e o deslocamento máximo do dispositivo [62–65]. A geometria deste dispositivo possui uma rigidez pequena, ficando entre os dispositivos em formato de V (Capítulo 2.5) e os atuadores eletroestáticos (Capítulo 2.7). Pela lei de Hook, rigidez vezes o deslocamento fornece a força gerada pelo dispositivo [66], isso significa que dispositivos com baixa rigidez são bons sensores de carga e dispositivos com alta rigidez são bons atuadores. Por possuírem uma baixa rigidez, os atuadores térmicos em formato de Z podem ser usados como célula de carga. Também, são estruturas mais compactas e podem oferecer um deslocamento considerável quando comparado aos atuadores em V [62]. As vigas centrais nestes atuadores possuem maior influência de parâmetros como deslocamento, rigidez, estabilidade e força.

De acordo com Ouyang e Zhu [32] os dispositivos em formato de Z podem ser usados como sensores piezoresistivos com um sistema de sinal de retroalimentação (*feedback system*). O deslocamento pode chegar a 1,6  $\mu\text{m}$  para uma corrente aplicada de 9 mA. A sensibilidade do dispositivo depende da corrente de alimentação. Quando utilizado como sensor uma tensão de  $\sim 6\text{ V}$  proporciona uma força de 0,36 mN.

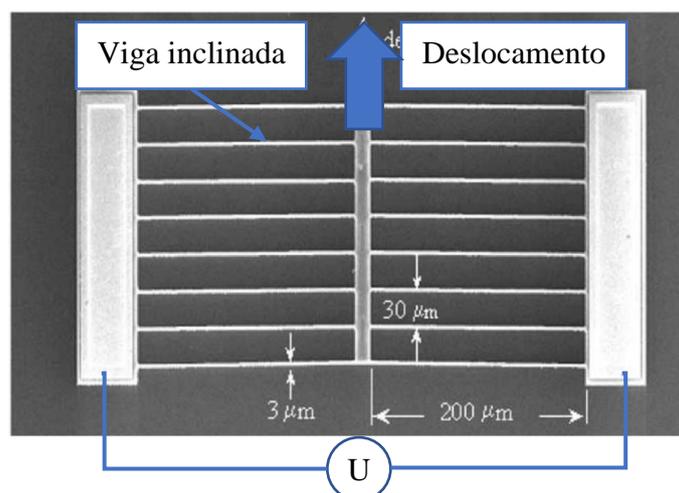


**Figura 2.10** – Atuador térmico em formato de Z (adaptado de [62]).

Zhang e colaboradores [67–69] apresentaram um modelo analítico considerando as propriedades físicas do material do dispositivo independente da temperatura. Desta forma, é possível obter o deslocamento e a força dos atuadores térmicos em V e Z tanto no vácuo quanto no ar. A aplicação do modelo analítico e a simulação MEF demonstrou que o tempo de resposta do atuador é de menos de 10 ms tanto para atuadores em Z quanto em V. Ainda demonstraram que a relação entre o deslocamento e a força como um modelo físico pode ser uma constante elástica linear. Logo, os atuadores em V possibilitam maior força e deslocamento do que atuadores em Z.

## 2.5. ATUADORES TÉRMICOS EM FORMATO DE V

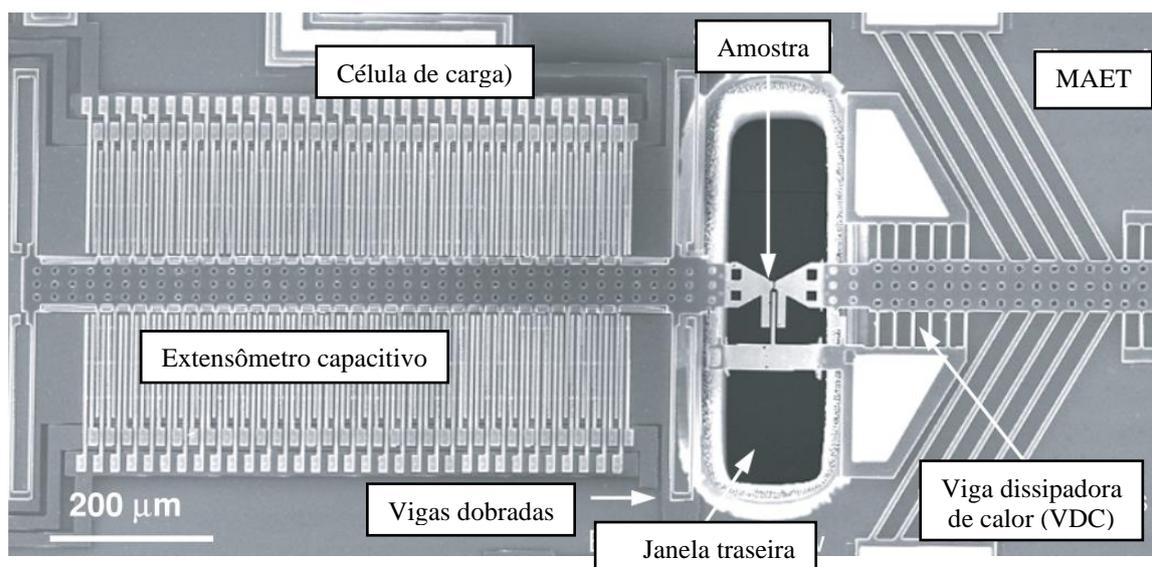
Dispositivos MAET em formato de V utilizam da dilatação de vigas inclinadas de um material condutor para movimentar uma plataforma central. A Figura 2.11 é uma micrografia de MEV de um atuador térmico em formato de V. A passagem de corrente elétrica entre as vigas inclinadas gera uma dilatação térmica proveniente da dissipação de calor por Efeito Joule. Por simetria, a resultante da força (gerada pelas vigas) ortogonal ao deslocamento se anula, fazendo com que a componente na direção do deslocamento atue sobre a plataforma central, movimentando-a. Dispositivos em formato de V possuem a vantagem de possuir alta rigidez, proporcionando maior força em relação a outros tipos de dispositivos [70,71]. Por este motivo, os atuadores em formato de V são comumente utilizados para ensaio de tração de filmes finos ou nano tubos [72–75].



**Figura 2.11** – Micrografia de dispositivo MAET em V de silício policristalino (adaptado de [76])

Os cientistas Zhu, Maldovan e Espinosa [77] mostraram pela primeira vez que atuadores térmicos em formato de V podem ser utilizados em experimentos para realização de testes de tração em nanotubos de carbono, nanofios e filmes finos. Na Figura 2.12 é mostrada um atuador térmico em formato de V utilizado para ensaio de tração dentro do Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET). O dispositivo é acoplado à uma célula de carga utilizada para medir a força na amostra. Como o deslocamento da célula de carga é muito pequeno, os autores utilizaram um extensômetro capacitivo (Ex.C) para medir o deslocamento. Ademais, conjuntos de pares de vigas possibilitam o escoamento de parte do calor produzido da ação do dispositivo para o substrato, assim, sendo denominadas de vigas dissipadoras de calor. A grande vantagem de atuadores térmicos em formato de V é a capacidade de estudar os mecanismos de deformação<sup>c</sup> de um material por meio do potencial de tração. Esta pode ser considerada uma ferramenta muito poderosa para o avanço da pesquisa em materiais quando submetidos a algum tipo de esforço, como também pode apoiar as pesquisas em materiais com baixa dimensionalidade associada principalmente a sua dificuldade de manipulação.

<sup>c</sup> Define-se como deformação a variação do comprimento em relação sobre o comprimento inicial, ou seja,  $\Delta L/L_0$ .



**Figura 2.12** - Micrografia de dispositivo para ensaio de tração em MET (adaptado de [39]).

Depois dos trabalhos de Zhu, Moldovan e Espinosa foi possível estudar materiais *in situ* principalmente utilizando o MET como ferramenta de apoio ao dispositivo manufaturado. Pode-se destacar principalmente que esta tecnologia foi fundamental para pesquisas de alto impacto em materiais como: nanotubos de carbono [78], filmes de alumínio [79,80], nanofibra de carbono [73,81], nanofio de nitreto de gálio [82,83], nanofio de silício [84], nanofilme cristalino de níquel [85,86], nanofilme de Ouro [87,88], nanofio de Prata [36,89].

O estudo de rigidez em dispositivos em formato de V foi proposto por Zhu, Corigliano e Espinosa, [39,90]. A equação apresentada por eles é descrita da seguinte forma:

$$K_{MAET} = \frac{2Ebh}{L_0} \left[ \text{sen}^2(\theta) + \cos^2(\theta) \left( \frac{b}{L_0} \right) \right]$$

$$K_{vdc} = 2Eh \left( \frac{b_{vdc}}{L_{vdc}} \right)^3 \quad (2.3)$$

$$K_{tot} = m K_{MAET} + n K_{vdc}$$

$$\Delta L_{tot} = \frac{2m\alpha\Delta T E h b \text{sen}(\theta) + F}{K_{tot}}$$

onde  $K_{MAET}$  é a rigidez do dispositivo MAET,  $b$  é a largura das vigas dilatantes,  $h$  é a espessura do dispositivo,  $\theta$  é a inclinação das vigas dilatantes e  $L_0$  é seu comprimento inicial,

$K_{VDC}$  é a rigidez gerada pelas vigas dissipadoras de calor,  $b_{VDC}$  e  $L_{VDC}$  são respectivamente a largura e o comprimento das vigas dissipadoras de calor,  $m$  é o número de pares de vigas inclinadas,  $n$  é o número de pares de vigas dissipadoras de calor e  $K_{tot}$  é a rigidez da parte tratora do dispositivo. Finalmente, o deslocamento do dispositivo pode ser calculado com base na sua variação de temperatura média ( $\Delta T$ ) levando em consideração uma força  $F$  externa. O deslocamento máximo nesta configuração é obtido quando a inclinação das vigas está entre  $0^\circ$  e  $5^\circ$ . Abaixo de  $5^\circ$  tem-se uma alta probabilidade de as vigas inclinadas flambarem<sup>d</sup> devido a resultante das forças ortogonais ao movimento. Para valores acima de  $10^\circ$  a probabilidade de flambar é muito baixa, assim, tornando o dispositivo mais estável. Ainda, quanto maior a inclinação das vigas inclinadas maior será a rigidez do MAET.

Segundo Zhu e colaboradores [39], o termo  $\Delta T$  na equação (2.3) pode ser calculado tomando a média da temperatura de todo o dispositivo partindo da equação de resistividade térmica (apresentada na Tabela 2.2, página 23). As equações são válidas para materiais em que a sua resistividade elétrica mude com a temperatura. Neste mesmo contexto, no capítulo 4 será apresentada uma proposta alternativa para o cálculo da temperatura e deslocamento do dispositivo.

Dispositivos para ensaio de tração uniaxial podem ser resumidos em três configurações, conforme mostra no Figura 2.13, onde: o triângulo é a representação para um atuador (térmico ou eletroestático), o anel é a representação de um atuador externo e o retângulo é a representação de uma célula de carga. Na configuração 1 os dispositivos são compostos somente pelo atuador térmico e, para um dado valor para rigidez conhecido a partir do deslocamento é possível saber exatamente a força que está sendo exercida sobre a amostra, que está anexada a uma plataforma fixa. Na configuração 2 o tracionamento é realizado através de uma força externa aplicada ao sistema, e uma célula de carga é utilizada para medir esta grandeza. Na configuração 3 o sistema é composto por um atuador térmico (eletroestático) e uma célula de carga.

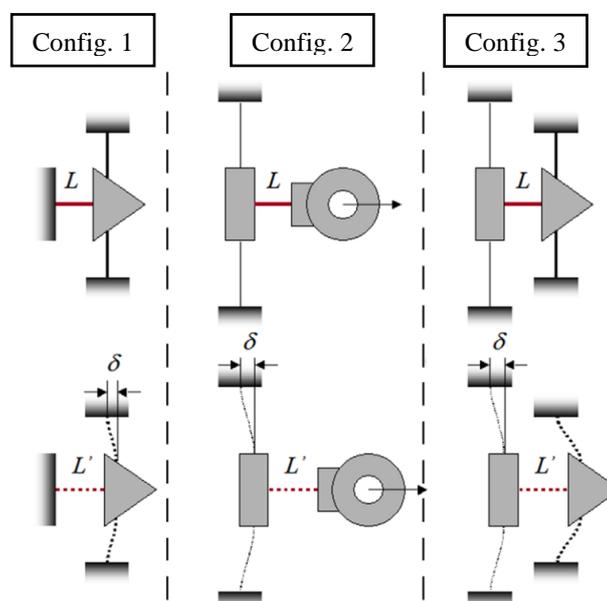
Utilizando um atuador térmico em formato de V, Agrawal e colaboradores [91] realizaram um teste de tração em nanofios de Óxido de Zinco *in situ* no MET. Foi possível medir o módulo de Young do material em sua direção [0001] como função do diâmetro do fio. Os autores demonstraram que o módulo de Young muda com o diâmetro do nanofio de ZnO, tendo como resultante: 140 GPa para um diâmetro de 80 nm e 160 GPa para um

---

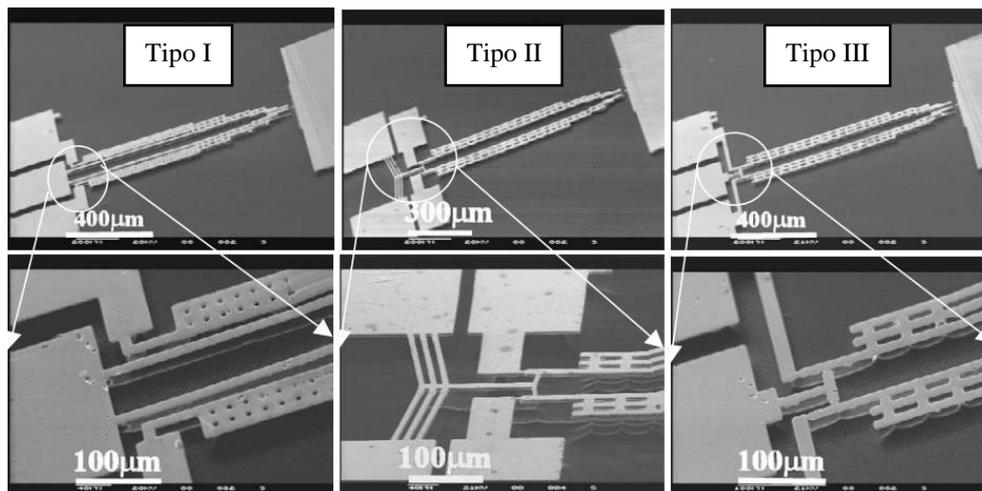
<sup>d</sup> Flambagem é um fenômeno que ocorre quando uma viga sofre uma flexão transversal durante um esforço axial [65].

diâmetro de 20 nm. Para comprimentos maiores, o módulo de Young assemelha-se ao de materiais massivos.

A partir de atuadores em formato de V e U, Luo e colaboradores [92] fabricaram micropinças de Ni utilizando a técnica de eletrodeposição. A Figura 2.14 mostra as micropinças de Ni movidas por atuadores térmicos em V e em U. As micropinças foram capazes de proporcionar uma abertura de  $35\ \mu\text{m}$  à  $500\ ^\circ\text{C}$ . As micropinças baseadas em atuadores em formato de U possuem menor deslocamento (abertura da pinça) se comparado com as pinças baseadas em atuadores em formato de V. Contudo, as micropinças do tipo V consomem mais energia do que as do tipo U.



**Figura 2.13** – Três configurações mais comuns de dispositivos para ensaio de tração uniaxial. As representações são: Triângulo = atuador, retângulo = célula de carga e anel = atuador externo.  $L$  é o comprimento da amostra, e  $\delta$  é a deformação da amostra (adaptado de [93]).



**Figura 2.14** – Micropiças de Ni fabricadas por eletrodeposição (adaptado de [92])

Atuadores térmicos em formato de V com sistemas de microalavancas, gatilhos e deslizadores foram propostos por Hu e colaboradores [94]. O sistema proposto por eles é capaz de proporcionar deslocamentos de até 1 mm para um voltagem de 11 V gerando uma força de 15 mN. O dispositivo possui como principais características a possibilidade em deslocar-se linearmente possuir baixo consumo de potência.

Huang, Liao e Yang, [95] propuseram um sistema com um tipo de interruptor, o qual é movido por atuadores térmicos em formato de V com vigas curvadas. A Figura 2.15 mostra dois esquemas e duas micrografias de MEV para o dispositivo com interruptores movidos por atuadores térmicos em formato de V proposto por Huang, Liao e Yang. Os atuadores realizam trabalho que possibilita uma mudança de caminho da luz. Quando o comprimento da viga do atuador chega a 4 mm o dispositivo é capaz de realizar deslocamentos de até 100  $\mu\text{m}$  com 40 V. Nas mesmas condições, de operação, porém para um comprimento de 3 mm, o deslocamento alcançado é de 80  $\mu\text{m}$  para uma voltagem de 40 V.

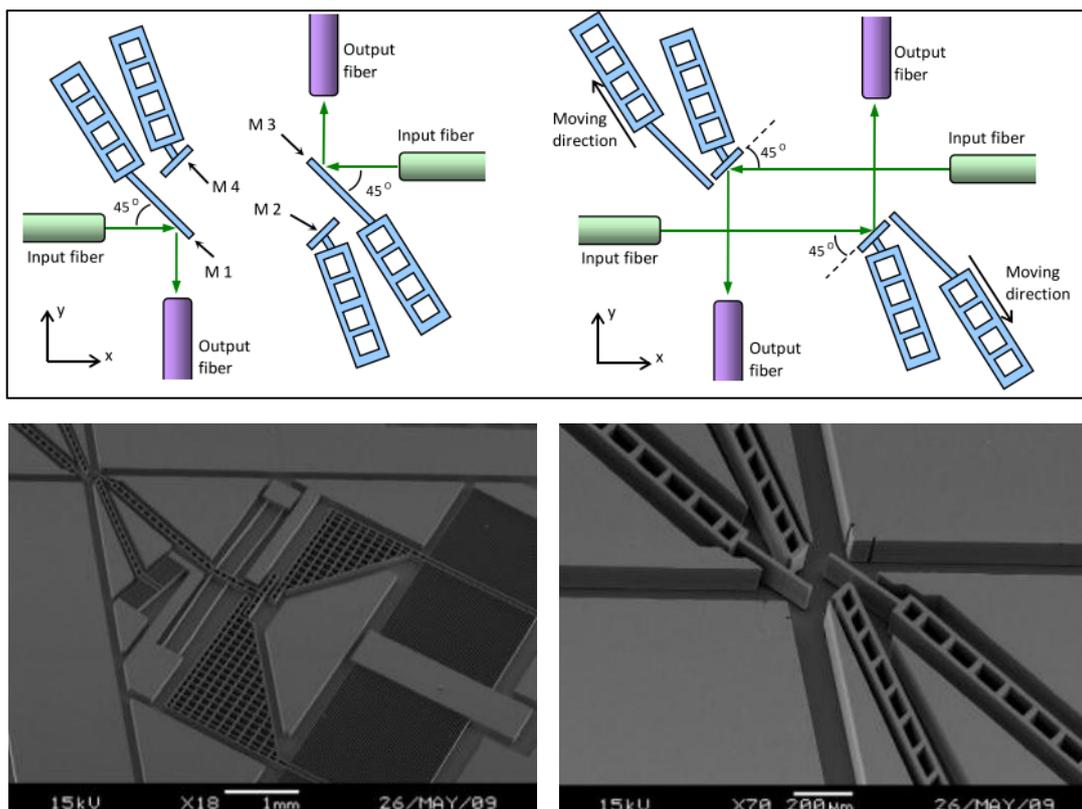
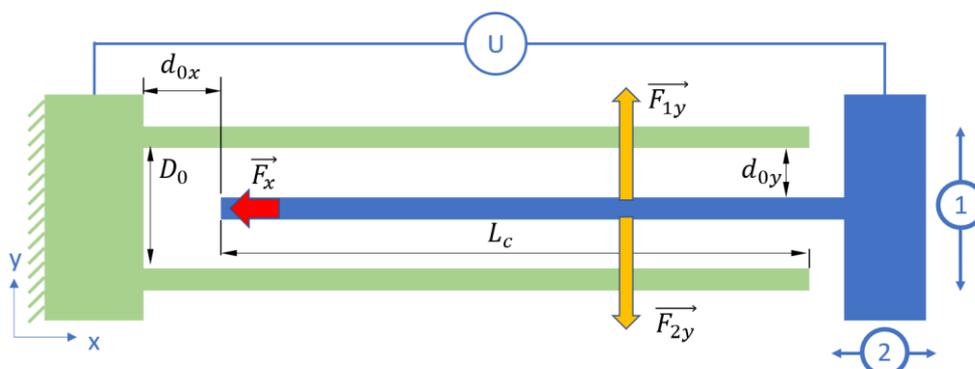


Figura 2.15 – Interruptores óticos feitos com atuadores em V (daptado de [95]).

## 2.6. ATUADORES/SENSORES ELETROSTÁTICOS

Atuadores/sensores eletrostáticos são dispositivos que possuem a capacidade de realizar ou medir precisamente um deslocamento por meio da aplicação (ou amplificação) de um sinal elétrico [96]. A Figura 2.16 mostra um esquema de um atuador eletrostático,  $d_{0x}$  é a distância inicial na direção  $x$ ,  $D_0$  é a distância entre as vigas fixas,  $F_x$  é o módulo da força na direção  $x$ ,  $d_{0y}$  é a distância inicial na direção  $y$ ,  $L_c$  é o comprimento da viga do capacitor, e  $F_{1y}/F_{2y}$  são as forças na direção  $y$ . Os dois principais tipos de atuadores eletrostáticos de placas paralelas encontrados na literatura são [50,77,90,96–99]: atuadores com movimentação de placa transversal, onde o movimento do dispositivo é transversal à placa, com o movimento na direção  $y$  (seta amarela Figura 2.16), e atuadores com deslocamento longitudinal na direção  $x$  (seta vermelha Figura 2.16), onde o deslocamento da plataforma central está na mesma direção das vigas energizadas. Os atuadores transversais também são chamados de atuadores-sensores de placas paralelas (*parallel-plate*) e os atuadores longitudinais de atuadores-sensores interdigitais (*comb-fingers*) [50]. Como já mencionado, os dispositivos eletrostáticos podem ser utilizados como atuadores ou sensores, ambos possuem duas partes fixas (eletrodos) e uma parte móvel (plataforma central). As partes fixas

situam-se nas extremidades e a parte móvel no centro (entre as partes fixas), onde uma ddp  $U$  é aplicada entre as partes fixas gerando uma força eletrostática que movimenta a plataforma central. Na configuração geométrica interdigital a viga móvel é colocada equidistante das vigas fixas, proporcionando uma força resultante na direção horizontal, movimento na direção 2 da Figura 2.16.



**Figura 2.16** – Esquemático de capacitores de vigas paralelas e interdigitais.

A configuração interdigital é comumente utilizada como atuador em vez de sensor [100], e a capacitância para esta configuração pode ser representada pela seguinte equação [97]:

$$C(x) = \frac{\epsilon h(d_{0x} + x)}{d_{0y}} \quad (2.4)$$

, onde  $C$  é a capacitância entre as placas,  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do meio,  $h$  (direção  $Z$ ) é a espessura das placas,  $d_{0y}$  é a distância fixa entre as placas dos capacitores,  $d_{0x}$  é a distância inicial e  $x$  é o deslocamento da plataforma. A energia potencial acumulada por um capacitor pode ser descrita da seguinte forma [97]:

$$E_{pe} = \frac{CU^2}{2} \quad (2.5)$$

onde  $E_{pe}$  é a energia potencial elétrica entre as placas do capacitor,  $F_e$  é a força entre as placas do capacitor. A força gerada por um atuador eletrostático de placas interdigitais pode ser calculada através da variação infinitesimal da energia potencial elétrica como mostra a seguinte equação [97]:

$$F_{ex} = \frac{U^2}{2} \frac{\partial C(x)}{\partial x} = \frac{\epsilon h}{2d_{0y}} U^2 \quad (2.6)$$

Como pode-se observar, a força do atuador de placas interdigitais não depende do deslocamento, e aumenta com o quadrado da ddp U aplicada entre os terminais.

Para a configuração do tipo placas paralelas (movimento na direção 1 - ver Figura 2.16), a capacitância pode ser representada conforme a equação [97]:

$$C(y) = \frac{\epsilon h L_c}{d_{0y} - y} \quad (2.7)$$

Tomando a primeira derivada da eq. 2.5 é possível obter uma expressão para a força eletrostática, onde obtemos [97]:

$$F_{ey}(y) = \frac{\epsilon h L_c U^2}{2} \frac{1}{(d_{0y} - y)^2} \quad (2.8)$$

Quando se utiliza a configuração geométrica de placas paralelas a viga móvel é colocada próxima de uma das vigas fixas (cerca de  $2\mu\text{m}$ ) visando intensificar o campo elétrico, a força eletrostática e a capacitância, pois a força e a intensidade da capacitância variam com o inverso da distância inicial, como mostrado na equação (2.6). Quando utilizado como sensor, o dispositivo recebe energia nas partes fixas através de uma fonte alternada de alta frequência (de 1 a 5 MHz) onde é possível medir a variação de capacitância (da ordem de pF) [39,72,77,90,98,101]. Adicionalmente, a capacitância pode ser melhorada

com o aumento da quantidade de vigas paralelas proporcionalmente à sua espessura e comprimento.

Em dispositivos para ensaio de tração com extensômetro capacitivo junto da célula de carga (ver Figura 2.12 e Figura 2.14), a medida de capacitância é feita de forma diferencial e pode ser calculada utilizando a seguinte equação [102]:

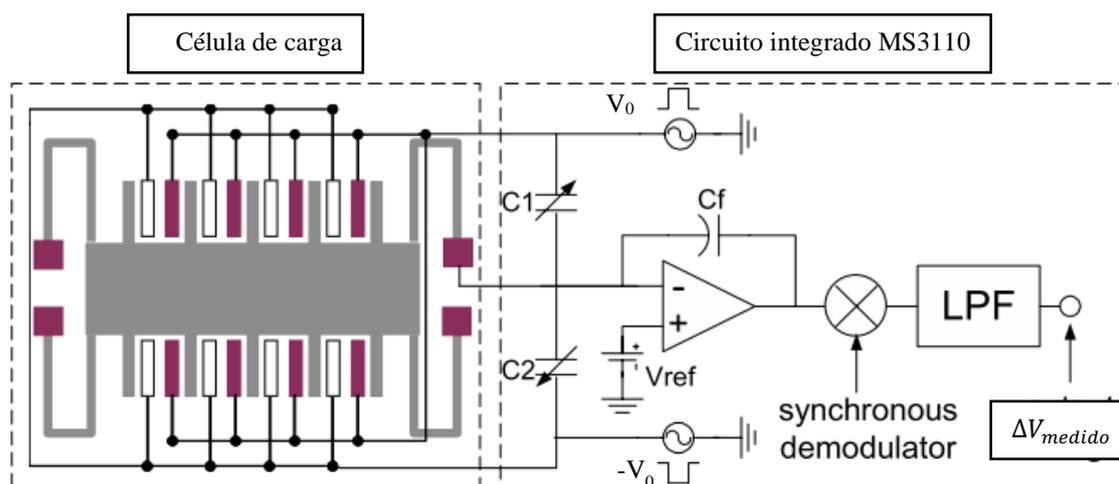
$$\Delta C = C_1 - C_2 = N \epsilon A \left( \frac{1}{d_0 - \Delta d} - \frac{1}{d_0 + \Delta d} \right)$$

$$\Delta C \approx \frac{2N\epsilon h L_c}{d_{0y}^2} \Delta y \quad (2.9)$$

, onde  $N$  é a quantidade de capacitores diferenciais e  $\Delta y$  é o deslocamento. Nessa configuração do dispositivo, a variação de capacitância é linearmente proporcional ao deslocamento. Para medir a capacitância, Zhu, Espinosa e Corigliano [39] utilizaram um circuito integrado comercial MS3110 (Microsensor da marca Costa Mesa e modelo CA) acoplado à plataforma de medida *in situ* no MEV. O chip permite a aplicação de um sinal oscilante de alta frequência, medindo uma variação de sinal que é proporcional à variação da capacitância. A representação teórica abordando estas variáveis é escrita da seguinte forma [90]:

$$\Delta V_{medido} = \frac{V_0}{C_f} \Delta C \quad (2.10)$$

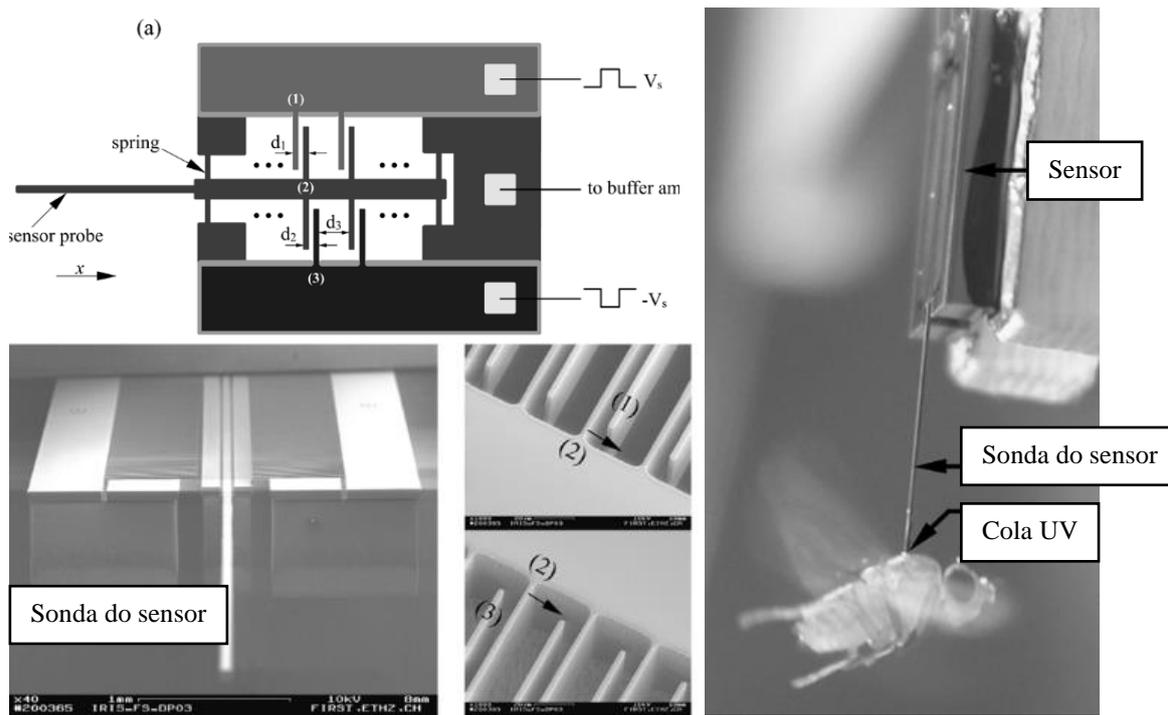
, onde  $V_0$  é a amplitude do sinal de excitação nos terminais fixos e  $C_f$  é a capacitância de referência conforme mostrado na Figura 2.20.



**Figura 2.17** – Esquema para medida de variação de capacitância com o MS3110 (adaptado de [39]).

Devido à alta sensibilidade na medida do deslocamento, os chamados extensômetros capacitivos possuem uma gama de aplicações. Sun e colaboradores [103] utilizaram um tipo de configuração de acelerômetros para medir a força e o deslocamento gerados por um inseto (mosca) em movimento. Na Figura 2.18 é possível encontrar um esquemático, uma micrografia de MEV e uma fotografia do sensor utilizado para caracterizar a mosca. O dispositivo é fabricado sobre um substrato SOI com 50  $\mu\text{m}$  de silício condutor e apresenta 0,68  $\mu\text{N}$  de resolução, 1280 N/m de rigidez, 1,35 mV/ $\mu\text{N}$  de sensibilidade, com comprimento de placas dos capacitores de 500  $\mu\text{m}$  por 5  $\mu\text{m}$  separadas por 5  $\mu\text{m}$ .

Yamahata e colaboradores [104] estudaram micropiças de silício acionadas eletrostaticamente destinadas à manipulação e caracterização de moléculas filamentosas. A Figura 2.19 mostra um esquema, uma fotografia e uma micrografia de MEV da micropiça fabricada por Yamahata e colaboradores. O dispositivo consiste de um par de pontas de silício opostas cuja distância pode ser ajustada por um sensor capacitivo. O processo de fabricação é baseado em substrato SOI. O dispositivo mostrou um deslocamento máximo de cerca de 2,5  $\mu\text{m}$  com uma resolução maior que 0,2 nm e força de 10 nN. O instrumento foi utilizado para manipulações de moléculas de DNA.



**Figura 2.18** – Sensor eletroestático utilizado para medir força gerada por mosca (adaptado de [103])

Da mesma forma, Beyeler e colaboradores [105] também mostram uma micropinça com força gerada por um dispositivo eletrostático e um sensor de força capacitivo integrado, com um sistema de retroalimentação. Na Figura 2.20 é possível encontrar o dispositivo fabricado por Beyeler e colaboradores. Quando o atuador é excitado com uma voltagem de 110V, o dispositivo realiza com uma abertura de  $50\mu\text{m}$ . O sensor de deslocamento possui uma sensibilidade de  $0,55\text{mV}/\mu\text{N}$ , com uma resolução de força de  $0,52\mu\text{N}$ . A variação do sensor capacitivo varia de  $2,1\text{pF}$  a  $6,1\text{pF}$ .

Zhang e outros pesquisadores [99,106] propuseram um atuador eletroestático fabricado sobre substratos SOI baseado em dispositivos interdigitais (*Comb-fingers*), para realização de teste de tração *in situ* no MET para amostras uniaxiais (nanofios de carbono, por exemplo). Na Figura 2.21 é possível encontrar um esquema e uma micrografia de MEV do dispositivo eletrostático fabricado por Zhang e outro colaboradores. O dispositivo possui um extensômetro capacitivo para medir o deslocamento durante o teste de tração. Ainda que seja possível utilizar atuadores eletroestáticos para executar teste de tração *in situ*, é necessário a aplicação de uma voltagem de 100V ou mais para alcançar a força necessário para o ensaio de tração [99,106]

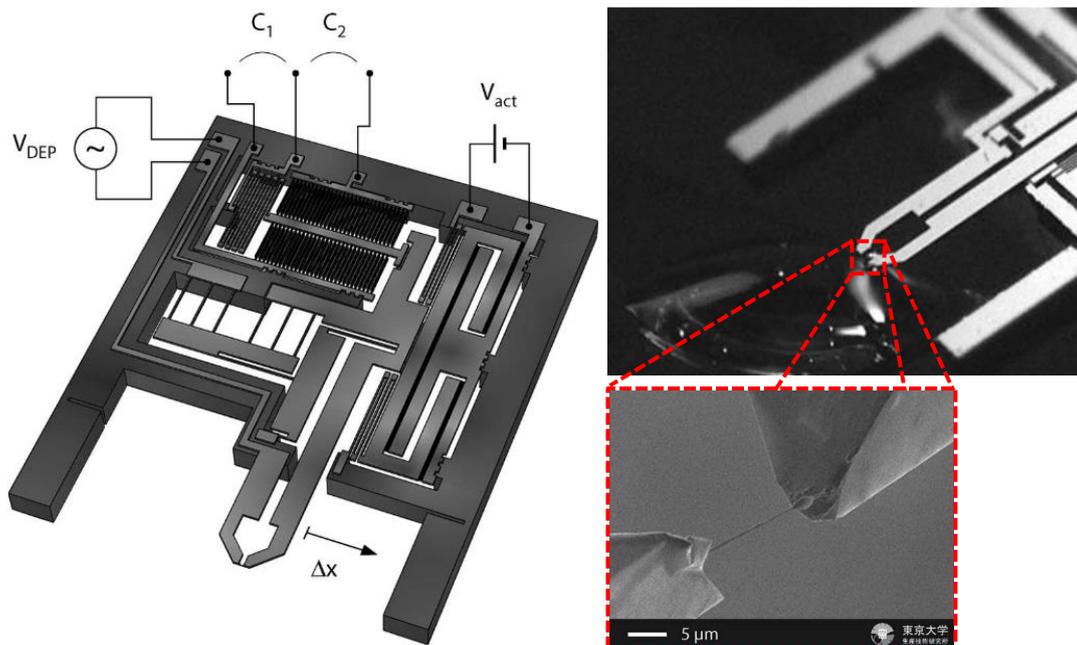


Figura 2.19 – MEMS eletroestático para manipulação de DNA (adaptado de [104]).

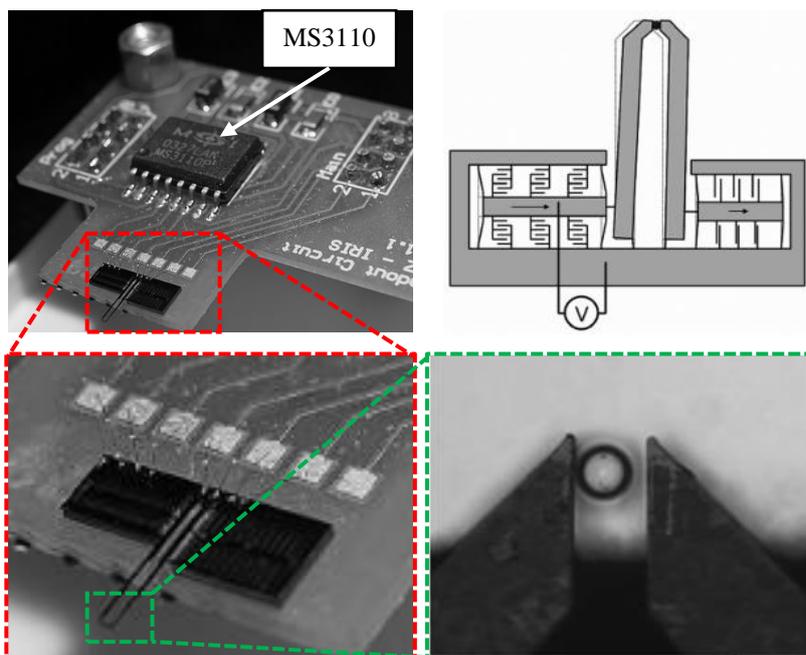
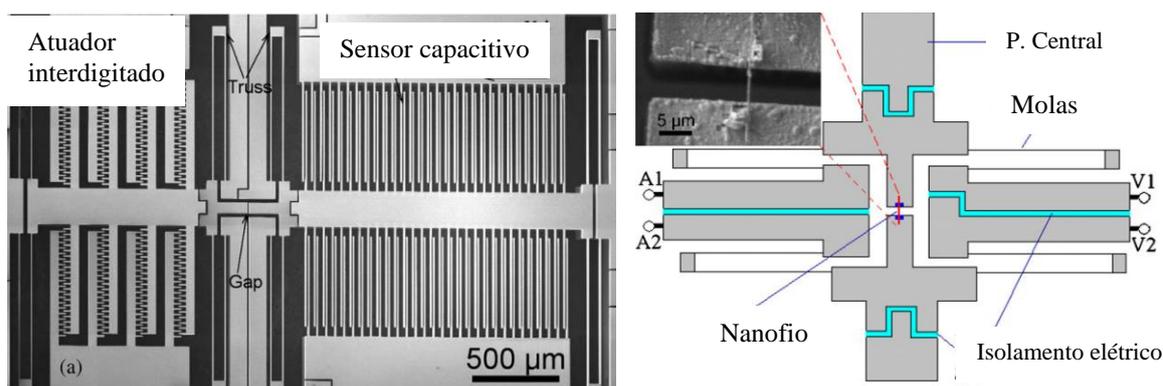


Figura 2.20 – Micropinça construída com atuadores eletroestáticos (adaptado de [105]).



**Figura 2.21** – MEMS para ensaio de tração *in situ* com atuador eletroestático (adaptado de [99,106]).

## 2.7. MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E EFEITO HALL-PETCH

É possível separar a distribuição de tamanho de grão ( $d$ ) de um material policristalino sob três regimes: i) microcristais ( $d > 1\mu m$ ); ii) cristalinidade ultrafina ( $1\mu m > d > 100nm$ ); iii) nanocristalinos ( $d < 100nm$ ) [107,108]. Cada um destes regimes possui mecanismos de deformação que estão associados ao comportamento do material após alcançar a tensão de escoamento (*mechanisms of plastic flow initiation*) [109]. Especificamente, materiais nanocristalinos são caracterizados por possuírem uma grande quantidade de contornos de grão que influenciam as suas propriedades físicas e, principalmente as propriedades mecânicas [107,109,110].

Os mecanismos de deformação plástica também representam modelos que podem explicar o comportamento de alguns sólidos quando submetidos, por exemplo, a tensões de tração e torção com intensidade suficiente para causar deformação permanente no material. Trabalhos recentes demonstram tentativas de compreender esses mecanismos de deformação. Wan e colaboradores [88], realizaram um estudo com ligas de AgInCd (com tamanho médio de grão de  $\sim 100\mu m$  e baixa falha de empilhamento) [111], e verificaram a partir de simulações que para deformações abaixo de 30% os mecanismos de deformação são predominantemente relacionados a deslizamento de discordâncias e falhas de empilhamento. Para deformações entre 30% e 50%, o mecanismo de deformação predominante é maclagem por deformação. Acima de 50% a densidade de discordâncias e a espessura da macla diminuem. Por isso, as discordâncias tendem a deslizar pelo contorno de macla. Em resumo, macla, maclagem ou *twins* são defeitos de interface induzidos em cristais

devido a uma rotação espelhada das redes cristalinas deste material. Quando ocorrem dentro do grão, geram um contorno chamado de contorno de macla [112].

Dentre os estudos dos mecanismos de deformação, trabalhos envolvendo a equação de Hall-Petch continuam sendo alvo de interesse de muitos grupos de pesquisa, com particularidade no que se refere à inversão desta equação. A equação de Hall-Petch mostra que a dureza<sup>e</sup> do material pode aumentar conforme o tamanho médio de grão diminui, como mostra a equação (2.14) [113,114], onde  $\sigma_y$  é a dureza do material no limite de escoamento,  $d$  é o tamanho médio de grão,  $\sigma_0$  é a tensão de fricção e  $K_{HP}$  é uma constante do material. A de Hall-Petch sugere que os contornos de grão funcionam como uma barreira para movimentação das discordâncias em um ensaio de tração plástica, ficando empilhadas em um contorno de grão devido à tensão aplicada, também podendo levar a nucleação de discordâncias no grão vizinho [115,116].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K_{HP}}{\sqrt{d}} \quad (2.11)$$

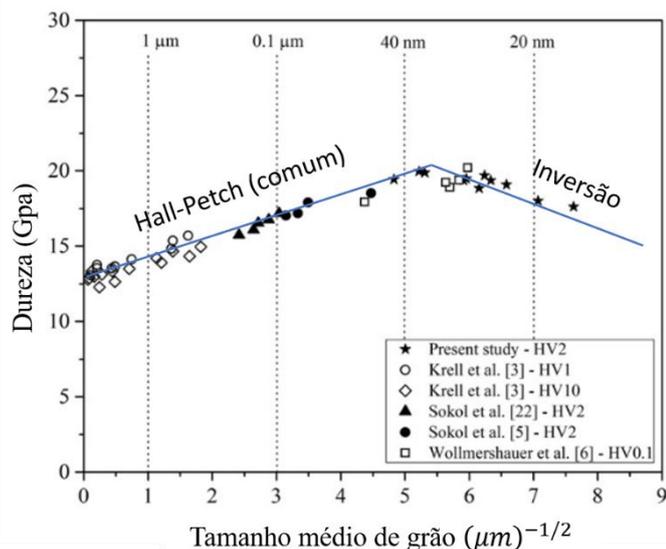
Trabalhos relacionados à teoria de Hall-Petch têm demonstrado que as discordâncias também podem empilhar-se no contorno de macla [117,118], de modo que a tensão de escoamento aumenta com a diminuição da largura de macla. Shaw e colaboradores [107] demonstraram que, para largura de macla maior que 150 nm, a interação entre discordância e contorno levam ao encruamento do material (aumento da dureza por deformação plástica). Neste regime o limite de escoamento mantém uma relação matemática semelhante à equação de Hall-Petch, ou seja, a dureza do material aumenta com a raiz inversa da largura de macla ( $L^{-1/2}$ ). Para  $L < 100$  nm a largura da macla é muito pequena conduzindo ao confinamento da discordância e à incapacidade de atravessar o contorno da macla, assim, aumentando o limite de escoamento do material. A diminuição da largura da macla possibilita um teste de tração com alcance 1 GPa com deformações de até 14%.

Entretanto, estudos propõem uma inversão no comportamento equação de Hall e Petch para tamanho médio de grão entre 1 nm e 30 nm [119], ou seja, a tensão de escoamento aumenta com a diminuição do tamanho de grão até 30nm. Após 30 nm a tensão de

---

<sup>e</sup> Neste documento, dureza é a resistência (medida) do material durante uma deformação plástica [112].

escoamento diminui até cerca de 1nm. A Figura 2.22 mostra um exemplo da inversão do efeito Hall Petch para ligas de  $MgAl_2O_4$  [120].

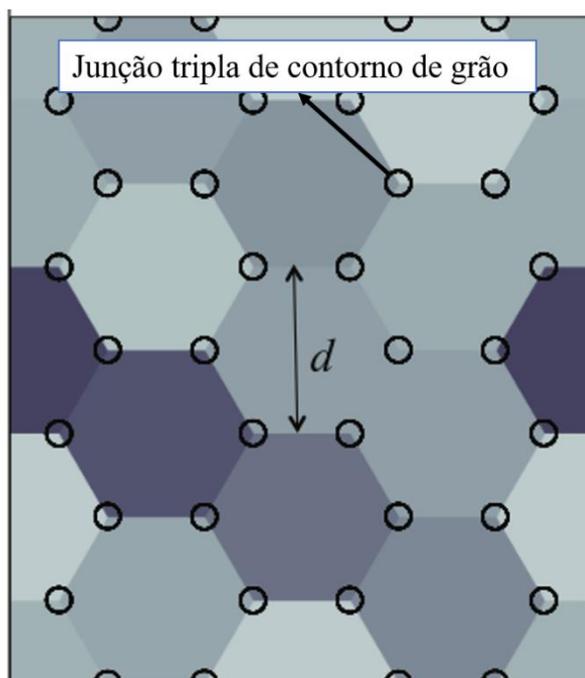


**Figura 2.22** – Gráfico de dureza pelo inverso da raiz quadrada do tamanho médio de grão (adaptado de [120])

Xu e Dávila [118] realizaram um estudo baseado em simulação de dinâmica molecular (para Al puro) mostrando uma quebra de continuidade na equação de Hall-Petch com tamanho médio de grão entre 25 nm e 5 nm. No modelo, a tensão de escoamento é diminuída até que o tamanho de grão alcance 5 nm. Depois de 5 nm a tensão de escoamento a aumentar. De acordo com os autores, a maclagem por deformação e a migração do contorno de grão são os mecanismos de deformação responsáveis pela inversão da equação de Hall-Petch. Conforme o material entra no regime plástico (acima de 2% de deformação), os grãos começam a maclar e novos grãos conduzem à nucleação. Conforme a deformação aumenta (chegando até 5%) as espessuras das maclas também aumentam e os grãos nucleados iniciam seu crescimento. Em [120] também mostram uma relação inversa da equação de Hall-Petch para ligas de  $MgAl_2O_4$  com tamanho médio de grão em torno de 30 nm, com mostra a Figura 2.22.

Quek e colaboradores [121] propuseram uma simulação de Dinâmica de Discordância Discreta para explicar a inversão da equação de Hall-Petch. Foi argumentado que, conforme a tensão aumenta, as discordâncias armazenadas nas junções triplas dos contornos de grão deslocam-se devido ao deslizamento de contorno de grão. A Figura 2.23 mostra um esquema de um material policristalino onde são evidenciadas as junções triplas de grão. Para

tamanhos de grão da ordem de micrômetros, esse efeito não é perceptível devido à quantidade reduzida de junções triplas, porém, a diminuição do tamanho de grão leva a um aumento da quantidade de contorno de grão e, como consequência, há um aumento na quantidade de junções triplas. Assim, a liberação das discordâncias nas junções triplas se torna significativa, sendo o mecanismo de deformação o responsável pela diminuição da tensão de escoamento para tamanhos de grão entorno de 1 nm e 20 nm [123].



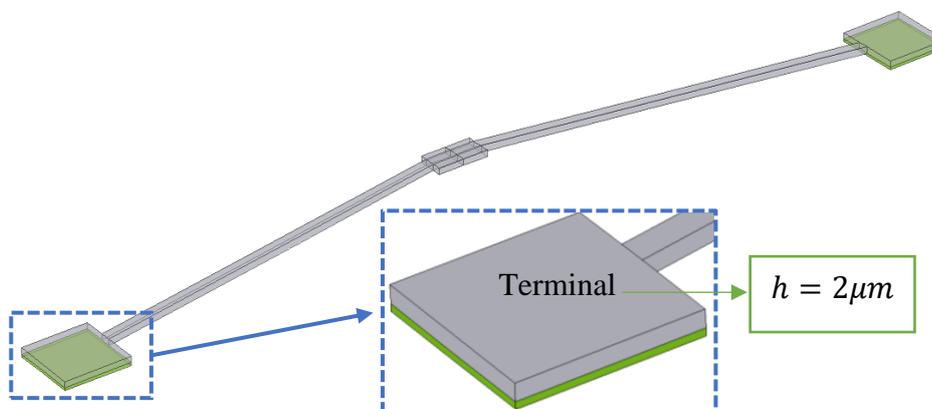
**Figura 2.23** – Esquema mostrando junções triplas de um contorno de grão,  $d$  é o diâmetro médio do grão.

### 3. SIMULAÇÃO MEF DE ATUADORES TÉRMICOS

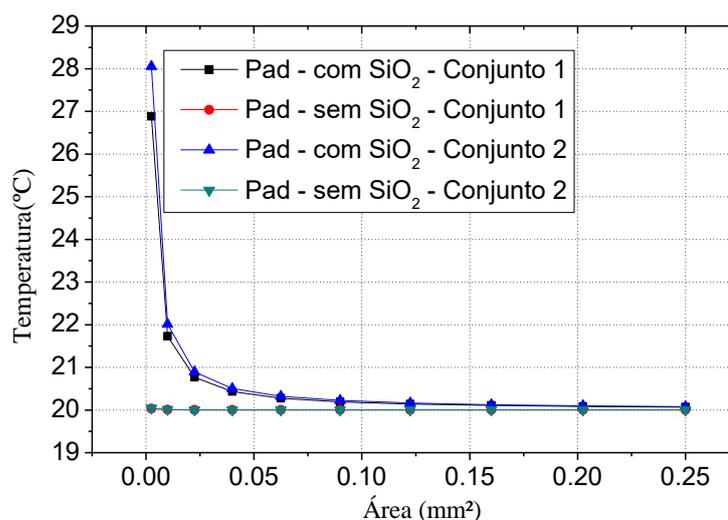
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações de métodos de elementos finitos (MEF) para atuadores térmicos de diferentes formas. Para simplificar a simulação, foi desconsiderada a camada de óxido de silício embaixo dos terminais. Como condição de contorno para os terminais foi utilizado o valor de 20 °C de temperatura. As simulações de elementos finitos foram feitas em COMSOL 5.3a com o módulo mecânico, térmico e elétrico e regime estacionário. Este pacote de simulação Multifísico considera a interação entre três módulos físicos: mecânico, termodinâmico e elétrico. As malhas utilizadas no COMSOL podem ser otimizadas dependendo do fenômeno que se estuda (física geral, fluidos, semicondutores, plasmas, eletricidade e etc), de forma que foi utilizada uma malha com sólidos tetraédricos com otimização para semicondutores. Quando foi levado em conta a interação com o ar nas simulações, uma geometria em formato de paralelepípedo era utilizada envolvendo todo o atuador térmico.

As propriedades mecânicas inseridas nas simulações estão dispostas na Tabela 2.2. O módulo de Young para silício policristalino foi considerado como sendo isotrópico ( $E = 169\text{GPa}$ ) e para o silício monocristalino foi considerado o ortotrópico. Estes dados estão disponíveis Tabela 2.2. Os terminais (que são fixos) e a aceleração da gravidade foram também desconsiderados. O pacote de simulação recorrente à plasticidade foi utilizado especificamente para o filme de cobre para a simulação de ensaio de tração. Em relação às propriedades térmicas, para o conjunto 1 foi considerado o silício policristalino e para o conjunto 2 o Silício monocristalino, a temperatura na base dos terminais foi mantida à 20°C, e as propriedades térmicas utilizadas estão dispostas na Tabela 2.2. Para propriedades térmicas de simulação em vácuo foi estabelecido uma pressão de 0,1 mPa e para ausência de vácuo de 1 atm. Simulações envolvendo troca de calor com o meio foram feitas considerando-se a geometria de um paralelepípedo envolvendo o dispositivo, onde foram consideradas todas as propriedades físicas do meio tomando por base a biblioteca do COMSOL. Em testes envolvendo perda de calor por radiação o valor da emissividade para Silício monocristalino e Silício policristalino foi considerado como sendo 0,7. As propriedades elétricas utilizadas na simulação também estão disponíveis na Tabela 2.2, onde foi considerado que a superfície externa dos dispositivos está isolada eletricamente. Esta consideração não foi empregada para a região do topo dos terminais elétricos de aplicação de voltagem. Os quadrados no início e no final da trilha representam os terminais elétricos onde se aplica a ddp  $U$ .

É importante comentar que foram realizadas algumas simulações de MEF variando a área dos terminais elétricos com e sem dióxido de silício sob os mesmos, utilizando as propriedades físicas do conjunto 1 e conjunto 2 da Tabela 2.2. A Figura 3.1 mostra um esquema da geometria utilizada para simulação com SiO<sub>2</sub>. A Figura 3.2 mostra o resultado da simulação MEF para a temperatura dos terminais elétricos em relação à área dos terminais. A simulação, Figura 3.2, indica que à medida que a área dos terminais aumenta, a temperatura converge para o mesmo valor obtido na simulação sem a camada de SiO<sub>2</sub>. Para os dispositivos fabricados, como será mostrado no capítulo 5, a área dos terminais foi de 0,36 mm<sup>2</sup>.



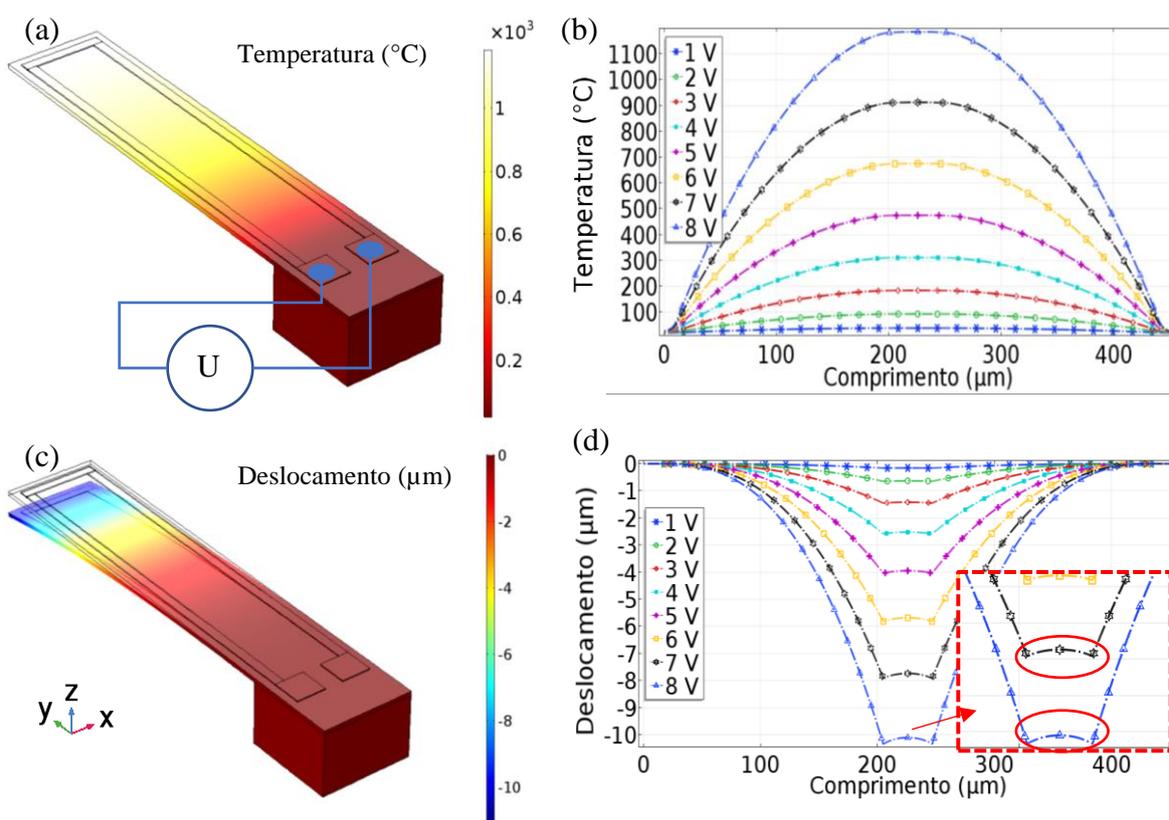
**Figura 3.1** – Desenho utilizado para simulação usando óxido de silício.



**Figura 3.2** - Temperatura das placas em função da área das placas para  $U = 7,5V$  de tensão.

### 3.1. SIMULAÇÃO DE DISPOSITIVO BIMORFO

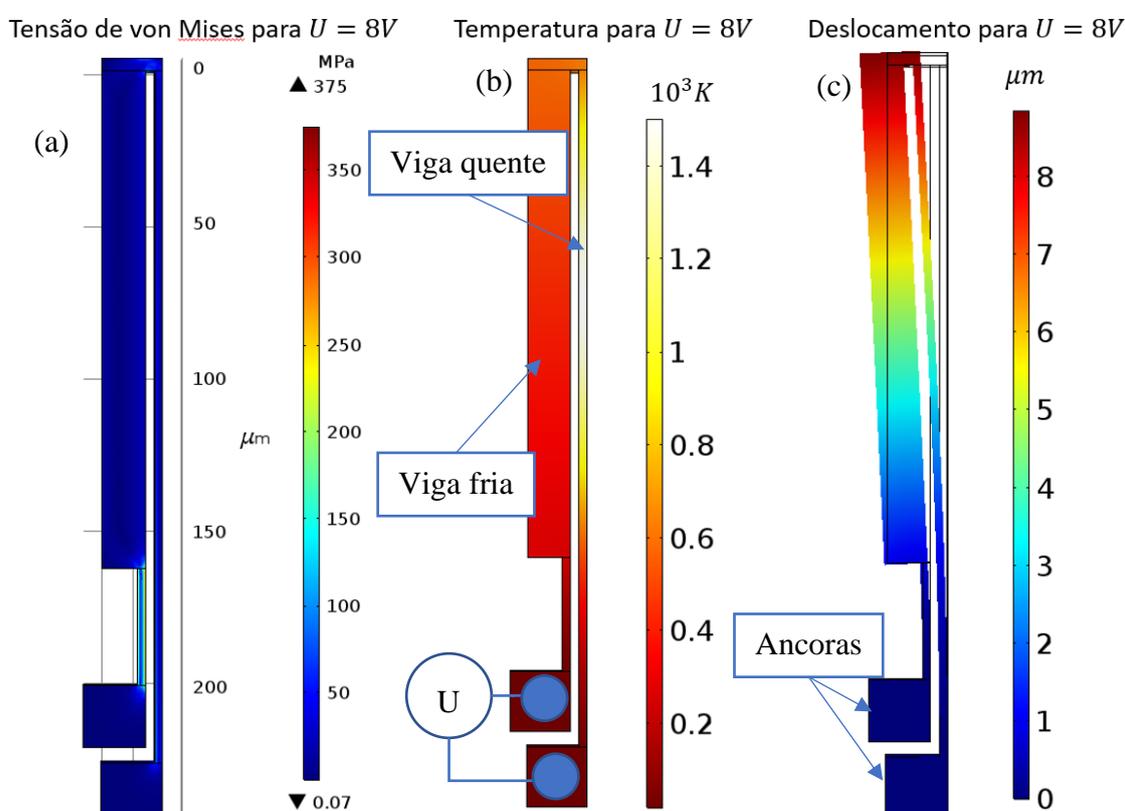
A Figura 3.3 mostra uma simulação MEF realizada utilizando o software COMSOL 5.3a para um atuador térmico em formato de *cantilever* com uma trilha de Au (com 500 nm de espessura) para passagem de corrente elétrica em vácuo. Uma voltagem  $U$  entre os terminais leva corrente elétrica às trilhas de Au para o aquecimento do dispositivo por Efeito Joule. O ouro possui coeficiente de dilatação térmico maior que o do silício ( $14,3 \times 10^{-6}$  e  $2,6 \times 10^{-6}$  respectivamente), logo, a dilatação da trilha de Au, movimenta a plataforma de Silício para baixo. As temperaturas mais altas são alcançadas na ponta do *cantilever* ( $\sim 1100$  °C com 8 V, corresponde um deslocamento de  $10 \mu\text{m}$ ). Conforme a temperatura aumenta a dilatação do fio na ponta do *cantilever* proporciona uma envergadura da plataforma, de aproximadamente  $1,5 \mu\text{m}$  para  $U = 3\text{V}$  até  $10 \mu\text{m}$  para  $U = 10\text{V}$ .



**Figura 3.3** – Simulação de atuador eletrotérmico cantilever com plataforma de silício com trilha de Au. Distribuição de temperatura, (b) distribuição de temperatura na trilha de Au para 8 voltagens diferentes, (c) distribuição de deslocamento, (d) distribuição de deslocamento na trilha de Au para 8 voltagens diferentes aplicadas entre os terminais.

### 3.2. SIMULAÇÃO DE DISPOSITIVO EM U

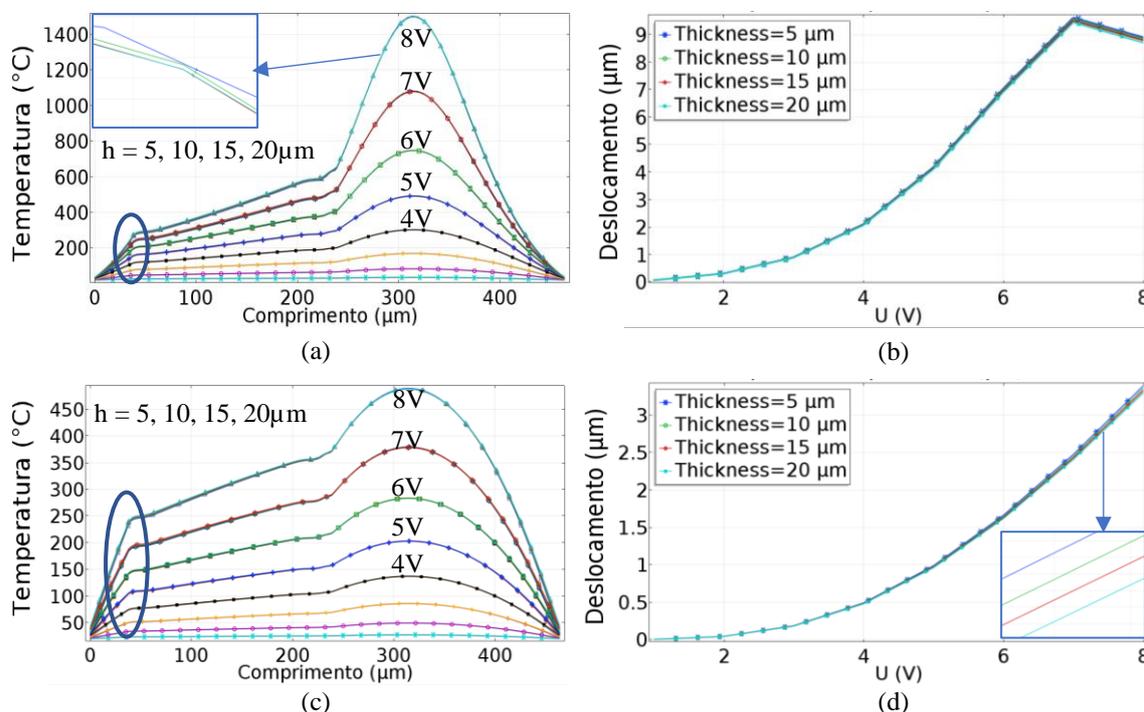
Como já sabido, em dispositivos MAET a diferença de potencial entre os terminais proporciona a passagem de corrente elétrica pelas vigas levando ao aumento da temperatura. A Figura 3.4 mostra o resultado de uma simulação MEF para atuadores térmicos em formato de U. O dispositivo é deslocado em sentido anti-horário devido a diferença de dilatação térmica entre as vigas quente e fria



**Figura 3.4** – Simulações MEF de atuador térmico em fomato de U para conjunto 1. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento.

A Figura 3.5 mostra o perfil de temperatura e deslocamento para o dispositivo MAET em formato de U, mostrado na Figura 3.4, considerando propriedades físicas do silício policristalino condutor (ver conjunto 1 da Tabela 2.2, página 5) e do silício monocristalino condutor (ver conjunto 2 da Tabela 2.2, página 5). Independentemente do tipo de silício utilizado na construção do dispositivo, o perfil de temperatura não depende da espessura do dispositivo, mas apenas da potência dissipada, como indica a Figura 3.5 (a). Por consequência, o deslocamento dos atuadores térmicos não depende da espessura, como

mostram as Figura 3.5 (b) e (d). Entretanto, quando se compara silício monocristalino com policristalino, os resultados de temperatura e de deslocamento são diferentes.

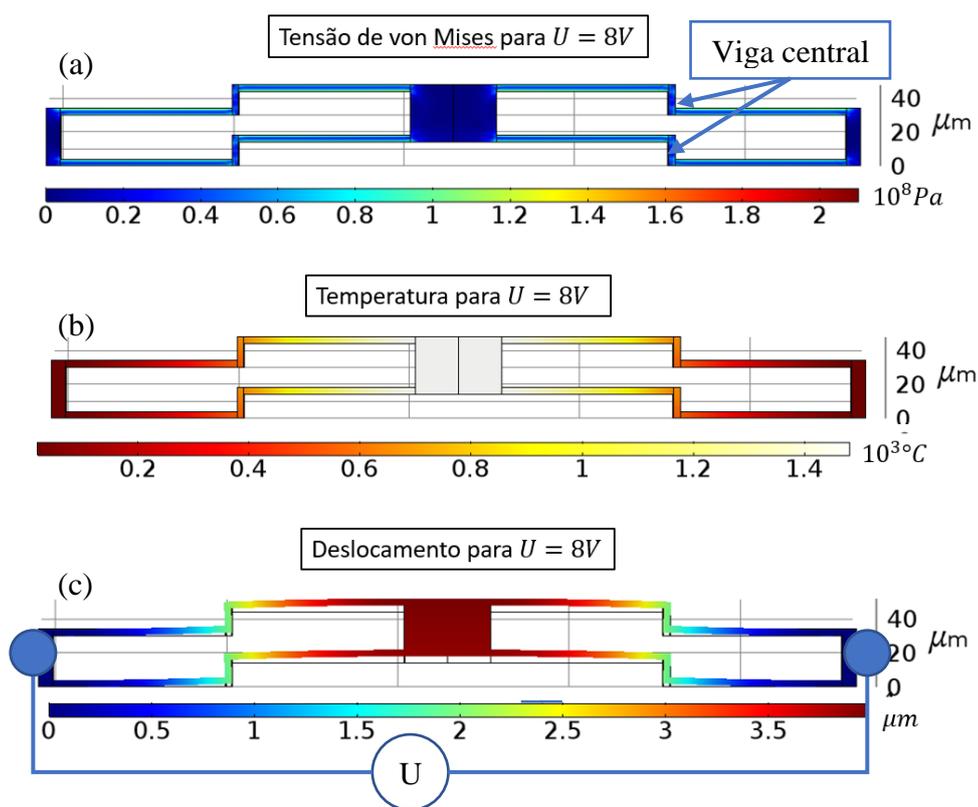


**Figura 3.5** – Simulação MEF para perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de U.  
**Conjunto 1:** (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ ; (b) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ . **Conjunto 2:** (c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ ; (d) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ .

### 3.3. SIMULAÇÃO DE DISPOSITIVO EM Z

Na Figura 3.6 é mostrada a distribuição de temperatura, para a tensão de von Mises<sup>f</sup> e a distribuição de deslocamento para simulação MEF de um dispositivo MAET em formato de Z. Para a simulação foram utilizadas as propriedades físicas descritas no conjunto 1 da Tabela 2.2. Devido à geometria do dispositivo, a viga central pode chegar a uma tensão de trabalho de até 0,2 GPa. Adicionalmente, a temperatura é maior na plataforma central [31,63]. Na simulação, temperaturas próximas ao ponto de fusão são alcançadas quando uma voltagem de 8 V é aplicada entre os terminais do dispositivo. Para o deslocamento, é possível alcançar valores de até 4 μm para uma voltagem e 8 V.

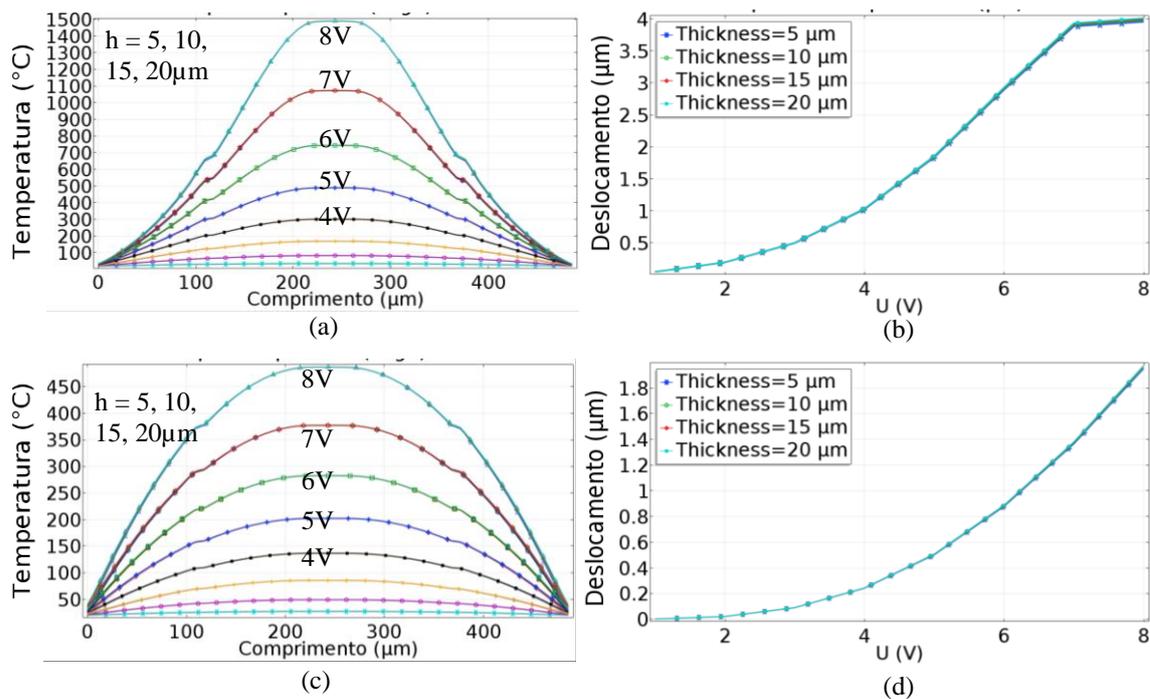
<sup>f</sup> Tensão de von Mises é um valor de tensão escalar, calculado a partir de uma matriz de tensores, usado para estimar a tensão de escoamento do material sujeito a uma tensão multiaxial [148].



**Figura 3.6** – Simulações MEF de atuador térmico em fomato de Z. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento.

A Figura 3.7 mostra o perfil de temperatura e o deslocamento da plataforma central do dispositivo MAET da Figura 3.6 para as propriedades físicas do conjunto 1 [ver figuras 3.4 (a) e (b)] e do conjunto 2 [ver figuras 3.4 (c) e (d)] da Tabela 2.2. A máxima temperatura alcançada para as propriedades do conjunto 1 foi de  $1500 \text{ }^\circ C$ . Aplicando as propriedades do conjunto 2, a máxima temperatura alcançada é de  $460 \text{ }^\circ C$ . Assim como acontece nos dispositivos em formato de U, a temperatura e o deslocamento dos dispositivos em formato de Z não dependem da espessura do filme de Si condutor como mostras os gráficos da Figura 3.7.

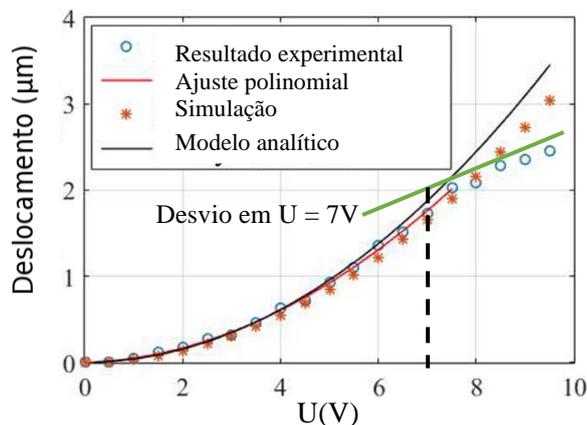
Comparando os gráficos das propriedades físicas do conjunto 1 com as do conjunto 2, é visto que as propriedades físicas do silício condutor podem proporcionar uma diferença de até  $1000 \text{ }^\circ C$  para o mesmo valor de voltagem. Consequentemente, devido à natureza de da dilatação térmica, maior será o deslocamento do dispositivo, chegando a  $\sim 4 \mu m$  para o conjunto 1 e  $\sim 2 \mu m$  para o conjunto 2.



**Figura 3.7** – Simulação MEF para perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de Z. Conjunto 1: (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ ; (b) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ . Conjunto 2: (c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ ; (d) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ .

Da mesma forma, no deslocamento do dispositivo MAET em formato de  $U$ , o deslocamento para o dispositivo em formato de Z [Figura 3.5 (b)] tem uma mudança na tendência da curva quando a tensão aplicada é de 7V, como observado na Figura 3.7 (b). Esse comportamento não é observado no deslocamento do conjunto 2. Um comportamento semelhante é encontrado experimentalmente no trabalho de Zhang e outros [67], onde mediram o deslocamento de um dispositivo em formato de Z construído com Silício policristalino condutor. A Figura 3.8 mostra essa mudança de comportamento no deslocamento de um atuador térmico.

Zhang e colaboradores [63] mostraram um trabalho comparativo entre dispositivos em formato de V e dispositivos em formato de Z. Foi mostrado que atuadores em formato de V possuem maior deslocamento, como também têm capacidade de gerar maior força pois possuem maior rigidez. Além disso, os dispositivos em formato de V ocupam menos espaço devido o modo de empilhamento das vigas inclinadas. Ainda em outro trabalho de Zhang e colaboradores [15], uma comparação entre atuadores térmicos em formato de V e Z fabricados é feita com resiste SU8, onde os autores mostraram que o tempo de resposta para os dispositivos MAET em formato de V é mais rápido em comparação aos de formato de Z.

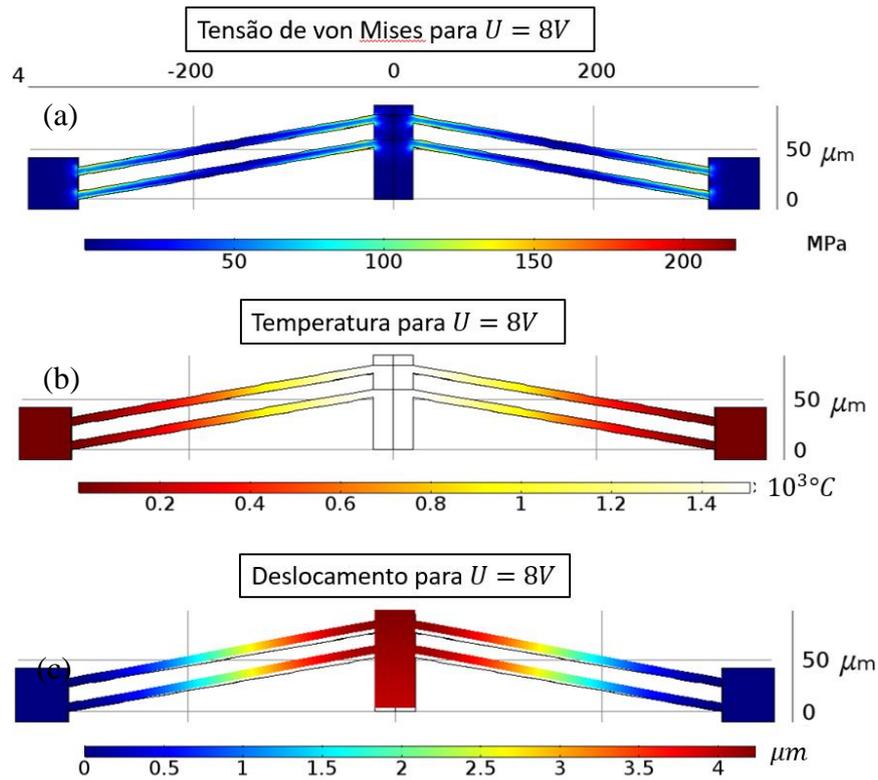


**Figura 3.8** – Deslocamento por voltagem de artigo de Zhang (adaptado de [67]).

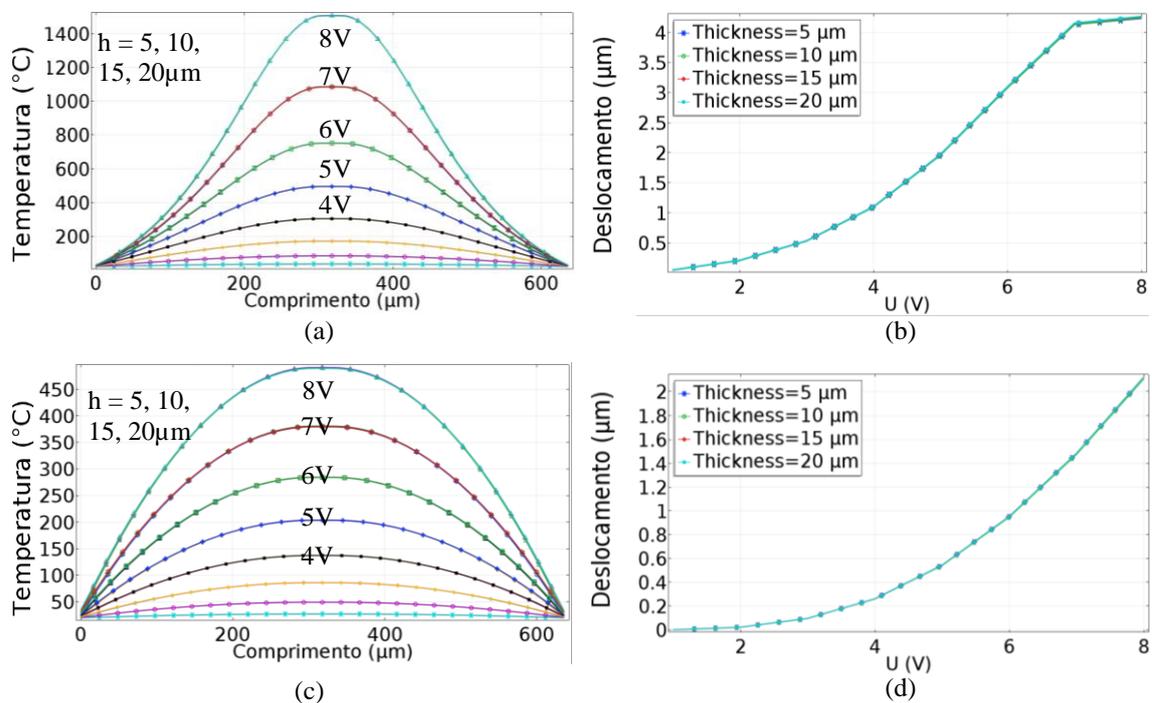
### 3.4. SIMULAÇÃO DE DISPOSITIVOS EM V

A Figura 3.9 mostra a distribuição de tensão de von Mises, temperatura e deslocamentos de uma simulação MEF para um dispositivo em formato de V com dois pares de vigas com voltagem de 8 V. O gradiente de temperatura é mais concentrado na região da plataforma central do dispositivo, sendo um resultado semelhante ao mesmo estudo realizado em dispositivos em Z.

A Figura 3.10 mostra, novamente, uma comparação entre o conjunto 1 e o conjunto 2 (Tabela 2.2) do perfil de temperatura para simulação MEF das vigas. É também apresentado o deslocamento da plataforma central usando parâmetros físicos do conjunto 1 (Figura 3.10 (a) e (c)) e do conjunto 2 (Figura 3.10 (b) e (d)) para o dispositivo MAET em V da Figura 3.9. Assim como nas simulações sobre dispositivos em U e Z, mostrado na seções anteriores, simulações MEF utilizando propriedades físicas do conjunto 1 (ver Figura 3.10 (a)), apresentaram pico de temperatura maior em relação ao conjunto 2 (Figura 3.10(c)). Desta forma, o conjunto 1 proporciona um deslocamento maior (Figura 3.10 (b)) em relação ao deslocamento do conjunto 2 (Figura 3.10(d)). A diferença de temperatura pode chegar em  $\sim 1000$  °C o conjunto 1 e conjunto 2, logo, a diferença entre os deslocamentos é de 2 µm entre as simulações. Neste cenário, nota-se uma mudança no comportamento da curva de deslocamento em torno de 7 V. Todavia, a espessura do dispositivo não altera o valor da temperatura em nenhuma das voltagens utilizadas.

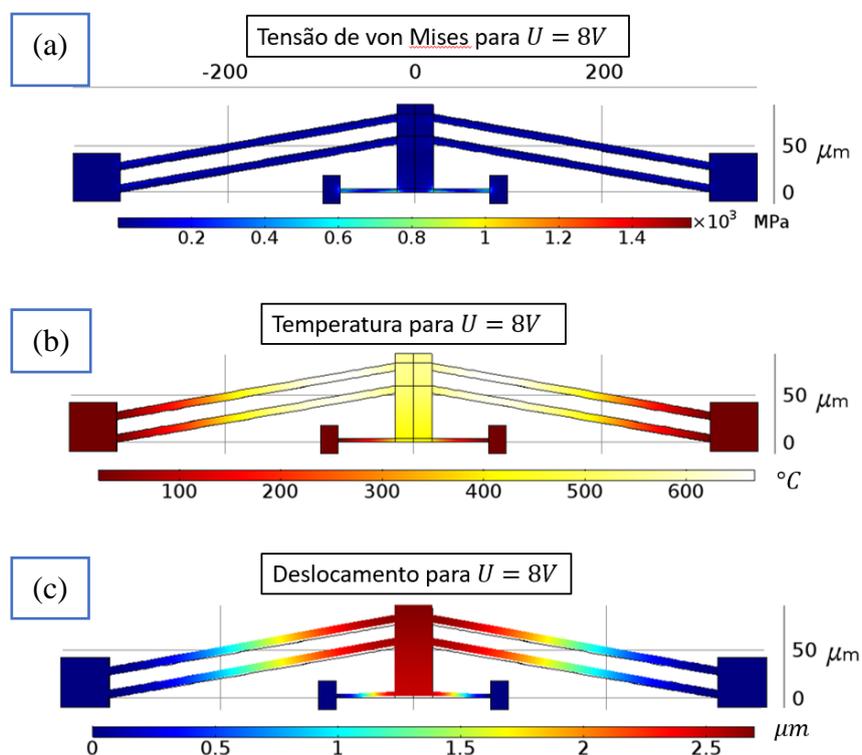


**Figura 3.9** – Simulação MEF de um atuador térmico em V. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento.



**Figura 3.10** – Simulação MEF para perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de V. Conjunto 1: (a) Perfil de temperatura para  $U$  de 1V até 8V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20 \mu m$ ; (b) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20 \mu m$ . Conjunto 2: (c) Perfil de temperatura para  $U$  de 1V até 8V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20 \mu m$ ; (d) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20 \mu m$ .

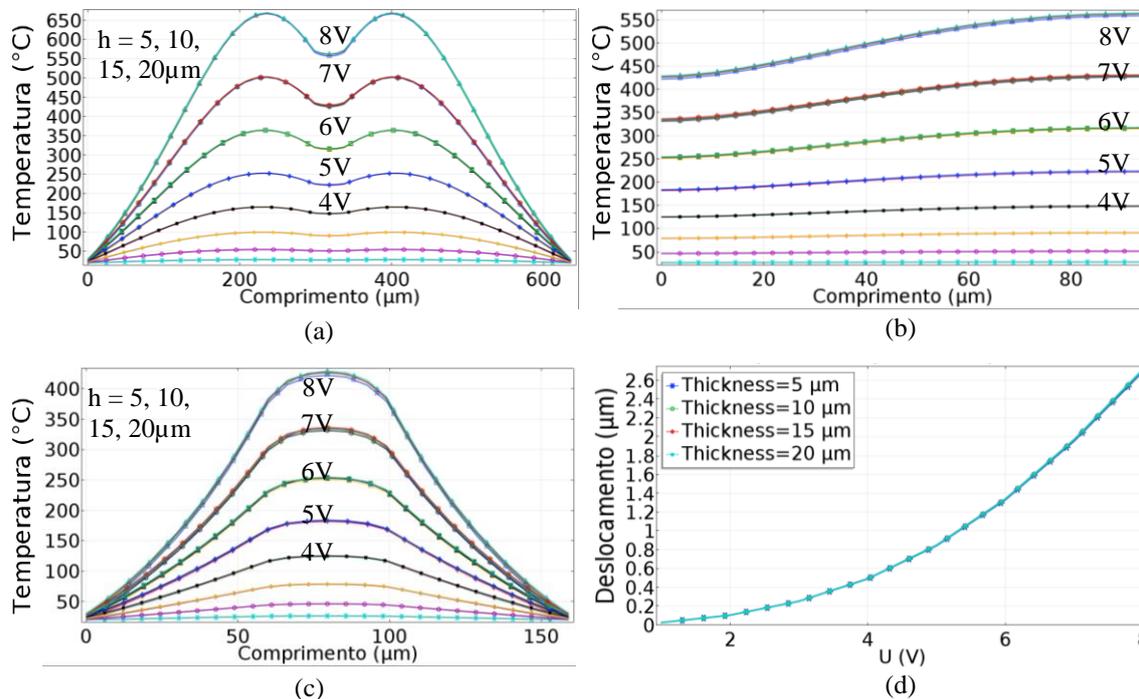
A Figura 3.11 mostra a simulação MEF das distribuições de: (a) tensão de Von Mises, (b) temperatura e (c) deslocamento; para o dispositivo MEMS com adição de um par de vigas dissipadora de calor. As propriedades físicas e as dimensões do dispositivo utilizadas são as mesmas utilizadas nos resultados da simulação disponível na Figura 3.9. Observa-se que a presença das vigas dissipadora de calor faz com que a temperatura na plataforma central diminua rapidamente. Este fenômeno é melhor observado nos gráficos de simulação de perfil de temperatura da Figura 3.12, onde é mostrado o perfil de temperatura e deslocamento usando as propriedades do conjunto 1 com vigas dissipadoras de calor. O valor máximo da temperatura está concentrado na viga inclinada próxima à plataforma central.



**Figura 3.11** – Perfil de simulação MEF dea taudor térmico em V com vigas dissipadora de calor. (a) Distribuição de von Mises, (b) distribuição de temperatura e (c) distribuição de deslocamento.

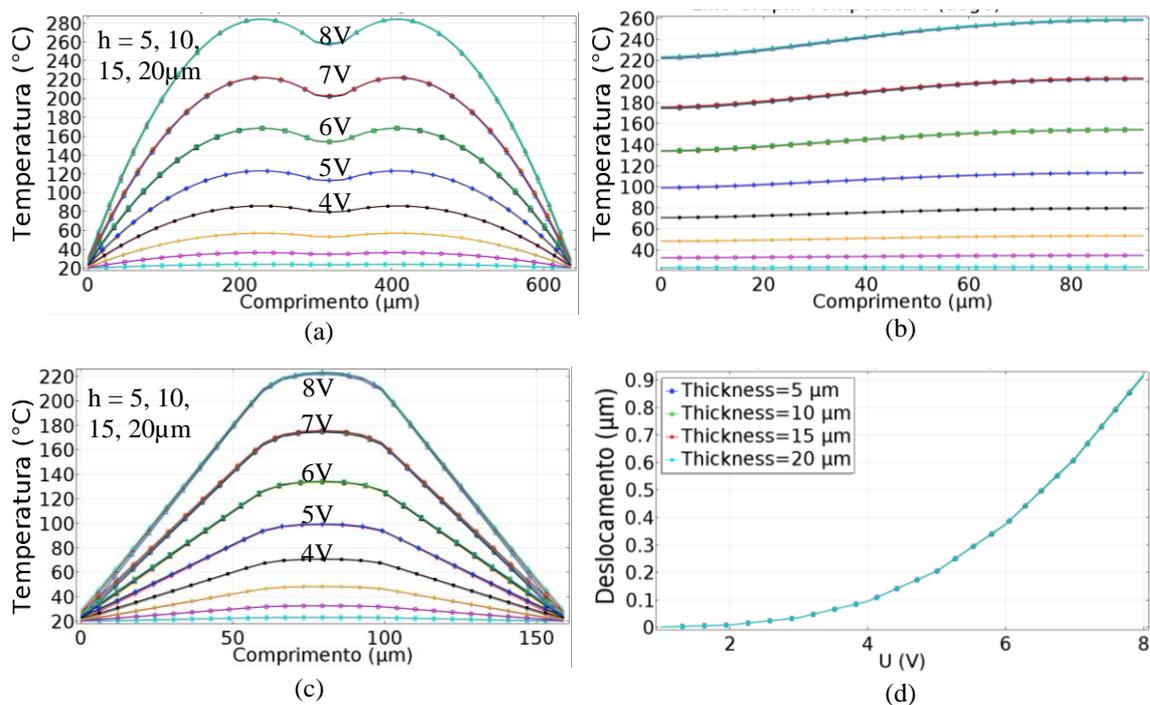
A Figura 3.12 (b) mostra o perfil de temperatura da plataforma central, onde é observado uma diminuição de temperatura em 100 °C pelo, representando o perfil da plataforma central até a região das vigas dissipadora de calor. A Figura 3.12 (c) mostra o perfil de temperatura sobre o comprimento das vigas dissipadora de calor, e na Figura 3.12 (d) é mostrado o deslocamento da plataforma central. Os resultados das simulações disponível na Figura 3.12 foram obtidos a partir de diversas espessuras do silício condutor,

onde é observado que a espessura não influencia o deslocamento e a temperatura no dispositivo.



**Figura 3.12** – Simulação MEF para conjunto 1 de perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de V com vigas dissipadora de calor. (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ ; (b) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ ; (c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ ; (d) deslocamento por ddp para  $h = 5, 10, 15$  e  $20\mu\text{m}$ .

A Figura 3.13 mostra o perfil de temperatura para: (a) vigas inclinadas; (b) pela plataforma central; (c) pelas vigas dissipadora de calor e (d) o deslocamento. Na simulação foi utilizada a geometria mostrada na Figura 3.11 e as propriedades físicas do conjunto 2 da Tabela 2.2. O perfil obtido tem um comportamento semelhante aos perfis mostrados na Figura 3.12, contudo, eles possuem menores intensidades. Não foi observado alguma diferença entre o perfil de temperatura e o deslocamento quando se variou a espessura do dispositivo. Sobretudo, como os valores de máximo de temperatura são menores, o deslocamento também é menor.



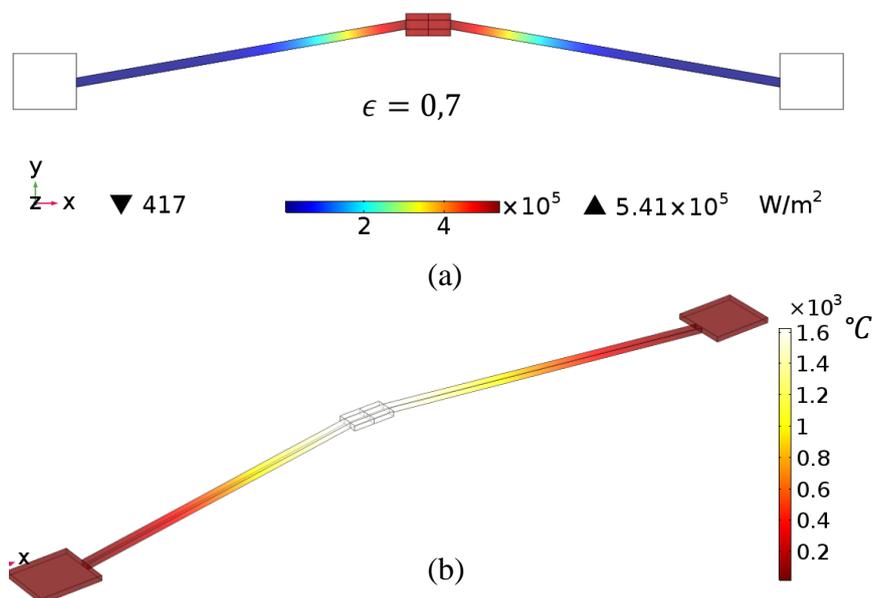
**Figura 3.13** – Simulação MEF para conjunto 2 de perfil de temperatura e deslocamento de MAET em formato de V com vigas dissipadora de calor. (a) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e h = 5, 10, 15 e 20μm; (b) deslocamento por ddp para h = 5, 10, 15 e 20μm(c) Perfil de temperatura para U de 1V até 8 V e h = 5, 10, 15 e 20μm; (d) deslocamento por ddp para h = 5, 10, 15 e 20μm.

### 3.5. ESTUDO DA PERDA DE CALOR POR RADIAÇÃO

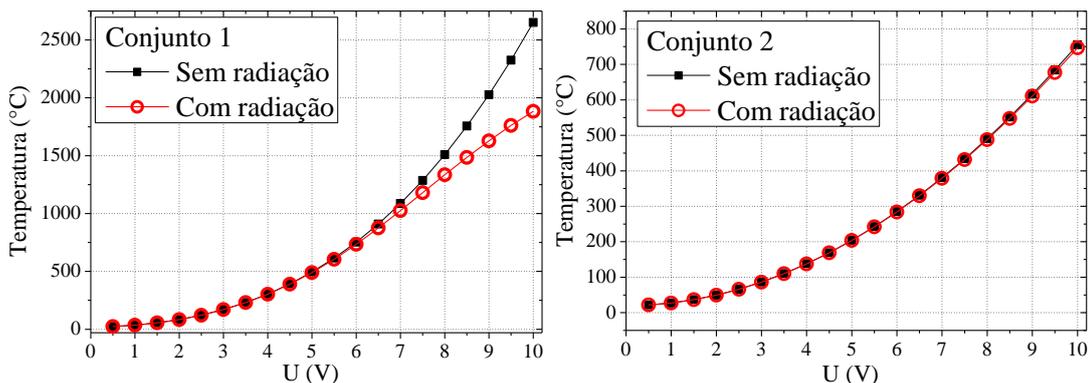
Estudos apontam [56,62,122] que a perda de calor por radiação pode ser negligenciada frente a outros tipos de perdas de calor, como por exemplo, perda de calor para o substrato e perda de calor por convecção (quando o dispositivo estiver operando fora do vácuo). Essa, depende da temperatura à quarta potência e pode ser desprezível em dispositivos MAET quando as temperaturas são menores que 500 K [123] e pode ter uma contribuição significativa em temperaturas acima de 500 K [76,124].

Para avaliar a influência da perda de calor por radiação, simulações MEF foram realizadas com a contribuição de radiação, como também desconsiderando-a. A partir da emissividade ( $\epsilon = 0,7$ ) [124] e as propriedades físicas do silício do conjunto 1 (ver Tabela 2.2), foi possível obter resultados relacionados à perda de calor e à temperatura. A Figura 3.14 mostra o resultado de simulação MEF levando-se em conta a perda de calor por radiação. As simulações indicam que a maior perda de calor por radiação é localizada na plataforma central pois é a região do dispositivo com a maior valor de temperatura.

A Figura 3.15 mostra o resultado de simulação MEF para o valor máximo de temperatura, com e sem perda de calor por radiação, usando o conjunto 1 (policristalino) e o conjunto 2 (monocristalino) da Tabela 2.2. Em relação à Figura 3.15 (a), as simulações indicam uma contribuição notória da perda de calor por radiação a partir de 6 V. Todavia, utilizando as propriedades físicas do conjunto 2 (Figura 3.15 (b)) não foi observado uma diferença nos valores de temperatura comparado às simulações MEF do conjunto 1. Logo, a perda de calor por radiação depende fortemente das propriedades físicas do Silício utilizado na manufatura do dispositivo. Provavelmente, isso se deve ao fato de os valores da temperatura serem distintos nas duas configurações (conjunto 1 e conjunto 2) para o mesmo potencial elétrico. Será apresentado no Capítulo 6.1 um dispositivo que é melhor descrito com as propriedades físicas do conjunto 2, o qual é objeto de estudo da presente tese. Para as simulações que serão utilizadas em comparação com os resultados experimentais e o modelo numérico, não foram utilizadas as ferramentas relacionadas a perda de calor por radiação, já que é necessário um alto poder computacional e os resultados não são influenciados por tal comportamento, como indicado na Figura 3.15 (b).



**Figura 3.14** – (a) simulação de perda de calor por radiação e (b) simulação de distribuição de temperatura. Para as simulações foi usada as propriedades físicas do conjunto 1 Tabela 2.2 para  $U = 9V$ .



**Figura 3.15** – Simulação de temperatura com perda de calor por radiação. Com propriedades físicas do (a) conjunto 1 e (b) conjunto 2 da Tabela 2.2.

### 3.6. CÁLCULO DA RIGIDEZ DA CÉLULA DE CARGA POR MEF

A rigidez de uma célula de carga está diretamente relacionada à geometria da viga de sustentação. Utiliza-se a lei de Hook para calcular a força sentida na célula de carga, tal que

$$F = K_{cc}\Delta L_{cc} \quad (3.1),$$

onde  $F$  é a força medida na célula de carga, com  $K_{cc}$  e  $\Delta L_{cc}$  sendo a rigidez e o deslocamento, respectivamente. No presente trabalho, o dispositivo é composto de 4 pares de vigas retangulares e maciças, com a rigidez da célula de carga expressa pela seguinte equação [39,98]:

$$K_{cc} = q \frac{24EI}{L_{cc}^3} = q 2Eh \left( \frac{b_{cc}}{L_{cc}} \right)^3 = 432,64N/m \quad (3.2),$$

onde  $E$  é o módulo de Young,  $I$  é o segundo momento de inércia da viga (também conhecido como momento de inércia de área) e as constantes físicas e as dimensões do dispositivo estão disponíveis na Tabela 5.1.

Um das maneiras de se medir experimentalmente a rigidez de um microdispositivo eletroestático é encontrando a frequência de ressonância do dispositivo [77,100,106,125]. Aplicando-a na equação,

$$K = (2\pi f_r)^2(M_s + 13M_b/35) \quad (3.3),$$

é possível obter a rigidez do sensor oscilante, onde  $f_r$  é a frequência de ressonância do dispositivo,  $M_s$  é a massa da plataforma central (somada às vigas suspensas fixadas à plataforma) e  $M_b$  é a massa das vigas suspensas. Zhu [77] demonstrou a possibilidade em se obter a rigidez de um dispositivo qualquer por meio de análise de elementos finitos, apenas determinando a diferença entre o valor experimental da rigidez de um dispositivo eletroestático em comparação com análise de elementos finitos .

Tomando por base que o valor da rigidez obtida por simulação MEF é um valor próximo do experimental, este método foi utilizado para realização de simulações para obtenção dos resultados para a rigidez da célula de carga [126]. A simulação realizada forneceu valores da rigidez da célula de carga para três direções principais,  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$ . A célula de carga apresentada neste trabalho foi projetada para deslocamentos na direção y, de tal forma que a rigidez utilizada obedeça a igualdade  $K_{cc} = K_{yy}$ . Os resultados da simulação MEF para o cálculo da rigidez forma de,

$$K_{xx} = 9372N/m, K_{yy} = 394,9 N/m, K_{zz} = 71,45N/m \quad (3.4)$$

Desta forma, o resultado teórico é comparável ao resultado da simulação de rigidez respeitando uma diferença de  $\Delta K = 37,74N/m$ , de forma que a comparação foi feita em relação ao resultado teórico mostrado na equação (3.3). Também foi observado que a rigidez  $K_{zz}$  é a menor comparada às  $K_{xx}$  e  $K_{yy}$ . Isso significa que quanto maior a rigidez  $K_{zz}$ , maior é a estabilidade e robustez do dispositivo frente a gravidade ou a forças resultantes verticais [93].

### 3.7. SIMULAÇÃO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

As dimensões do dispositivo utilizado para o desenvolvimento deste trabalho (ver Tabela 5.1) foram projetadas para a realização de um ensaio de tração. Na simulação para o ensaio foi considerado um filme fino de cobre com 50 nm de espessura, 10  $\mu$ m de comprimento e 4  $\mu$ m de largura. Foi empregado o Módulo de Materiais Estruturais Não

Lineares do COMSOL 5.3 para estudar o comportamento da plasticidade do filme de cobre aplicando os parâmetros físicos do conjunto 1 (Tabela 2.2). A conhecida equação de Ludwik foi utilizada para estudar os fenômenos plásticos do cobre, onde [127]:

$$\sigma = 833MPa + (578MPa)\epsilon^{0,3} \quad (3.5)$$

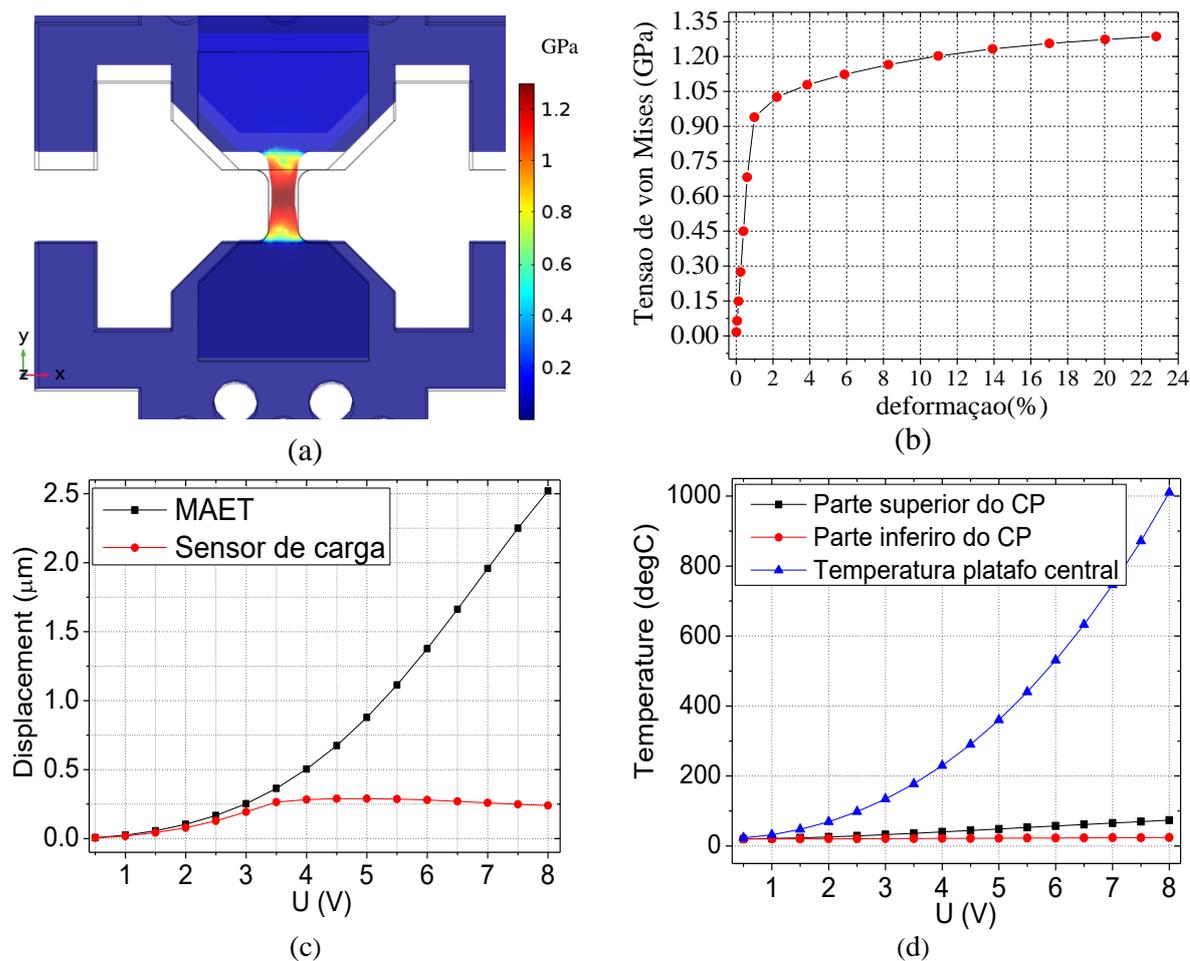
com  $\sigma$  representando a tensão e  $\epsilon$  a deformação. Esta equação tem sido aplicada no estudo de ensaio de tração utilizando o cobre, corroborando para uma boa abordagem sobre filme de tamanho de grão nanométrico, sendo este um dos objetivos do presente trabalho, estudar os mecanismos de deformação plástica dentro do MET.

Os resultados da simulação do teste de tração utilizando um corpo de prova (CP) de filme de cobre são mostrados na Figura 3.16. A Figura 3.16 (a) mostra a simulação de distribuição de von Mises no CP e a deformação aplicada ao filme fino de cobre. É possível observar o fenômeno conhecido como empescoçamento do CP, chegando a uma tensão de 1,2 GPa na região central do filme de cobre.

A Figura 3.16 (b) mostra a curva tensão como função da deformação para o CP estudado. A tensão de von Mises foi obtida a partir de uma média da seção reta da região mediana do comprimento do CP em diferentes deslocamentos. A deformação foi calculada tomando a diferença entre o deslocamento do MAET e da célula de carga. O deslocamento das duas partes (MAET e célula de carga) é mostrado com mais detalhes na Figura 3.16 (c). Os resultados da simulação indicam que o regime plástico de deformação para o filme do cobre se inicia quando a voltagem elétrica entre os terminais é de 3,5 V. Nesta ocasião a célula de carga diminui o deslocamento devido ao início do empescoçamento, retrocedendo à posição original pouco antes do rompimento. O deslocamento do MAET é praticamente independente do deslocamento da célula de carga, associado ao fato do MAET possuir uma alta rigidez [36].

No seção 3.6 foi mostrado que as vigas de sustentação da plataforma central da célula de carga são as principais responsáveis pela sua rigidez e, conseqüentemente podem controlar o regime plástico do CP. Vigas com menor espessura viabilizam maiores deslocamentos da plataforma central da célula de carga, todavia, geram menor resistência para o regime plástico da CP. Diversas simulações foram realizadas e os respectivos

resultados encontram-se na Tabela 5.1. Foi observado que o deslocamento da célula de carga pode chegar a 288 nm a 4 V, mantendo-se aproximadamente constante até 5,5 V e retrocedendo até 239 nm a 8 V. A diferença de deslocamento entre 4 V e 8 V é de aproximadamente 50 nm. Deslocamentos desta dimensão são possíveis de se realizar com extensômetros capacitivos [39,77,90,102].



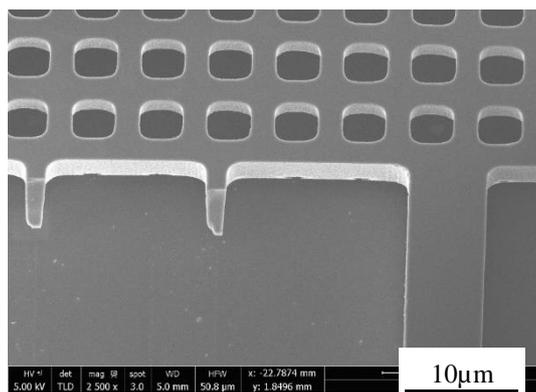
**Figura 3.16** – Simulação MEF para ensaio de tração com CP de cobre. (a) Amostra de cobre em simulação de ensaio de tração com  $U = 8$  V. A amostra tem  $10 \mu\text{m}$  de comprimento,  $4 \mu\text{m}$  de largura e  $30 \text{ nm}$  de espessura. (b) Simulação de curva tensão x deformação para CP de cobre da figura (a). (c) Deslocamento do atuador térmico e da célula de carga. (d) Simulação de temperatura máxima, temperatura da parte superior e parte inferior do corpo de prova.

Usar uma célula de carga é uma das maneiras mais precisas de se medir a força exercida sobre uma amostra. Assim, visando medir deslocamentos da ordem de dezenas de nanômetros, as vigas da célula de carga foram planejadas de tal forma a facilitar a medida da variação de capacitância. A distância entre as placas do Ex.C deve ser a menor possível, sendo limitada pela resolução do processo litografia e pela espessura do resiste utilizado.

Adicionalmente, o comprimento do Ex.C deve ser o maior possível, afim de se obter o melhor sinal de capacitância, que é limitado pela rigidez e pela espessura do filme condutor, ou seja, quanto maior a rigidez maior será o comprimento da viga do Ex.C e, quanto maior a espessura do filme condutor, maior poderá ser o comprimento da vida do Ex.C. Um filme condutor mais espesso implica em um melhor sinal na medida de capacitância, mas, por outro lado, tem-se um tempo maior durante o processo de maquinação do filme condutor durante o processo de erosão usando método Bosch (Capítulo 5.2). Maior tempo de processamento no DRIE resulta em um filme mais espesso, o que poderia levar a uma menor resolução do processo de litografia do resiste, e como consequência uma distância  $d_0$  menor com diminuição da variação de capacitância ( $\Delta C$ ).

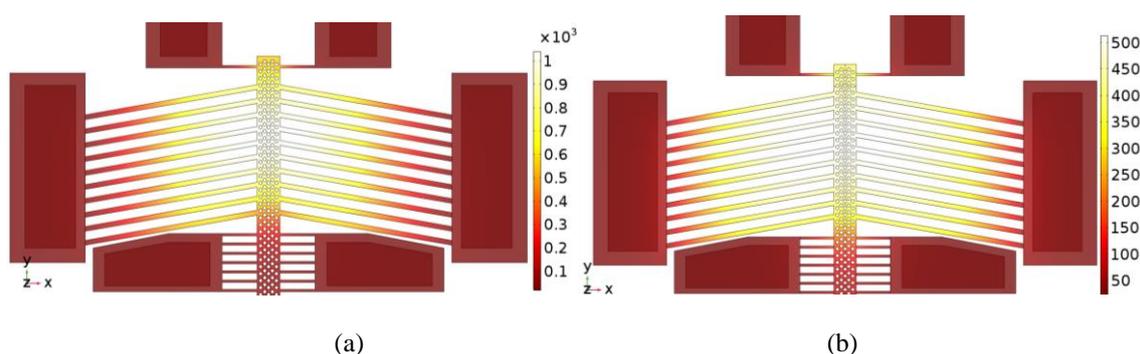
Quando energizadas, as placas do Ex.C sofrem atração eletrostática, que pode ser calculada pela equação (2.7). Quanto maior for a espessura das placas dos capacitores, menor será a flexão da viga submetida à força Eletrostática. As dimensões do dispositivo são mostradas na Tabela 5.1. A máxima flexão de uma viga pode ser calculada pela equação (2.13), cujo valor obtido foi de 0,001 Å, no início da medida, sendo um valor desprezível. Entretanto, em vigas muito finas pode ocorrer o processo de rompimento durante a fabricação. Na Figura 3.17 é mostrado um exemplo de processo de fabricação malsucedido devido ao rompimento dos condensadores.

Mesmo que a temperatura na plataforma central seja alta, a diferença de temperatura no CP de cobre é pequena devido ao escoamento de calor proporcionado pelas vigas dissipadoras de calor, como mostrado na Figura 3.16 (d), onde foi nomeado de “parte superior do CP” a região do corpo de prova ligada a plataforma central próxima ao dispositivo MAET e, nomeado de “parte inferior do CP” a região do corpo de prova ligada a plataforma central da célula de carga. Os resultados das simulações mostram que a temperatura no corpo de prova é estável abaixo de 75 °C na parte superior do CP e encontra-se abaixo de 25°C na parte inferior do CP para uma tensão de 8V aplicada entre os terminais do atuador térmico. Foi observado um gradiente de temperatura de 50°C sendo semelhante a comportamentos encontrados na literatura [33].



**Figura 3.17** – Micrografia de dispositivo com viga partida durante processo de fabricação.

As Figura 3.18 (a) e (b) mostram os resultados da simulação MEF para a distribuição de temperatura no MAET utilizando as propriedades físicas do conjunto 1 e conjunto 2 da Tabela 2.2. As distribuições de temperatura pela viga e pela plataforma central são semelhantes, porém, os valores máximos de temperatura em cada um dos conjuntos são diferentes. As simulações também mostram que as vigas dissipadoras de calor conduzem o fluxo de calor para o substrato, mantendo o controle da temperatura do CP mesmo em ambiente de vácuo, onde não há troca de calor com o meio. Uma maior quantidade de vigas dissipadoras de calor situadas próximo da amostra melhora a dissipação de calor, possibilitando o controle da temperatura quando o dispositivo for acionado na ausência do ambiente de vácuo [33]. Não obstante, quanto mais vigas dissipadoras de calor, maior será a rigidez do atuador e menor será seu deslocamento total.



**Figura 3.18** – Simulação MEF de distribuição de temperatura em °C. Propriedade físicas da Tabela 2.2 a  $U = 8V$ . (a) conjunto 1 e (b) conjunto 2.

## 4. PROPOSTA DE UMA ABORDAGEM NUMÉRICA ALTERNATIVA

Os resultados de simulação MEF fornecem muitos resultados, de forma relativamente rápida (dependendo da complexidade da geometria utilizada), com boa precisão. Apesar disso, os programas utilizados, quando pagos, são ferramentas caras e também necessitam de uma máquina com bom desempenho computacional.

Os métodos teóricos são mais lentos pois necessitam de um longo período de estudo e verificação, entretanto, permitem um estudo e uma interpretação mais profunda do fenômeno estudado. Sobretudo, são ferramentas complementares aonde um mesmo resultado alcançado por vias diferentes aumenta a confiança no estudo.

A distribuição de temperatura em uma viga condutora qualquer, submetida a uma diferença de potencial elétrica, pode ser encontrada pela equação de fluxo de calor. Young [128] estuda a distribuição de calor em uma viga qualquer quando o material constituinte da viga é dependente da temperatura.

Contudo, mesmo que o estudo de Young datando do final do século XX (1986), o estudo da distribuição de temperatura e o deslocamento de atuadores térmicos possui lacunas na literatura. Uma dessas lacunas é a distribuição de temperatura e deslocamento de atuadores térmicos em formato de V de forma que seja levando em conta a dependência da temperatura para parâmetros físicos como condutividade elétrica, resistividade elétrica e coeficiente de dilatação linear. Assim, este capítulo se presta em desenvolver uma abordagem que descreva a distribuição de temperatura e o deslocamento de atuadores térmicos em formato de V com base nas equações propostas por Young.

### 4.1. ABORDAGEM COM $\kappa(T)$ E $\rho(T)$

Neste capítulo é proposto um modelo para descrever a temperatura e o deslocamento de um atuador térmico, com vigas dispostas em formato de V, utilizando uma abordagem numérica e analítica alternativa. A proposta apresentada pode ser empregada em outras geometrias de dispositivos MAET a partir de adaptações e condições de contornos estabelecidas.

A equação de Young para dissipação de calor por Efeito Joule em estado estacionário, equação (4.1) [128], foi reescrita em uma forma mais simples e é mostrada na equação (4.2).

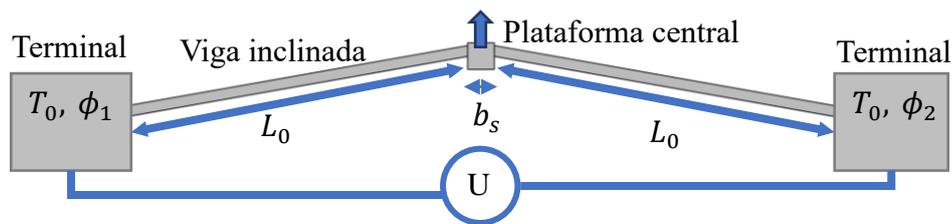
$$\phi = \int \frac{\left[ \frac{\kappa(T)}{\sigma(T)} \right]}{\sqrt{\eta - 2 \int \left[ \frac{\kappa(T)}{\sigma(T)} \right] dT}} dT + v \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} 2u = \eta - (\phi - v)^2 \\ u = \int \kappa(T)\rho(T)dT \end{cases} \quad (4.2),$$

onde  $\eta$  e  $v$  são constantes de integração que relacionam condições de contorno,  $\kappa(T)$  é a função de condutividade térmica,  $\rho(T)$  é a função de resistividade elétrica,  $\sigma(T)$  é a função de condutividade elétrica e  $\phi$  é o potencial elétrico ao longo da viga em V. Mais detalhes sobre a simplificação da equação de Young é mostrado no APÊNDICE A .

A solução da equação (4.2) fornece a o potencial elétrico em função da temperatura. Embora a solução de Young tenha sido proposta para calcular o gradiente de temperatura em viga simples, é possível utilizar os mesmos princípios para descrever a distribuição de temperatura em função do potencial elétrico, e a voltagem, de um atuador térmico em formato de V.

Na Figura 4.1 está representado um dispositivo MAET em formato de V com dois terminais elétricos, onde a voltagem aplicada  $U$  permite a passagem de corrente elétrica pelas duas vigas idênticas (dimensões: comprimento  $L_0 = 300 \mu\text{m}$ , largura de  $b = 8 \mu\text{m}$ , espessura de  $h = 5 \mu\text{m}$ , inclinação de  $\theta = 10^\circ$ ) separadas por uma largura da plataforma central de largura  $b_s = 40 \mu\text{m}$ . Na figura, a ddp  $U$  é definida como a diferença de potencial elétrico entre os terminais.



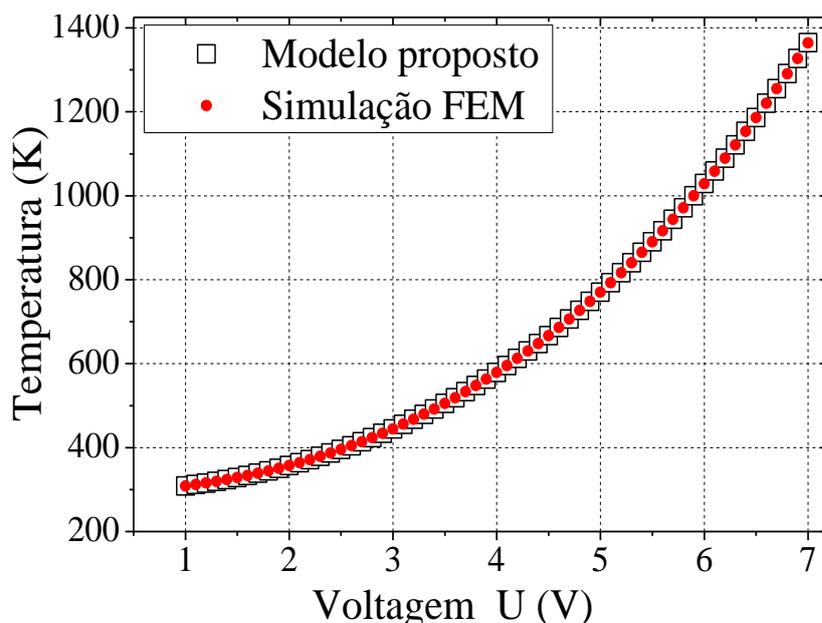
**Figura 4.1** – Esboço de um dispositivo MAET em forma de V. Comprimento da viga  $L_0 = 300 \mu\text{m}$ ,  $b = 8 \mu\text{m}$  de largura,  $\theta = 10^\circ$  de inclinação e largura da plataforma central de  $b_s = 40 \mu\text{m}$ . Toda a geometria possui uma espessura de  $h = 5 \mu\text{m}$ .

Utilizando as condutividades térmica e elétrica do Conjunto 1 da Tabela 2.2 e admitindo que: i) a temperatura nos terminais elétricos seja  $T_0 = T(0) = T(U) = 293,15\text{K}$ ; ii) as constantes de integração assumam o valor  $\nu = U/2$  e  $\eta = 2u_0 + U^2/4$ ; foi possível obter a seguinte solução:

$$\frac{U^2}{4} + 0.1 - \left(\phi - \frac{U}{2}\right)^2 = \frac{1.1 \times 10^{-5}(8241 T - 1.3 \times 10^6)}{T^{0.2747}} \quad (4.3)$$

, onde  $U = \phi_1 - \phi_2$  é a tensão aplicada entre os terminais,  $T_0$  é a temperatura dos terminais e  $u_0 = u(T_0) = -1,2 \text{V}^2$ . Os cálculos para obtenção da equação (4.3), assim como o cálculo das constantes de integração, são mostrados com mais detalhes no APÊNDICE B .

A equação (4.3) é uma equação transcendental e não é possível isolar o a temperatura em função do potencial elétrico, da mesma forma que é feito no trabalho de Young. Foi verificado, a partir dos resultados de simulação MEF, que os maiores valores de temperatura são encontrados na plataforma central. Assim, uma condição particular da equação (4.3) foi calculada para  $\phi = U/2$ , utilizando-a no *software* de cálculos numéricos Maple 17 para diferentes voltagens (o detalhamento é mostrado no APÊNDICE C ). A Figura 4.2 mostra um gráfico de temperatura da plataforma central por voltagem elétrica dos terminais do Conjunto 1 da Tabela 2.2 para uma simulação MEF (bolinha vermelha) e para uma condição particular do modelo proposto (quadrados vazios).

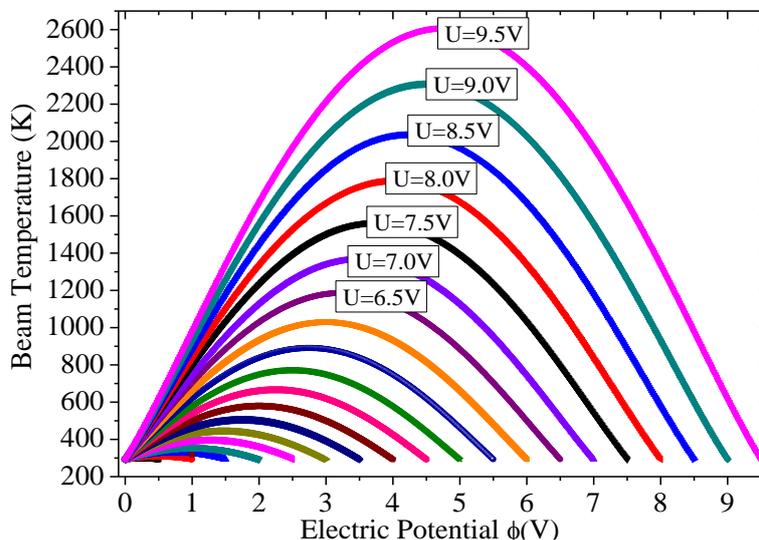


**Figura 4.2** – Resultado de simulação MEF (bolinhas vermelhas) e modelo proposto (quadrados pretos) para temperatura na plataforma central em função da tensão aplicada entre os terminais.

Visto que há uma concordância entre os valores simulados e os valores do modelo proposto, existe a necessidade de se contornar a limitação da equação transcendental. Assim, para estudar a distribuição de temperatura ao longo das vigas do dispositivo e da plataforma central, utilizou-se uma estratégia diferente da mencionada no parágrafo anterior. Agora, a temperatura  $T$  é calculada usando o potencial elétrico  $\phi$ , que por sua vez, é calculado com 500 subdivisões da voltagem  $U$ , ou seja, para o valor de entrada  $U = 1\text{ V}$ , o potencial elétrico  $\phi$  inicia em  $0\text{ V}$  e aumenta em passos de  $0,002\text{ V}$ , até chegar a  $1\text{ V}$ . Deste modo, para cada valor de  $\phi$ , se obtém uma temperatura correspondente. Este procedimento também foi aplicado para  $U$  em valores de  $0,5\text{ V}$  a  $9,5\text{ V}$  (com passo de  $0,5\text{ V}$ ). A Figura 4.3 mostra a distribuição de temperatura na viga inclinada em função do potencial elétrico para 19 voltagens distintas. Os comandos do programa Maple 17 para obtenção dos valores numéricos são mostrados no APÊNDICE C. Foi observado que as curvas de distribuição de temperatura mostradas na Figura 4.3 apresentam um comportamento de função quadrática em relação ao potencial elétrico. Então, faz-se necessário encontrar a temperatura  $T$  em função do potencial elétrico  $\phi$ , que podem ser obtidos a partir do ajuste polinomial de segunda ordem com base na seguinte equação:

$$T(\phi) = f_2(U)\phi^2 + f_1(U)\phi + T_0 \quad (4.4)$$

, onde  $f_2$  é o coeficiente quadrático e  $f_1$  o coeficiente linear. Para cada valor da voltagem  $U$  (ver Figura 4.3) os coeficientes  $f_1$  e  $f_2$  associados são obtidos e encontram-se na Tabela 4.1.



**Figura 4.3** – Temperatura em função do potencial elétrico ao longo do comprimento da viga para diferentes voltagens ( $U$ ).

Para cada curva da Figura 4.3, foi realizado um ajuste polinomial de segunda ordem e os resultados foram organizado na Tabela 4.1, que apresenta os resultados obtidos dos gráficos de  $f_1$  vs  $U$  e  $f_2$  vs  $U$  (ver APÊNDICE D), possibilitando um novo ajuste polinomial tendo como resultado as seguintes funções:

$$\begin{cases} f_1(U) = 0.01 + 61.22 U - 0.03 U^2 + 0.71 U^3 - 0.03 U^4 \\ f_2(U) = -61.27 + 0.1 U - 0.78 U^2 + 0.038 U^3 - 4.10^{-4} U^4 \end{cases} \quad (4.5)$$

Combinando as equações (4.4) e (4.5) é possível expressar a temperatura ( $T$ ) como função do potencial elétrico ( $\phi$ ) e tensão elétrica ( $U$ ), visando obter a distribuição de temperatura sobre o dispositivo MAET em forma de V. O potencial elétrico  $\phi$  está relacionado com a comprimento/posição na viga e direciona o perfil de temperatura para cada ddp  $U$ .

Para calcular o deslocamento da plataforma central do dispositivo MAET é necessário encontrar o potencial elétrico como função da posição na viga [ $\phi(x)$ ]. Logo, tomando como apoio o modelo de Young [128] é usado o potencial elétrico auxiliar  $\psi$  através da seguinte equação:

$$\psi = \frac{1}{\sigma_0} \int \sigma[T(\phi)] d\phi \quad e \quad \nabla^2 \psi = 0 \quad (4.6),$$

onde  $\sigma_0$  é a condutividade elétrica à temperatura ambiente. Assumindo que  $\sigma(T) = 1 / \rho(T)$  representa a condutividade térmica e a resistividade térmica como função da temperatura e, substituindo as equações (4.4) e (4.5) na equação da resistividade do conjunto 1 da Tabela 2.2, o resultado do cálculo é aplicado na equação (4.6) para encontrar o potencial elétrico como função da posição, onde obtém-se a equação (4.7). Mais detalhes sobre o desenvolvimento dos cálculos são mostrados APÊNDICE E .

**Tabela 4.1** – Valores de coeficiente do ajuste linear para curvas da Figura 4.3. A temperatura dos terminais  $T_0$  foi definida como 293.15K,  $f_1$  é o coeficiente linear e  $f_2$  é o coeficiente quadrático.  $\sigma_{fi}$  é o erro para o respectivo coeficiente.

U (V)	$f_1$ (KV <sup>-1</sup> )	$\sigma_{f1}$ (KV <sup>-1</sup> )	$f_2$ (KV <sup>-2</sup> )	$\sigma_{f2}$ (KV <sup>-2</sup> )
0.5	30.70	0.01	-61.41	0.01
1.0	61.89	0.01	-61.91	0.01
1.5	94.02	0.02	-62.74	0.02
2.0	127.55	0.05	-63.88	0.03
2.5	162.86	0.09	-65.30	0.04
3.0	200.29	0.15	-66.99	0.06
3.5	240.14	0.22	-68.90	0.08
4.0	281.84	0.73	-70.79	0.23
4.5	327.90	0.44	-73.32	0.13
5.0	376.12	0.58	-75.76	0.15
5.5	427.38	0.74	-78.33	0.17
6.0	481.72	0.92	-81.00	0.20
6.5	539.18	1.12	-83.76	0.22
7.0	599.78	1.34	-86.58	0.25
7.5	663.53	1.57	-89.46	0.27
8.0	730.40	1.83	-92.38	0.29
8.5	800.39	2.09	-95.33	0.32
9.0	873.47	2.38	-98.31	0.34
9.5	949.63	2.68	-01.30	0.36

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi = \frac{1}{2f_2\gamma} \lambda \tan \left[ \frac{\lambda}{2} (ax + b) \right] - \frac{f_1}{2f_2} \quad (a) \\ \lambda = \sqrt{4(\gamma f_2)(T_0\gamma + 1) - (\gamma f_1)^2} \quad (b) \\ b = \frac{2}{\lambda} \tan^{-1} \left( \frac{f_1\gamma}{\lambda} \right) \quad (c) \\ a = \frac{2}{L_0\lambda} \tan^{-1} \left[ \frac{\gamma}{\lambda} (2f_2U + f_1) \right] - \frac{b}{L_0} \quad (d) \end{array} \right. \quad (4.7)$$

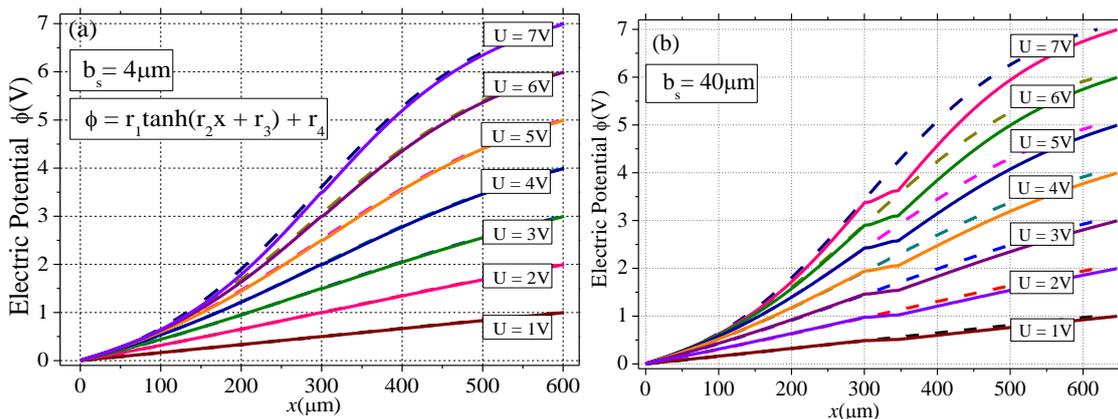
Utilizando as propriedades do Silício policristalino do conjunto 1 da Tabela 2.2 e, assumindo que  $U = 1$  V e aplicando na equação (4.7b), foi obtido o valor de  $\lambda = 14.78i$ . O resultado implica que, para qualquer valor positivo de  $U$ , o valor de  $\lambda$  sempre será um número complexo. Então, reescrevendo  $\lambda$  como  $\lambda = i\Lambda$ , onde  $\Lambda$  é um número positivo, é possível reescrever a equação 4.7 na forma da seguinte equação:

$$\phi = r_1 \tanh[r_2x + r_3] + r_4 \quad (4.8),$$

onde  $r_1 = \Lambda / (2f_2\gamma)$ ,  $r_2 = \Lambda ax$ ,  $r_3 = \Lambda b$  e  $r_4 = -f_1/2f_2$ . Mais detalhes desta transformação podem ser vistos no APÊNDICE E .

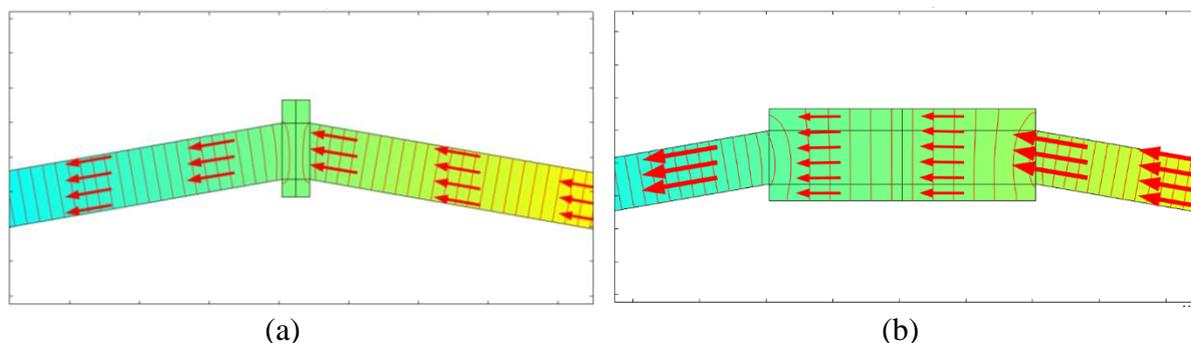
Deste modo, a variável  $\phi$  depende da tangente hiperbólica e da posição  $x$  ao longo da viga do dispositivo MAET. Os resultados estão em acordo com resultados obtidos da literatura, os quais também mostraram uma relação hiperbólica para dependência de temperatura do dispositivo [10,38,54,59,129].

A Figura 4.4 (a) e (b) mostra os resultados das simulações de MEF e os valores do modelo proposto dos potenciais elétricos ao longo do comprimento da viga inclinada [ $\phi(x)$ ] para sete diferentes tensões elétricas ( $U$ ). Quando a largura da plataforma central é de  $b_s = 2 \mu m$ , o modelo proposto consegue apresentar um comportamento semelhante ao da simulação MEF, Figura 4.4 (a). No entanto, quando a largura da plataforma central é de  $b_s = 40 \mu m$ , as simulações indicam um desvio na curva do potencial elétrico em  $x = 300 \mu m$  quando comparado ao modelo proposto.



**Figura 4.4** – Simulação MEF e Modelo proposto da função potencial elétrica vs. comprimento para o dispositivo MAET em forma de V.  $r_1, r_2, r_3$  e  $r_4$  são constantes da função de potencial elétrico. Os resultados de simulação são mostrados com linhas pontilhadas e nosso modelo com linhas cheias.

Na Figura 4.5 são mostrados os resultados da simulação de elementos finitos para o campo elétrico e potencial elétrico no dispositivo MAET. É observada uma mudança na direção do campo elétrico e do potencial elétrico para o dispositivo pela plataforma central. Em particular, na Figura 4.5 (b), o campo elétrico adquire a mesma direção da plataforma central, devido a esta possuir maior largura. Essa mudança na direção e intensidade do campo elétrico pode ter relação com o desvio da curva de potencial encontrado na Figura 4.4 (b).



**Figura 4.5** – Distribuição do potencial elétrico e campo elétrico no dispositivo MAET para  $U = 8V$ . As linhas vermelhas transversais são as linhas equipotenciais e as setas vermelhas são os campos elétricos. (a)  $b_s = 2 \mu m$  e (b)  $b_s = 40 \mu m$ .

Segundo a literatura [59,62,69,94,130,131], a média de uma função da temperatura no dispositivo pode ser utilizada para calcular o deslocamento causado pelo aquecimento de uma viga. Outra forma [132] é considerar a divisão da viga em partes infinitesimais, de forma que o deslocamento seria dado pelo somatório de pequenos deslocamentos, ou seja:

$$\Delta L = \sum \Delta L_i = \sum L_i \alpha_i (T_i - T_0) \quad (4.9)$$

Para um grande número de deslocamentos infinitesimais, a soma pode ser escrita por uma integral da seguinte forma:

$$\Delta L(U) = \int_0^{L_0} dx \alpha(x) \Delta T(x) \quad (4.10),$$

cujos resultados fornecem o deslocamento de uma viga sob uma variação de temperatura ao longo do comprimento. Assim, é possível relacionar o coeficiente de dilatação linear e a função temperatura (dependentes de posição) e calcular o deslocamento final do dispositivo.

A fim de se obter o deslocamento na plataforma central, assume-se a transformação  $\alpha(T) \rightarrow \alpha(x)$  para valores descritos no conjunto 1 da Tabela 2.2. Para se obter  $T(x)$ , substitui-se a equação (4.8) na equação (4.4), e a solução obtida é aplicada na equação (4.10), obtém-se como resultado o deslocamento. Todavia, deve-se levar em conta os fatores geométricos da viga [comprimento ( $L_0$ ), seção reta ( $h$  e  $b$ ) e inclinação ( $\theta$ )], como já demonstrado por Zhu [39]. Assim, o deslocamento da plataforma central de um dispositivo MAET em formato de V é obtido multiplicando o fator geométrico pelo deslocamento utilizando a seguinte equação:

$$\Delta L_\theta = f(\theta) \Delta L(U)$$

$$f(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{\sin^2(\theta) + \left[ \cos(\theta) \frac{b}{L_0} \right]^2} \quad (4.10)$$

onde  $\theta$  é a inclinação das vigas em V<sup>g</sup>. Manipulando devidamente a equação (4.10) é possível separar o deslocamento do dispositivo MAET em uma parte geométrica dependente de  $f(\theta)$  e em outra parte que depende do deslocamento devido à aplicação da voltagem U

---

<sup>g</sup> Aqui, a explicação da variável  $\theta$  foi repetida para facilitar a leitura.

$[\Delta L(U)]$ . Assim, se a propriedade física do silício muda, basta calcular o novo deslocamento e multiplicar pelo mesmo fator geométrico.

#### 4.2. ABORDAGEM PARA $\kappa_0$ E $\rho_0$

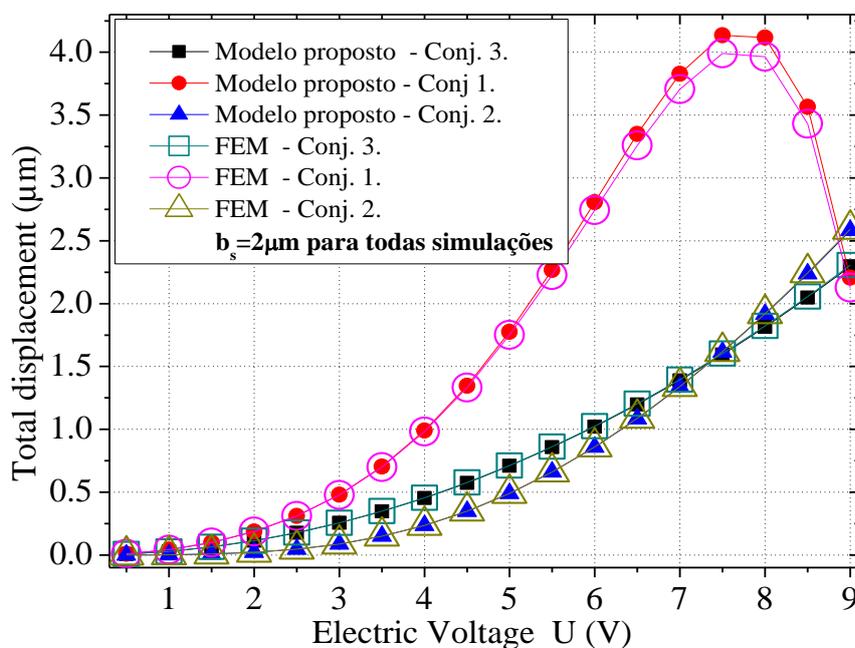
As propriedades físicas do silício mudam com a dopagem, como resistividade elétrica e condutividade térmica [34,133–136]. Visando a extensão do método para outros tipos de propriedades, como por exemplo aqueles que possuem algumas propriedades independentes da temperatura (conjunto 2 e conjunto 3 da Tabela 2.2), utilizou-se os mesmos procedimentos da seção anterior para obtenção do deslocamento do dispositivo em formato de V. Assim, aplicando os procedimentos descritos na seção anterior para as propriedades físicas do conjunto 3 da Tabela 2.2, tem-se as seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(\phi) = T_0 + \frac{1}{2\rho_0\kappa_0} \left[ \frac{U^2}{4} - \left( \phi - \frac{U}{2} \right)^2 \right] \quad (a) \\ \phi(x) = \frac{U}{2L_0} x \quad (b) \\ T(x) = T_0 + \frac{U^2}{8\kappa_0\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right] \quad (c) \\ \Delta L_\theta = f(\theta)\Delta L_{\kappa_0\rho_0} = f(\theta) \left[ \frac{\alpha_0 L_0}{12\kappa_0\rho_0} U^2 \right] \quad (d) \\ I = U \frac{mbh}{\rho_0(2L_0 + b_s)} \quad (e) \end{array} \right. \quad (4.11)$$

A equação (4.11) mostra, em sequência: a temperatura em função do potencial elétrico, o potencial elétrico em função da posição, a temperatura em função da posição o deslocamento do dispositivo MAET em função da voltagem elétrica e a corrente que é consumida pelo dispositivo. Maiores detalhes sobre os desenvolvimentos dos cálculos realizados para obtenção das equações estão disponíveis no APÊNDICE G . Os resultados referentes à distribuição de temperatura no dispositivo MAET em formato de V são semelhantes aos encontrados por Young [128] para uma viga presa nas extremidades [equação (4.11.a)]. Observou-se que o deslocamento  $\Delta L_{\kappa_0\rho_0}$  mostrado na equação (4.11 - d) que é muito semelhante ao encontrado no trabalho de Cuan e Zhu [62].

A distribuição de temperatura descrita para o silício no conjunto 2 da Tabela 2.2 é semelhante às equações 4.11.(a), (b) e (c), pois o coeficiente de condutividade térmica e a resistividade são independentes da temperatura, porém, o deslocamento final assume uma forma diferente da mostrada na equação (4.11 – d), devido a dependência térmica representada pelo coeficiente de expansão térmica. No APÊNDICE I é apresentado os cálculos para o deslocamento em mais detalhes.

A Figura 4.6 mostra uma comparação entre os resultados numéricos/análíticos realizados com o software Maple 17 e as simulações MEF, ambos, utilizando os conjuntos 1, 2 e 3. Mais detalhes sobre os comandos e as soluções das equações utilizando o Maple 17 são encontrados nos APÊNDICE F , APÊNDICE H e APÊNDICE J .



**Figura 4.6** – Deslocamento por tensão elétrica dos conjuntos 1, 2 e 3 da Tabela 2.2 para simulação de MEF e modelo proposto. Dispositivo MAET em forma de V, para uma largura da plataforma central de  $2\mu\text{m}$ . Os pontos de dados estão ligados por linhas apenas para ilustração.

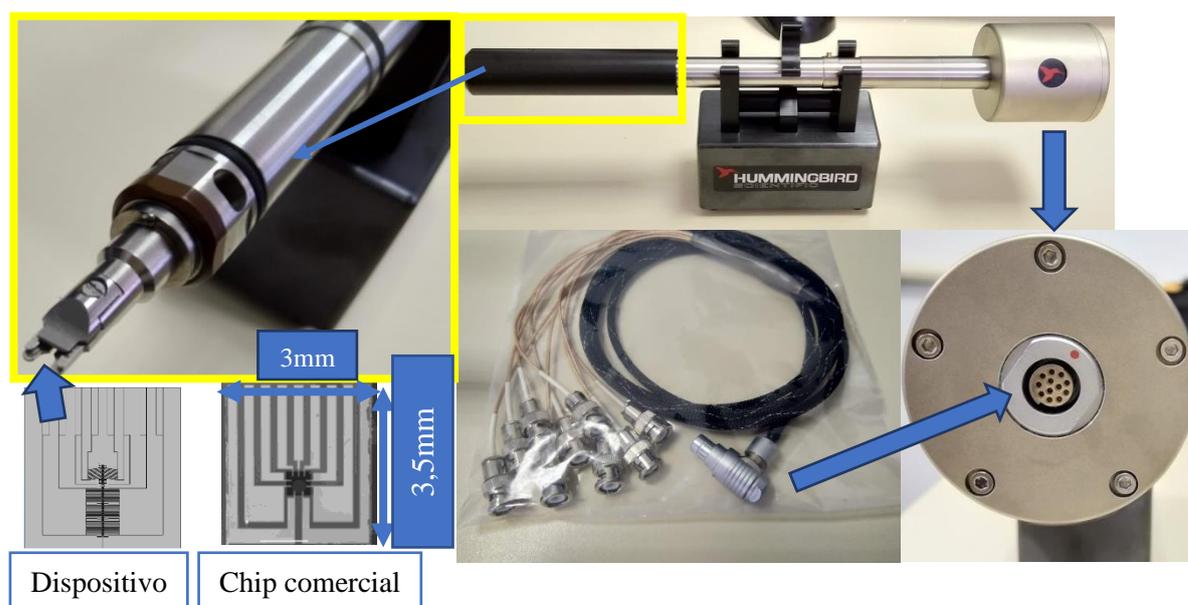
Os resultados obtidos para o deslocamento a partir da simulação MEF e o modelo proposto estão em concordância, com valores de  $2,6\mu\text{m}$  para  $U = 9\text{V}$  (para o conjunto 2) e  $2,1\mu\text{m}$  para  $U = 9\text{V}$  (para o conjunto 1). Analisando os resultados do conjunto 1 na simulação MEF e do modelo proposto, a curva mostra um ponto de inflexão em torno de  $6\text{V}$  e um deslocamento máximo para  $8\text{V}$ . Esse valor máximo provavelmente está associado ao comportamento do coeficiente de expansão térmica utilizado, dado por Zhu [39]. Os valores obtidos para o deslocamento utilizando parâmetros constantes (conjunto 3), foi de

2,3  $\mu\text{m}$  para  $U = 9 \text{ V}$ . Sobretudo, a partir da modelo proposto, foi possível obter um resultado semelhante à simulação MEF, como temperatura e deslocamento da plataforma central, desde que seja considerada uma plataforma central com largura pequena.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

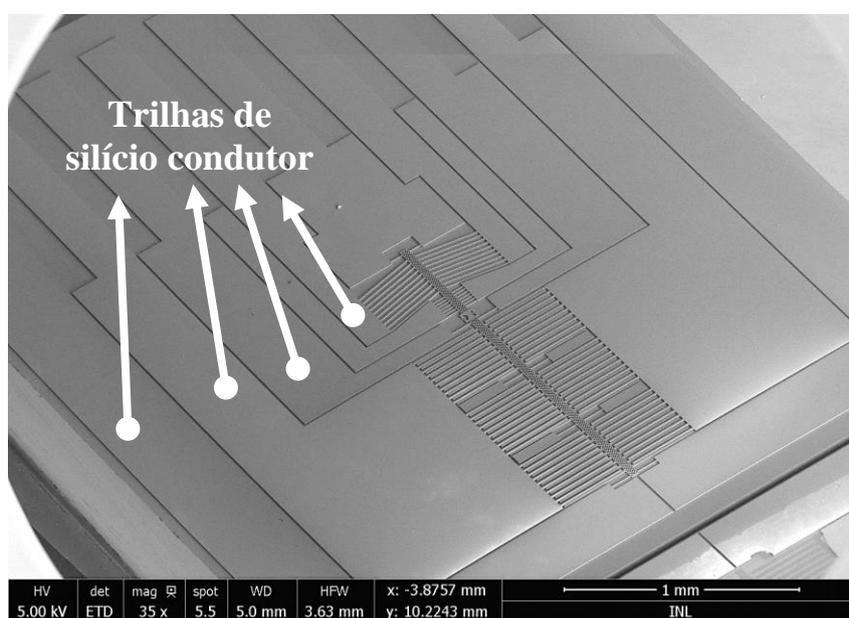
Com intuito de validar e aplicar os resultados numéricos mostrados no Capítulo 4, construiu-se um dispositivo MAET, mencionado anteriormente, usando as instalações do International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL), localizado em Braga - Portugal. O objetivo final da colaboração foi criar uma rota de fabricação que possibilitou construir um dispositivo MAET em formato de V para realizar um teste de tração dentro do MET. Este tipo de configuração permite analisar os mecanismos de deformação, comentados no Capítulo 2.7, durante o ensaio de tração de um corpo de prova (CP).

Para estudo de mecanismo de deformação, comentado no capítulo 2, é necessário um dispositivo para ensaio de tração acoplado a um porta-amostra de MET da *HummingBird* (porta-amostra de Bias Elétrico) que é um dispositivo que permite a aplicação deste sinal elétrico dentro do microscópio. A Figura 5.1 mostra o porta-amostra para aplicação de sinal elétrico da *HummingBird*. A ideia é fabricar os dispositivos com as mesmas dimensões do chip comercial (micrografia no canto inferior esquerdo na Figura 5.1). O chip comercial pode ser encaixado, por pressão, no porta-amostra e inserido no microscópio. O porta-amostra possui um conector que possibilita 9 conexões BNC permitindo tanto a aplicação de corrente/tensão elétrica, quanto a medida de sinais elétricos durante a aquisição de uma micrografia de MET.



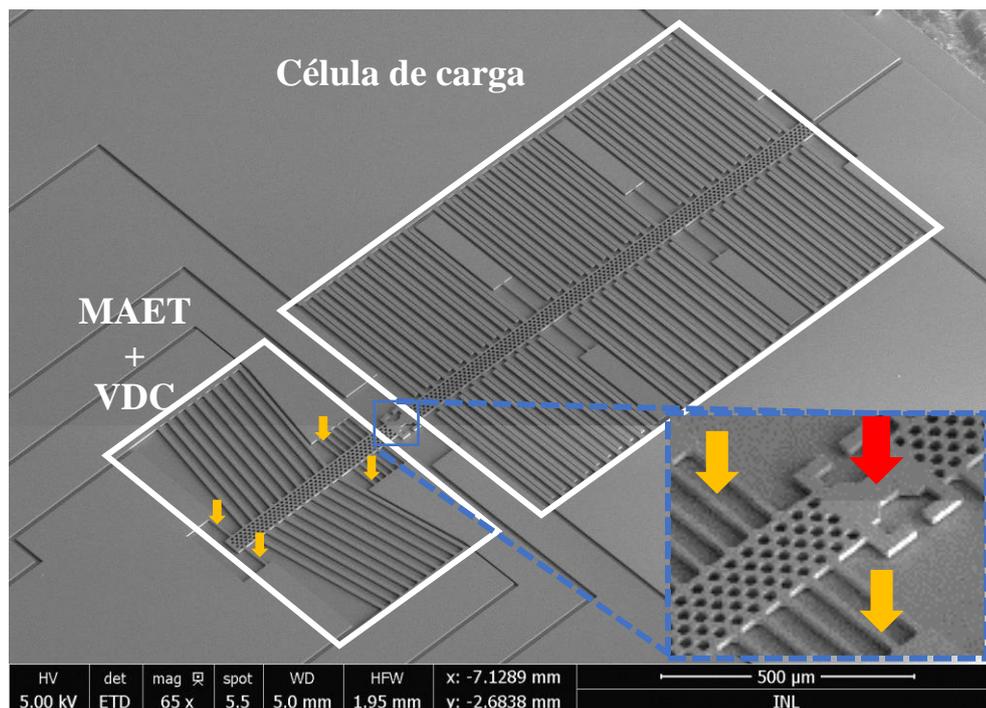
**Figura 5.1** – Porta amostra da Hummingbird com micrografia de MEV de chip comercial.

O dispositivo de ensaio de tração deve possuir um MAET para exercer a força no CP, vigas dissipadoras de calor para escoar o calor para substrato, uma célula de carga para medir a força submetida ao CP. A célula de carga é construída juntamente com um extensômetro capacitivo (Ex.C) para medir o deslocamento/deformação submetidos do CP [39]. A Figura 5.2 mostra uma micrografia do dispositivo para ensaio de tração. As dimensões usadas na fabricação podem ser encontradas na Tabela 5.1. Na Figura 5.3, as setas amarelas chamam a atenção para as vigas dissipadora de calor. A seta vermelha mostra a região onde deve ser posicionada a amostra para ensaio de tração (corpo de prova).



**Figura 5.2** – Micrografia de MEV do dispositivo para ensaio de tração.

É necessário um furo passante no substrato para o feixe de elétrons. As condições de operação do porta-amostra para aplicação de sinal elétrico de MET obriga que o substrato possua aproximadamente 200  $\mu\text{m}$  de espessura de modo que não danifique o dispositivo e nem o porta-amostra. Na indústria de semicondutores, o substrato utilizado para fabricação de MEMS possui 650  $\mu\text{m}$  de espessura. Desta forma, foi necessário reduzir a espessura do silício semiconductor (*handler layer*) para que possa encaixar no porta-amostra, sendo um processo delicado e difícil, como será mostrado mais à frente. No entanto, os dispositivos mostrados na Figura 5.2 e Figura 5.3 serão utilizados para validar as equações mostradas no Capítulo 4.



**Figura 5.3** – Micrografia de MEV do dispositivo para ensaio de tração. Região da amostra (seta vermelha) e vigas dissipadora de calor (setas amarelas)

**Tabela 5.1 - Dimensão e símbolos do Microdispositivo**

<i>Nome</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
MAET comprimento	$L_0$	300µm
MAET Largura	$b$	8µm
MAET largura	$h$	5µm
MAET inclinação	$\theta$	10°
Nº de pares de vigas inclinadas	$m$	10
Comprimento da VIGAS vigas dissipadora de calor	$L_{vdc}$	60µm
Largura da vigas dissipadora de calor	$b_{vdc}$	4µm
Nº de pares de vigas SB	$n$	8
Comprimento da viga da célula de carga	$L_{cc}$	100µm
Largura da viga da célula de carga	$b_{cc}$	4µm
Nº de pares de sustentação da célula de carga	$q$	4
Comprimento do Ex.C	$L_C$	320µm
Largura do Ex.C	$b_C$	10µm
Nº de pares do Ex.C.	$N$	30
Distância inicial entre placas do Ex.C.	$d_{0y}$	1µm

## 5.1. EQUIPAMENTOS PARA MICROFABRICAÇÃO DE MEMS

Antes de seguir propriamente com os processos de fabricação do dispositivo para ensaio de tração, faz-se necessário uma breve descrição dos equipamentos utilizados para o processo de fabricação e medida. As imagens dos equipamentos foram retiradas das SOP – LIM (<https://lims.inl.int>).

### Forno de recobrimento de HDMS

A Figura 5.4 mostra uma imagem do forno *YES-310TA Vapor Prime + image Reversal Oven* fabricado pela Yield Engineering Systems, utilizado para aquecer e recobrir, a 150°C, o substrato com HMDS (Hexamethyldisilazane) para melhorar a adesão de fotoresiste [96]. O HMDS facilita a adesão de compostos orgânicos como é o caso dos fotoresistes, por promover uma forte ligação de silano na superfície [137].

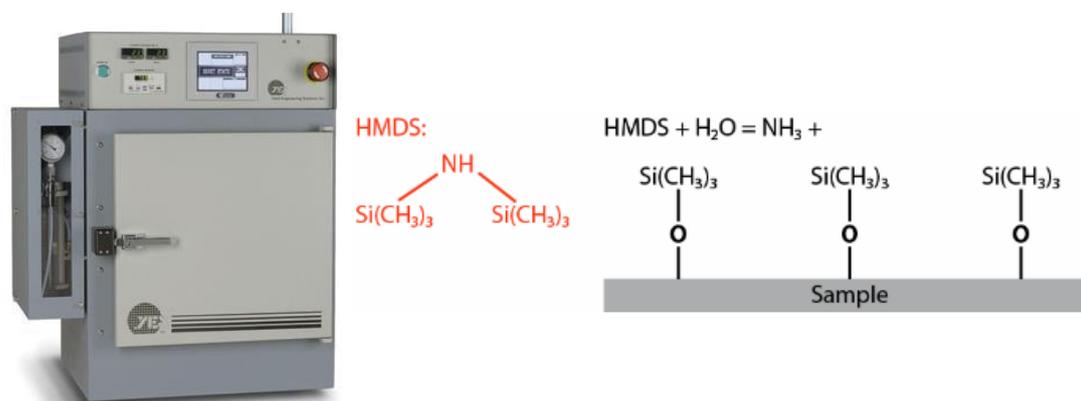
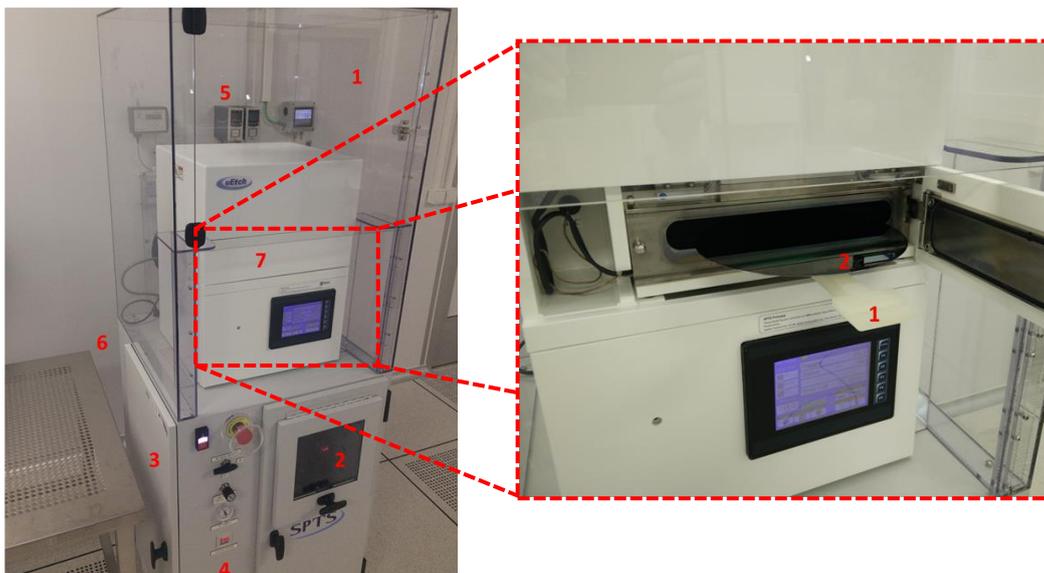


Figura 5.4 – Forno *YES-310TA Vapor Prime*

### SPTS Primaxx HF vapor etcher

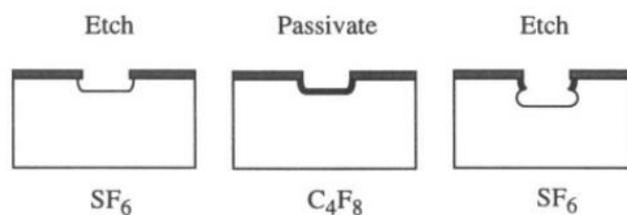
A Figura 5.5 mostra a SPTS Primaxx HF vapor etcher que consiste em um equipamento utilizado para atacar o óxido de silício com vapor de HF de forma isotópica, sendo um processo estável e de alta seletividade. O sistema consiste em: (1) cabine de ventilação; (2) cabine de exaustão de gás de HF anídrico (cilindro de HF CGA6600 em cilindro de teflon); (3) cabine para álcool (etanol – GL38); (4) painel com indicadores; (5) sistema de detecção de vazamento de gás; (6) bomba de vácuo a seco e (7) módulo uEtch. O módulo uEtche contém um módulo de chassi, câmara de processamento e um visor eletrônico. O equipamento usa fluxos de  $\text{N}_2$  / EtOH / HF a 910/400/600 sccm em uma pressão de 112mTorr aproximadamente para purgar e auxiliar o processo de ataque de  $\text{SiO}_2$ .



**Figura 5.5** - Sistema SPTS Primaxx HF vapor etcher para remoção de óxido de silício

### **SPTS PEGASUS DEEP SILICON ETCHER - DRIE**

A Figura 5.6 mostra o equipamento da SPTS, que utiliza o método Bosch (DRIE – *Deep reactive Ion Etching*) para ataques profundos em silício. O método Bosch é um sistema dedicado ao ataque profundos de silício feitos a plasma, alternando entre os gases  $\text{SF}_6$  (gás de ataque) e  $\text{C}_4\text{F}_8$  (gás para deposição polimérica). O sistema possibilita um ataque anisotrópico do Si com trincheiras de alta razão de aspecto em silício. O sistema da SPTS usa gás hélio nas parte de trás (*back side*) do substrato para resfriamento. O sistema é composto por, (1) câmara de carregamento, (2) câmara de processamento, (3) bombas turbo e mecânica, (4) rack com fonte de potência RF 6,5KW, 13,56MHZ para gerador ionizante do gás e fonte de potência RF 500W 380KHz RF para eletrodo do substrato, (5) chiller para resfriamento, (6) cabine de gás para armazenar  $\text{C}_4\text{F}_8$  e  $\text{SF}_6$ , (7) Bobina superior para ionização do plasma, (8) sistema de fixação eletroestática e sistema de resfriamento a hélio.



**Figura 5.6** – SPTS PEGASUS DRIE - método Bosch (adaptado de [97]).

### SPTS APS OXIDE ETCHER

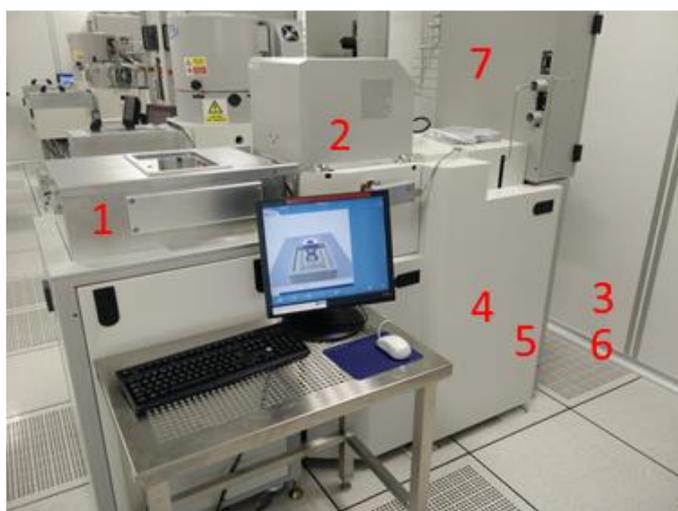
Sistema configurado para ataque de dielétricos, comumente dedicado a ataque de SiO<sub>2</sub>, podendo também ser utilizado para Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, como mostra a Figura 5.7. Tem a capacidade de realizar ataques profundos, com paredes próximas a vertical com boa seletividade sobre a camada de parada e a máscara usada. O fluxo de gás hélio é soprado na parte de trás do substrato por resfriamento. O sistema é composto por (1) câmara de carregamento, (2) câmara de processamento, (3) bomba turbo e bomba mecânica, (4) rack de alimentação com fonte de potência RF de 3000KW e 13,56MHz para a bobina e uma fonte de potência RF de 1500W e 13,56MHZ para o substrato, (5) chiller para resfriamento, (6) entrada de gases (SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e He), (7) fixador eletroestático e (8) resfriamento a hélio para substrato.



**Figura 5.7** – APS OXIDE ETCHER. Dispositivo para ataque de dielétricos.

### SPTS MPX PECVD

Sistema de deposição de filmes finos por plasma, Figura 5.8. Pode ser usado para deposição de óxido de silício, nitreto de silício, e silício amorfo condutor, com uma espessura máxima de deposição de 5  $\mu\text{m}$ . Trabalha com substratos de 200 mm de diâmetro. O sistema é composto por: (1) câmara de carregamento; (2) câmara de processamento; (3) bomba mecânica; (4) gabinete de distribuição DC e RF; (5) gerado RF e casador de impedância; (6) chiller; (7) gabinete com gases  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ .



**Figura 5.8** – SPTS PECVD. Dispositivo para deposição de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$  e Si amorfo.

### **PVA TEPLA PLASMA ASHER**

Na Figura 5.9 é mostrada uma imagem do sistema PVA TEPLA PLASM ASHER. Este sistema comumente é utilizado para remoção de fotoresiste, utilizando plasma em uma frequência de 2,45GHz com uma atmosfera de oxigênio, trabalhando em pressão que varia de 0,2 a 2mbar. Devido à característica do plasma, possui boa seletividade para o resiste em relação à metais e óxidos. De modo geral é um processo não destrutivo para a maioria dos materiais, exceto àqueles que são facilmente deteriorados em oxigênio, como Ag, Cu, Cr, Fe, Ru e etc. O sistema é composto por: câmara de vácuo de quartzo com 245mm de diâmetro e 350 de comprimento, suporte de quartzo para 27 substratos com 200 mm de diâmetro, fonte de potência de 1000W, medidor de temperatura de infravermelho, linha de gás de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar e CF<sub>4</sub> e bomba de vácuo Oerlikon Trivac 65BSC.

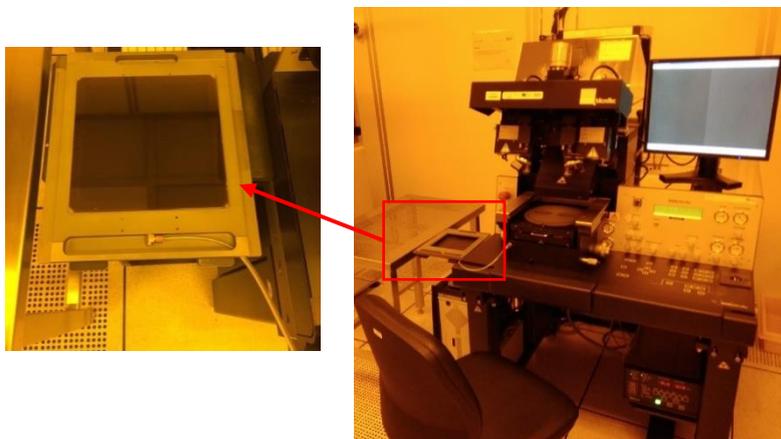


**Figura 5.9** – Sistema para remoção de resiste PVA TEPLA Plasma Asher.

### **SUSS MA6BA6 MASK ALIGNER**

A Figura 5.10 mostra a foto alinhadora SUSS MA6BA6 MASK ALIGNER. É um dispositivo de litografia ótica com capacidade de alinhamento frontal, alinhamento com os dois lados do substrato (trás e frente) e alinhamento entre substratos para colagem. Este equipamento geralmente é utilizado para transferir padrões de alinhamento de uma face para outra do substrato, que são feitos por meio de duas CCDs, uma localizada embaixo do substrato e outra em cima da *HardMask*. O alinhamento é feito por um painel eletrônico, enquanto o ajuste é feito pelo monitor que fica ao lado da alinhadora. O equipamento permite

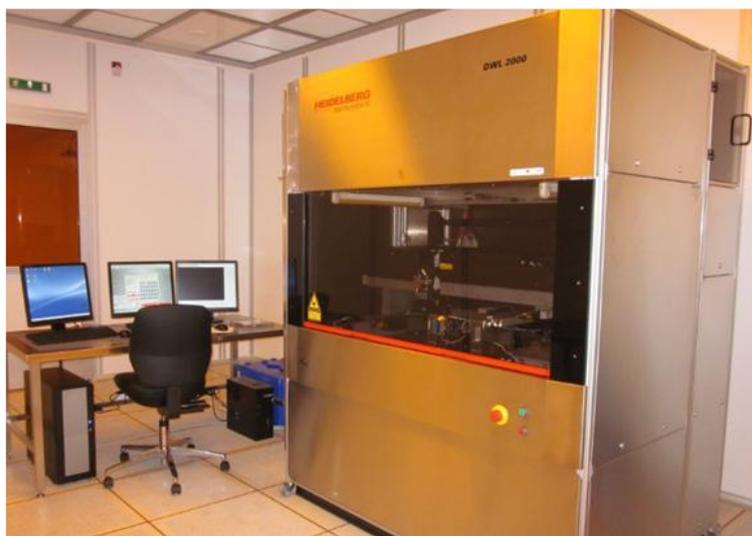
trabalhar com substratos de até 150mm de diâmetro, trabalhando com luz ultravioleta, permitindo uma resolução de até 1 $\mu$ m.



**Figura 5.10** – SUSS MA6BA6 MASK ALIGNER, sistema de alinhamento entre faces do substrato.

### **DWL 2000 DIRECT WRITE LASER**

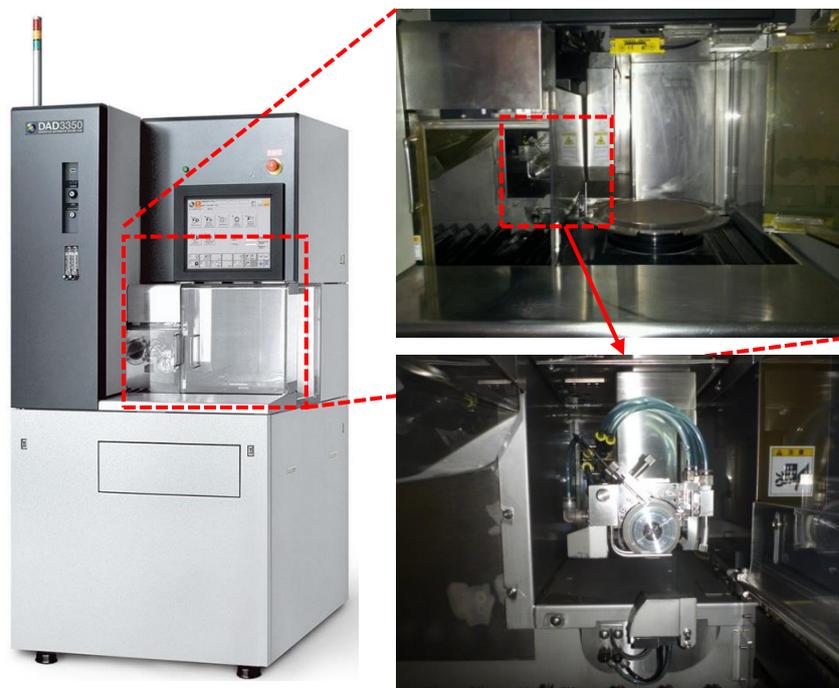
A Figura 5.11 mostra o sistema de escrita direta utilizado para litografar as máscaras no resiste. O sistema é equipado com laser de 405 nm e 375 nm, o que permite alcançar uma resolução de décimos de micrometros, dependendo da espessura do resiste. Permite a exposição em foto resistes aplicados a substratos de até 250 mm de diâmetro.



**Figura 5.11** – DWL 2000, sistema de litografia de escrita direta.

### Automatic Dicing Saw DAD 3350

A Figura 5.12 mostra o sistema de corte *Automatic Dicing Saw DAD 3350*. Este sistema é capaz de cortar substrato de silício, ou quartzo, (de até 250 mm<sup>2</sup>) com resolução de micrômetros. O sistema é equipado com serra em disco de diamante permitindo um corte preciso do substrato.



**Figura 5.12** – Sistema para corte de substrato, Dicing Saw DAD 3350.

### Optical Photoresist, SUSS Gamma

A Figura 5.13 mostra o sistema Optical Photoresist, SUSS Gamma. Este sistema é automatizado para aplicação de resiste e revelação em substratos de silício de até 250 mm de diâmetro. O sistema é equipado com um braço mecânico manipulador, um prato quente, um prato frio. O equipamento também possui um *spin coater* com aplicação de água, revelador e foto resiste automatizado. O sistema é equipado com um leitor óptico para encaixe de dois cassetes, suportando até 26 substratos cada um. Coloca-se o substrato dentro de cassetes, programa-se no painel a receita desejada e o sistema entrega o substrato com o resiste aplicado ou com a revelação feita.

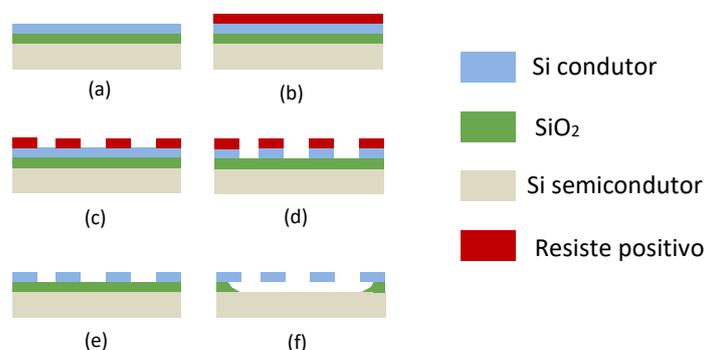
Caso seja necessário aplicar resiste, ou fazer revelação de um pedaço de SOI quadrado, usa-se fita kapton para prender o substrato no centro em um substrato se suporte com 200mm de diâmetro.



**Figura 5.13** – Sistema para aplicação de resiste e revelação, Optical Photoresist, SUSS Gamma.

## 5.2. FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO SEM FURO PASSANTE

Existem muitos exemplos de fabricação na literatura para atuadores térmicos baseados em substratos SOI ou, também, filmes de silício condutor depositados por CVD [47,49,80,87,99,138–141]. A Figura 5.14 mostra um esquemático do processo de fabricação do dispositivo MAET sem o furo passante. Foi fabricado a partir de um substrato SOI composto por 5  $\mu\text{m}$  de Si dopado com As, 2  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  e com uma camada manipuladora de 650 $\mu\text{m}$  de espessura de silício semiconductor.



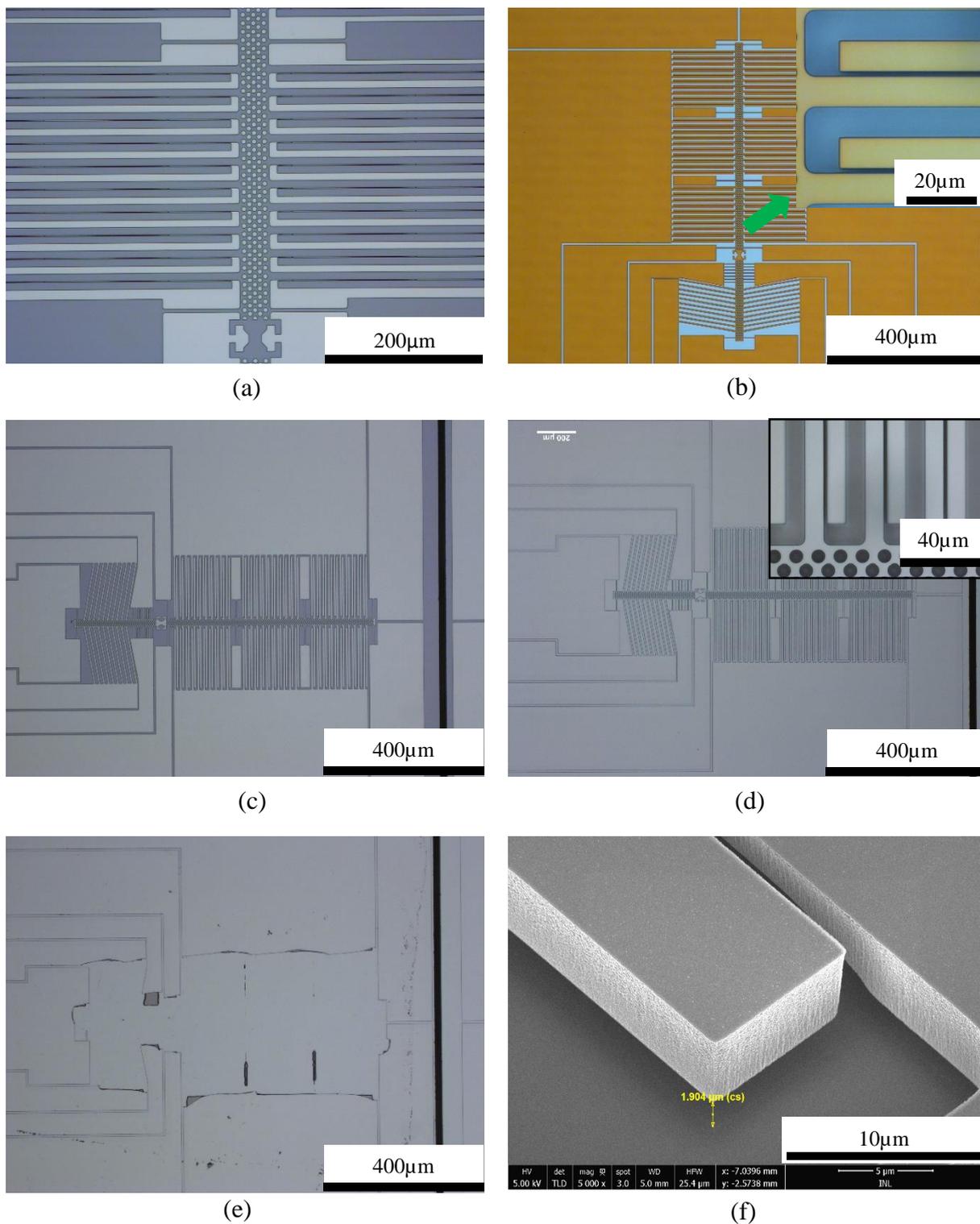
**Figura 5.14** – Etapas para o processo de fabricação, (a) ponto inicial; a bolacha de SOI; (b) aplicação de resiste; (c) litografia a laser; (d) DRIE no silício condutor; (e) plasma asher; (f) ataque com vapor de HF.

Para a fabricação do dispositivo sem furo passante, seguiu-se os seguintes passos listados abaixo:

1. Cortou-se de um SOI de 200 mm de diâmetro um pedaço de 4 cm x 4 cm usando a Automatic Dicing Saw DAD 3350;

2. O pedaço de SOI foi limpa usando acetona, IPA, H<sub>2</sub>O e, por último, passou por uma limpeza de plasma no PVA TEPLA Asher;
3. A superfície foi revestida com HMDS usando o *Prime Ovem* 310TA da YES;
4. Em seguida, aplicou-se 1,2 µm de resiste positivo AZP4110, utilizando a *Optical Photoresist, SUSS Gamma*;
5. A litografia foi realizada com uma máscara desenhada em extensão dxf no formato do dispositivo MAET, utilizando a Heidelberg DWL 2000, no modo escuro (*dark mode*), com foco 10 e modo de potência 100% (120 mW para comprimento de onda 405 nm);
6. O processo de revelação foi feito com um tempo de 225 segundos na *Optical Photoresist SUSS Gamma*, usando o revelador AZ400K seguido de água deionizada;
7. Um ataque com íon reativo profundo foi realizado na camada de Si condutor até uma profundidade de 5 µm usando a SPTS Pegasus;
8. O resiste foi removido usando plasma PVA TEPLA Asher;
9. O substrato foi cortado em pastilhas de 3,5 mm x 3,0 mm, na Automatic Dicing Saw DAD, com velocidade de corte de 4 mm / e profundidade de 425 µm. Antes do corte, a superfície condutora era protegida usando a resistência AZ9260;
10. Após o corte, foi realizado um processo de limpeza com acetona por 30 minutos, isopropanol por 5 minutos, DI H<sub>2</sub>O por 5 minutos, nitrogênio gasoso e PVA TEPLA plasma Asher;
11. Por último, a *SPTS Primax-HF VapourEtcher* foi usada para remover a camada sacrificial SiO<sub>2</sub> usando 12 ciclos de vapor de HF, sendo o tempo total do procedimento de 12 ciclos igual a 60 minutos;
12. Após ataque com vapor de HF, o substrato foi aquecido a 300 ° C durante 5 minutos para eliminar resíduos de óxido.

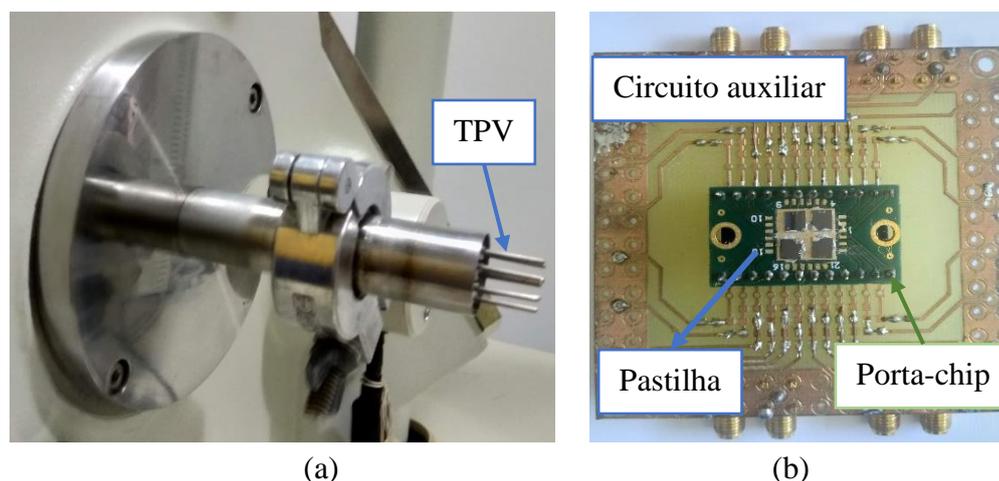
Na Figura 5.15 é possível encontrar micrografias óticas e micrografias de MEV mostrando etapas do processo de fabricação. Após a exposição do resiste, o processo de revelação foi realizado de forma gradual até que fosse possível alcançar uma distância de 1 µm entre as placas do capacitor, como mostra a Figura 5.15(a). Em cada pedaço de 4 cm x 4 cm de substrato SOI, foi possível fabricar 79 dispositivos. Os furos circulares na plataforma central servem para facilitar a remoção da camada sacrificial de óxido de silício.



**Figura 5.15** – Micrografia ótica do processo de fabricação após: (a) revelação de 120s; (b) DRIE de 5µm de silício condutor; (c) corte parcial de cada dispositivo (dicing); (d) ataque com vapor de HF; (e) remoção do dispositivo com fita adesiva para teste de adesão. (f) micrografia de SEM após HF.

### 5.3. SUPORTE PARA MEDIDA NO MEV

Os testes de deslocamento em vácuo e a medida de força do dispositivo foram feitas e desenvolvidas no CBPF usando uma instrumentação para MEV. A Figura 5.16 mostra as ferramentas utilizadas para aplicação de sinal elétrico no dispositivo MAET dentro do MEV.

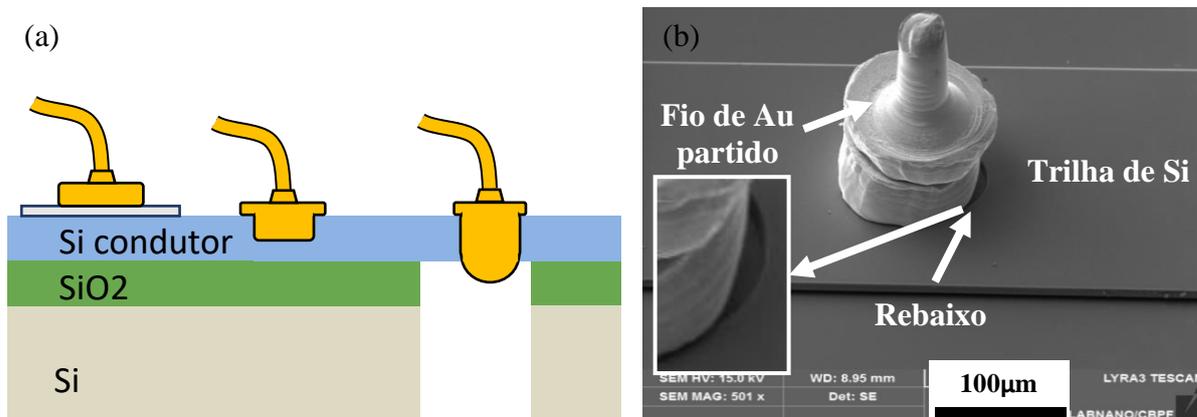


**Figura 5.16** – (a) Terminal de Passagem para Vácuo instalado em um MEV JEOL comercial. (b) Circuito de suporte, porta-chip e 4 pastilhas com os MEMS.

Construiu-se uma peça em aço para vedação de baixo vácuo, soldada a um flange KF e presa a um Terminal de Passagem para Vácuo - TPV (*Feed Through*), como mostrado na Figura 5.16 (a). Devido às pequenas dimensões dos terminais do dispositivo é necessário prender as pastilhas de silício em um porta-chip (*chip carrier*) usando cola prata. Este, por sua vez, encaixa-se em um circuito auxiliar, Figura 5.16 (b). No porta-chip foi possível prender 4 pastilhas com um MEMS em cada uma delas. O circuito auxiliar foi construído para encaixar o porta-chip de 24 pinos, transferindo o sinal para conectores SMA com rosca. As conexões entre os terminais do dispositivo e o porta-chip foram feitas por meio de um fio de Au com o auxílio do equipamento *Wire bonder* modelo 626 da Hybond, usando uma ponta capilar.

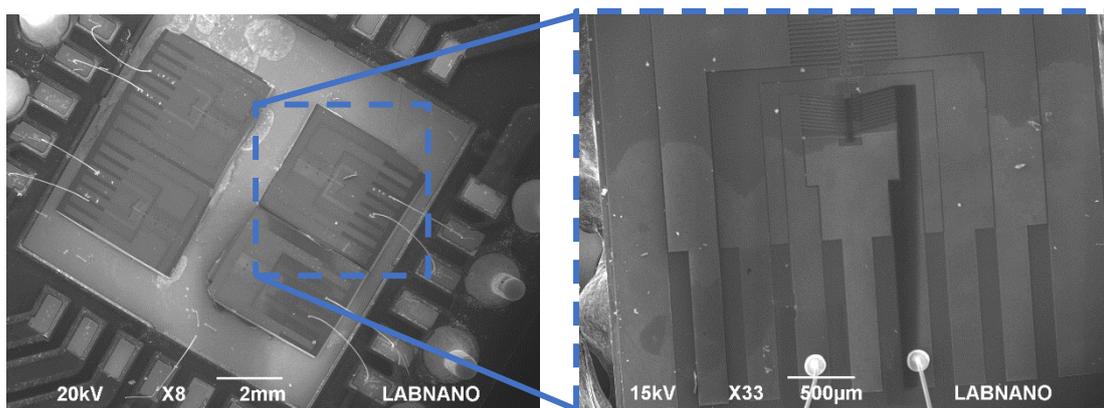
Devido à baixa adesão do ouro em silício, utilizou-se uma técnica proposta por Heirshberg [142,143], que consiste em prender a ponta do fio de Au no Si por meio de deformação plástica em um rebaixo ou em um furo passante. Na Figura 5.17 é possível encontrar um esquemático do processo utilizado para prender o fio de Au em Si e uma micrografia de MEV da ponta do fio de Au presa à trilha do dispositivo de Si condutor. Um rebaixo em formato circular de 30  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 5  $\mu\text{m}$  de profundidade foi feito usando

um canhão de íons de gálio (FIB) de um Microscópio de Dupla Coluna Elétrons-Gálio TESCAN LYRA3.

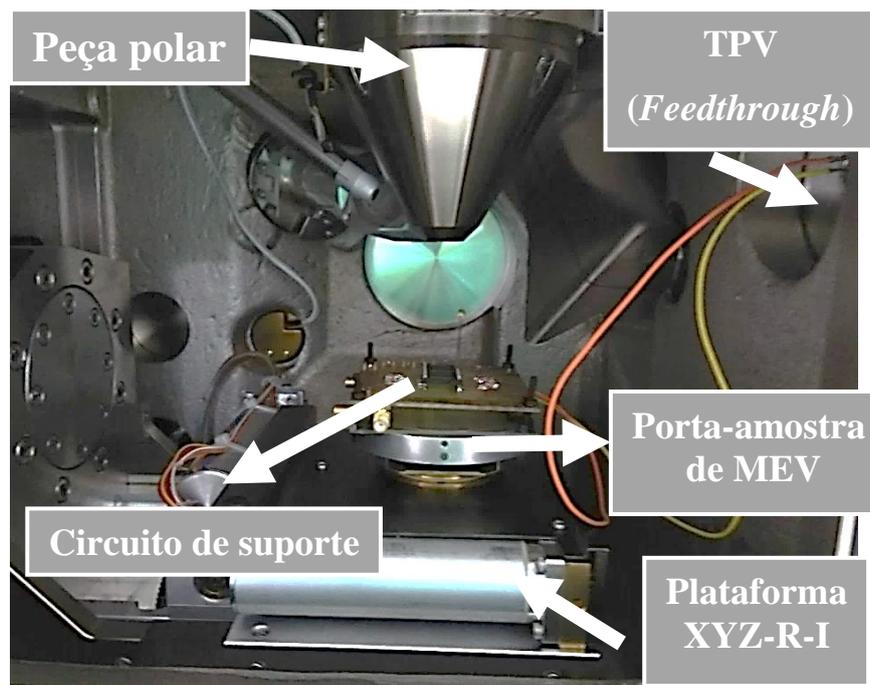


**Figura 5.17** – (a) Esboço de três ligações com fio com rebaixo (adaptado de [142]). (b) Micrografia de FIB de ouro presa em rebaixo. Na seqüência: em terminal de prata, em rebaixo e em furo passante.

O conjunto obtido foi preso em um porta-amostra de MEV usando fita de carbono e introduzido na câmara de vácuo do MEV. As Figura 5.18 e Figura 5.19 mostram o arranjo experimental para obtenção do da medidas dentro do MEV. O MEV utilizado foi um Microscópio Eletrônico de Varredura analítico de baixo vácuo JEOL JSM-6490LV que possui um detector de elétrons secundários e uma plataforma que possibilita a movimentação da amostra nas três direções, XYZ, com rotação R em 360° e um inclinação I. No canto superior direito da Figura 5.19 é possível encontrar o TPV responsável por fazer a conexão elétrica para dentro da câmara de MEV.



**Figura 5.18** – Micrografia de pastilhas com MEMS, coladas com cola prata e conexão feita com fio de Au.



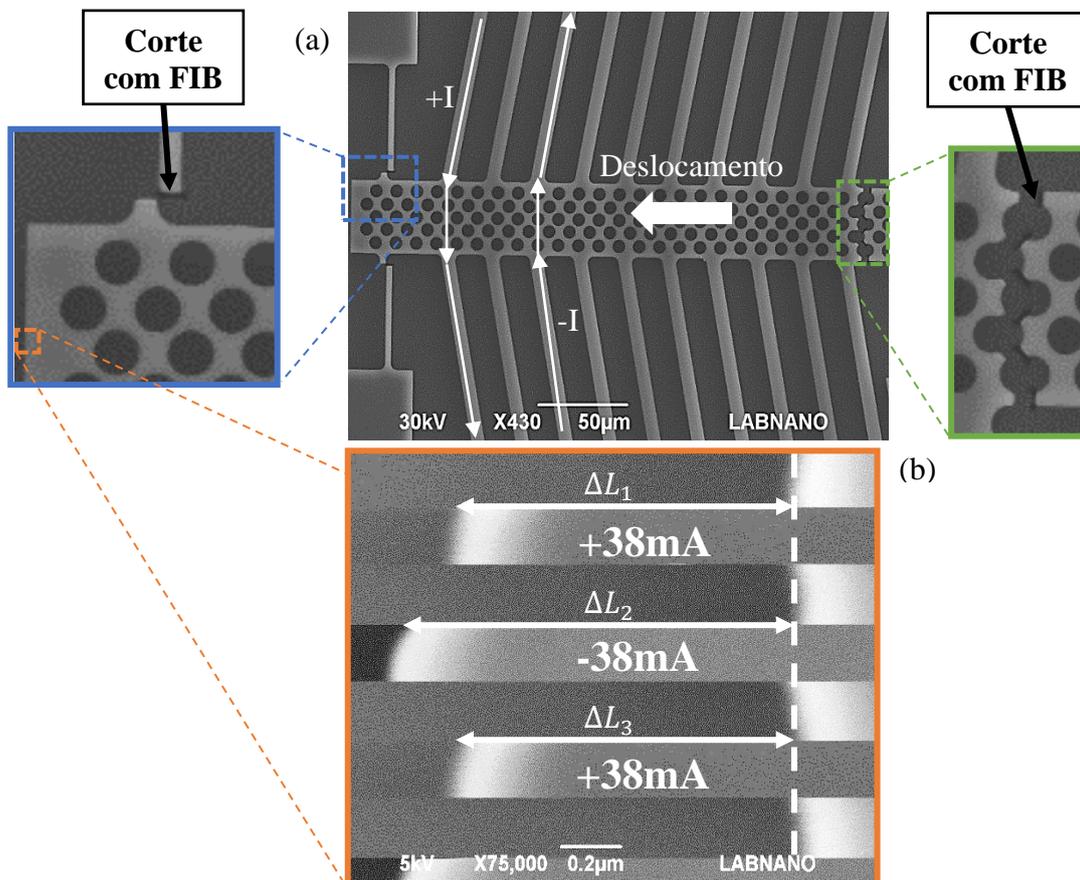
**Figura 5.19** – Foto da parte interna da câmara de vácuo de um MEV.

#### 5.4. OBTENÇÃO DE MEDIDA DE DESLOCAMENTO NO MEV

Para separar as vigas inclinadas das vigas dissipadoras de calor, já que o modelo proposto no Capítulo 4 não leva em conta o escoamento de calor devido à complexidade dos cálculos, o FIB foi usado para cortar e separar o dispositivo MAET do resto da microestrutura. A Figura 5.20 mostra uma micrografia de MEV e salienta região onde os cortes das vigas dissipadoras de calor com FIB foram realizados, isolando a estrutura.

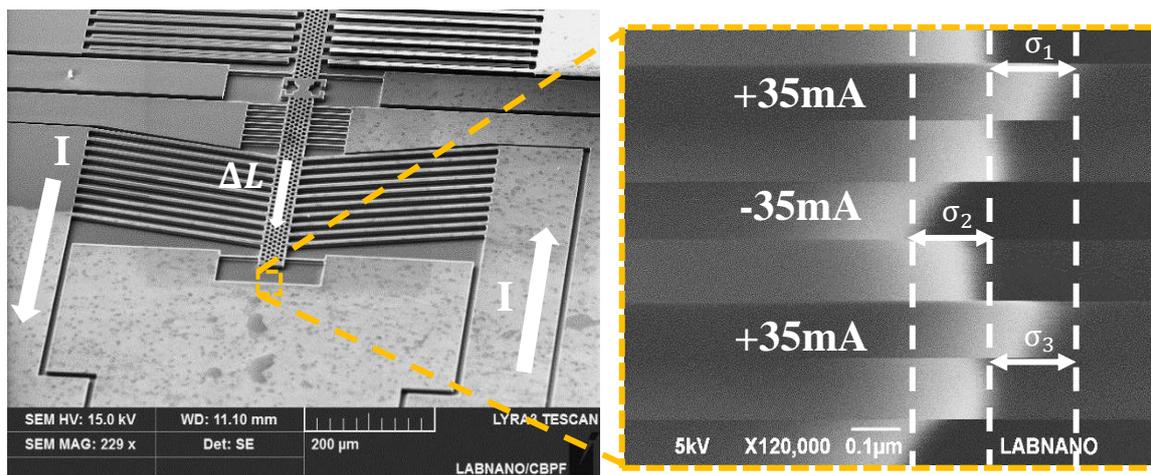
Utilizou-se uma fonte de corrente Keithley 2400 SourceMeter® conectado ao TPV, controlada por computador usando um adaptador GPIB-USB-HS da *National Instruments*. O controle foi feito por programação em Python para conseguir reprodutibilidade durante as medidas. A fonte de corrente foi escolhida no lugar de uma fonte tensão, pois a corrente elétrica gera dissipação de energia reprodutível sobre os elementos de aquecimento. Ainda assim, as tensões correspondentes para calcular a resistência e a resistividade do dispositivo foram medidas para cada corrente aplicada. O procedimento para a aplicação de corrente seguiu os seguintes passos [98]: Uma corrente positiva (+ I) é aplicada entre os terminais por 2 segundos enquanto a tensão elétrica é medida, a corrente é desligada por 2 segundos para o esfriamento do dispositivo; na sequência, a polaridade da corrente elétrica é invertida (-I) por 2 segundos enquanto a tensão é medida; todo o processo foi repetido duas vezes. As imagens de MEV foram capturadas durante os procedimentos de aplicação de corrente

elétrica descritos acima. A região escolhida para se medir o deslocamento ( $\Delta L$ ) foi a borda da plataforma central, Figura 5.20(a). Repetiu-se o processo de 2 mA até 50 mA, com um passo de 2 mA. Este procedimento permite medir os deslocamentos com boa resolução no MEV [72,77].



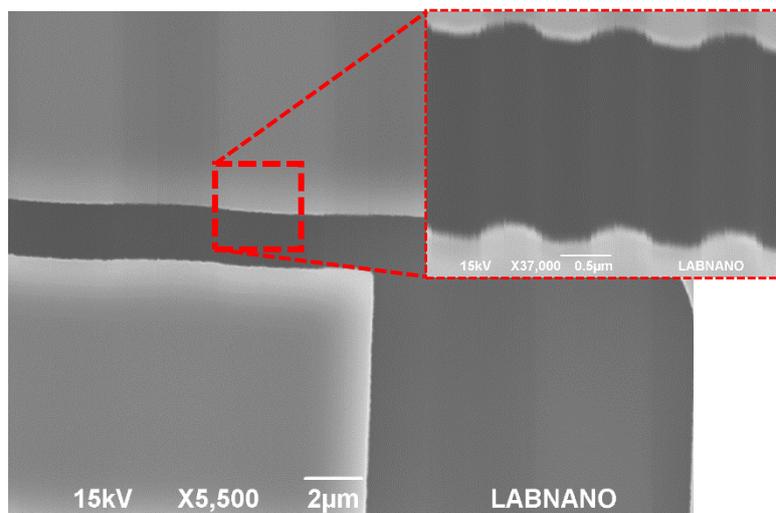
**Figura 5.20** – Imagens de deslocamento no MEV do dispositivo MAET. (a) dispositivo com 10 pares de vigas inclinadas, mostrando sentidos da passagem de corrente (38mA). Também é mostrado as regiões de cortes FIB, bem como a região para as medições de deslocamento MAET; (b) deslocamento da borda da plataforma central do MAET.

Foi observado que a corrente que passa pelas vigas inclinadas de Si gera um campo magnético que interage com o feixe de elétrons do MEV. Devido a inversão do sentido da corrente elétrica, mostrado na Figura 5.21, foi possível observar desvios positivos e negativos em uma região fixa perto das vigas inclinadas, de forma que a mudança de direção acompanhava o sentido da corrente elétrica. Uma série de medições foram realizadas para adicionar os erros da interação eletromagnética nas medidas de deslocamento. As medidas de deslocamentos e a medida do erro de interação eletromagnética foram calculadas usando o *software ImageJ* usando a relação comprimento-pixel da escala da imagem.



**Figura 5.21** – Micrografia de MEV mostrando desvios da interação magnética. Medidas na região fixa próxima ao atuador térmico, conforme indicado.

Um fenômeno interessante a se comentar é a influência de interferência eletromagnética externa. A Figura 5.22 mostra um exemplo de interferência eletromagnética externa durante a formação das micrografias de MEV. Observou-se que o efeito foi bastante amenizado quando a Distância de Trabalho (do inglês: *work distance* -  $WD^h$ ) foi reduzida para 6 mm.



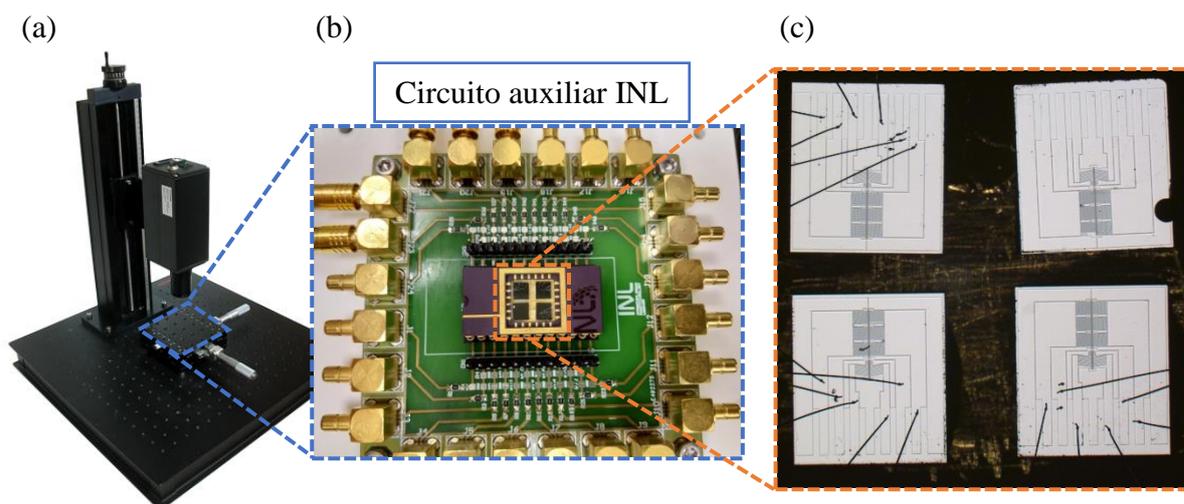
**Figura 5.22** - Interferência eletromagnética externa durante aquisição no MEV. A distância de trabalho usada para esta micrografia foi de 12mm e a voltagem de aceleração do feixe de elétrons foi de 15KV.

<sup>h</sup> distância entre a peça polar e amostra

## 5.5. OBTENÇÃO DE MEDIDA DE TEMPERATURA COM CÂMERA TÉRMICA

### TÉRMICA

Para se obter a distribuição de temperatura e o valor máximo de temperatura experimental do dispositivo, um arranjo com uma câmera térmica de infravermelho Infrasight IS640 da Optotherm foi utilizada, Figura 5.23 (a).



**Figura 5.23** - Sistema de medida de temperatura. (a) Configuração com câmera térmica da Optotherm IS640 sem lente (obtido de [www.optotherm.com](http://www.optotherm.com)), (b) circuito auxiliar INL, (c) micrografia ótica de pastilhas de silício com fios de alumínio.

A câmera foi equipada com uma lente macroscópica de resolução óptica de  $140\mu\text{m}$ , distância focal  $12\text{mm}$ , resolução térmica de  $\pm 2^\circ\text{C}$  e faixa de operação de  $10^\circ\text{C}$  a  $300^\circ\text{C}$ . Um circuito auxiliar, Figura 5.23(b), foi utilizado para realizar as conexões elétricas do dispositivo. Para obtenção do valor de temperatura, a emissividade de  $\epsilon = 0,6$  foi utilizada nas configurações do programa da câmera térmica. A câmera térmica fica localizada nas instalações do laboratório de micro e nanofabricação do INL. O circuito auxiliar utilizado no INL é um circuito impresso, com socket e pinos arredondados, IC DIP de 24 pinos e com 24 conexões SMA.

Após a fabricação descrita na seção 5.2, quatro pastilhas contendo os dispositivos foram coladas, com cola prata, em um porta-chip cerâmico da Kyocera C-DIP de 24 pino. As ligações, entre as pastilhas e os terminais do porta-chip, foram feitas utilizando um *wire bonder* equipado com uma ponta em cunha com fio de Al. O circuito auxiliar foi posicionado

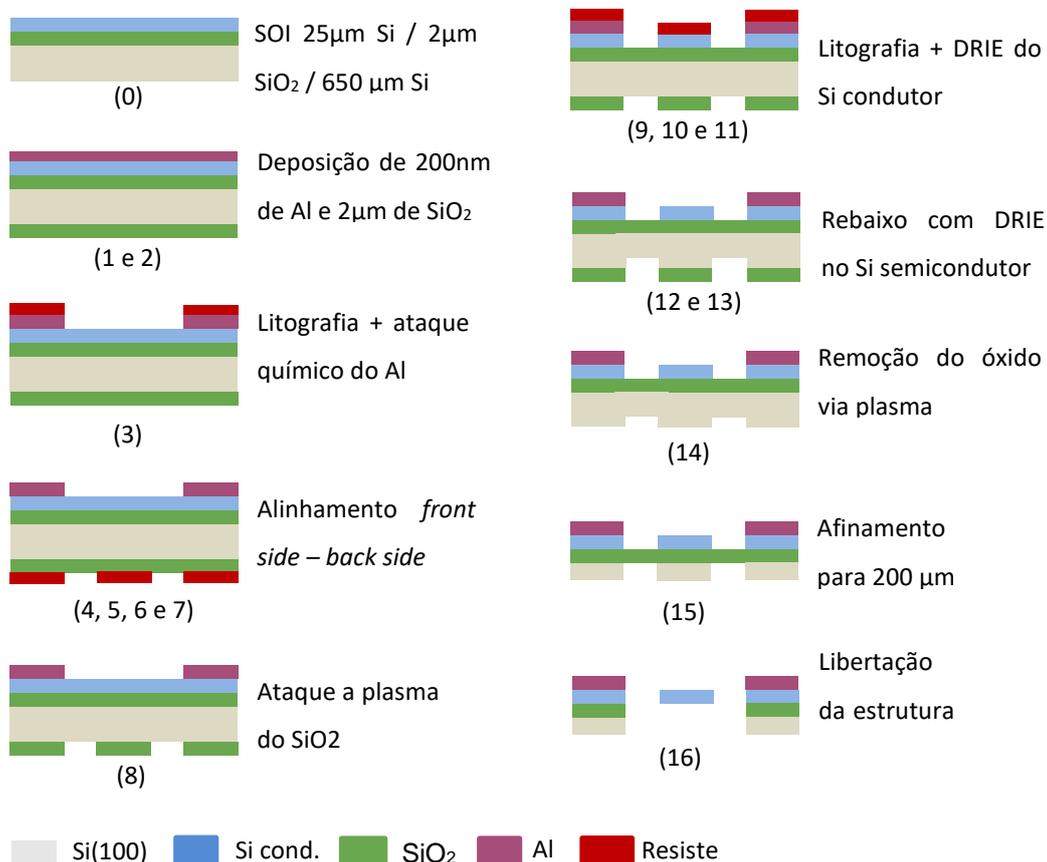
usando uma plataforma XY posicionada embaixo da câmera térmica e a imagens de distribuição de temperatura e os valores de temperatura máxima foram registrados.

## 5.6. FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO PARA MET

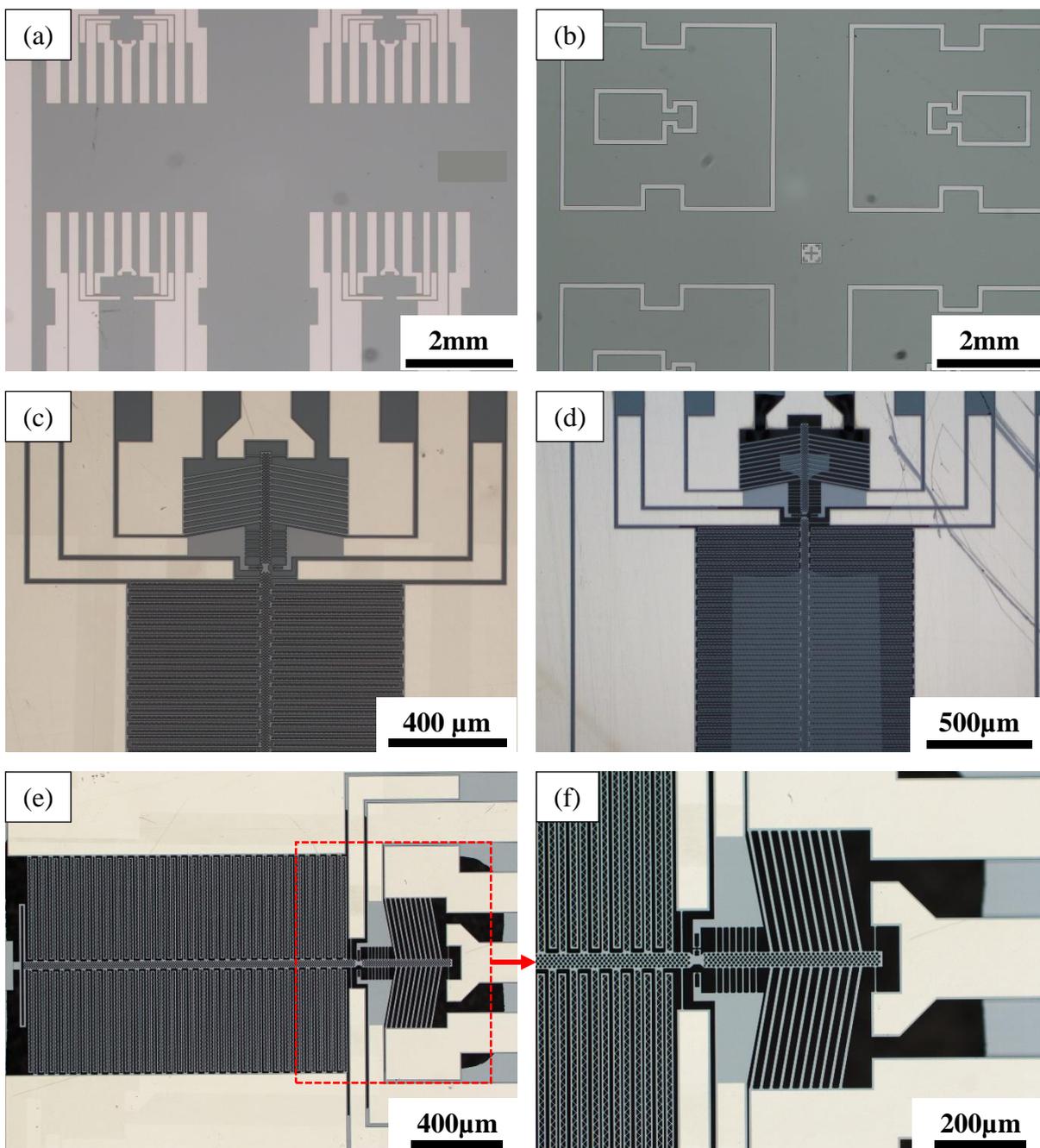
A fabricação do dispositivo com um furo passante para feixe de elétrons dentro do MET, também fabricado no INL, é um processo com mais etapas e mais complexa do que o mostrado anteriormente. A Figura 5.24 mostra um esquemático para fabricação do dispositivo. Para cada processo de litografia, devido à sua natureza repetitiva, serão omitidos os seguintes passos: a) deposição de vapor de HMDS em um forno a 150°C; b) deposição de resiste referente ao processo usando a Karl Suss Optical Track; c) litografia usando, ora a Heidelberg DWL 2000; d) e finalizando o processo de litografia com a revelação na Karl Suss Optical Track. As micrografias óticas, dos processos de fabricação, são mostradas na Figura 5.25. Iniciou-se o processo com um pedaço de SOI com 25  $\mu\text{m}$  de Si monocristalino condutor e:

1. Depósito de 200 nm de alumínio na parte superior usando *sputtering*;
2. Depósito de 2  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  por PECVD na parte traseira de um substrato SOI de 4cmx4cm usando uma SPTS CVD, a uma temperatura de 300°C;
3. Litografia usando a geometria dos terminais para proteção da superfície do silício condutor com 2,2  $\mu\text{m}$  de AZP4110 e revelação usando o AZ400K por 120 segundos;
4. Ataque químico para remoção do alumínio;
5. Remoção do resiste usando *plasma asher*, Figura 5.25 (a);
6. Litografia com alinhamento para parte traseira e a parte da frente do substrato SOI usando a Karl Suss MA6BA6. Resiste: 2,2  $\mu\text{m}$  de AZP4110 na parte de trás. Revelador: 120 s usando o AZ400K;
7. Litografia da máscara das janelas nas costas do pedaço de SOI com 2,2  $\mu\text{m}$  do resiste AZP4110, usando a DWL para exposição e com revelação de 240 s usando o AZ400K;
8. Ataque à plasma de 2  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  usando a SPTS APS RIE  $\text{SiO}_2$  Etch;
9. Remoção do resiste usando o Tepla Plasma Asher, Figura 5.25 (b),
10. Litografia na frente do substrato para geometria do dispositivo de ensaio de tração;
11. DRIE dos 25  $\mu\text{m}$  do silício condutor usando a SPTS Pegasus Si DRIE;
12. Plasma Asher para remoção do resiste, Figura 5.25 (c);
13. DRIE de 350  $\mu\text{m}$  do silício semicondutor usando a SPTS Pegasus Si DRIE;
14. Ataque à plasma para remoção de 2  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  usando a SPTS APS RIE  $\text{SiO}_2$  Etch;

15. DRIE de 400  $\mu\text{m}$  do silício semiconductor usando a SPTS Pegasus Si DRIE para afinar a camada manipuladora de silício, Figura 5.25 (d);
16. Remoção da camada de sacrifício ( $\text{SiO}_2$ ) com ataque de vapor de HF usando a SPTS Primax-HF VapourEtcher, Figura 5.25 (e) e (f).



**Figura 5.24** – Esquema para fabricação de dispositivo para ensaio de tração *in situ* com furo passante.

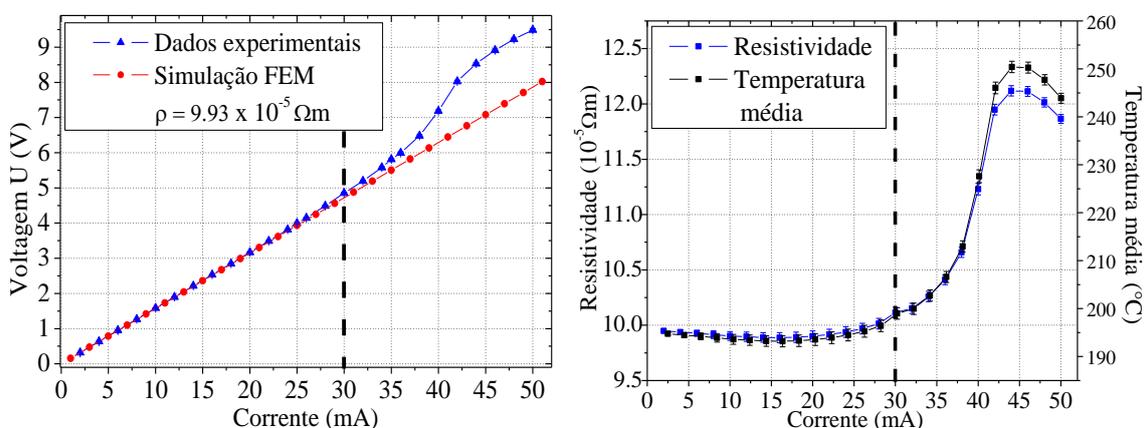


**Figura 5.25** - Micrografia ótica de processo de fabricação do dispositivo com furo passante. Processo de fabricação após: (a) ataque químico do alumínio e limpeza no plasma asher; (b) ataque a plasma e limpeza sem plasma asher na parte traseira; (c) DRIE do silício condutor ; (d) redução de espessura do silício condutor; (e) Libertação da camada de sacrifício do SiO<sub>2</sub> por vapor de HF; (f) Ampliação do dispositivo fabricado.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

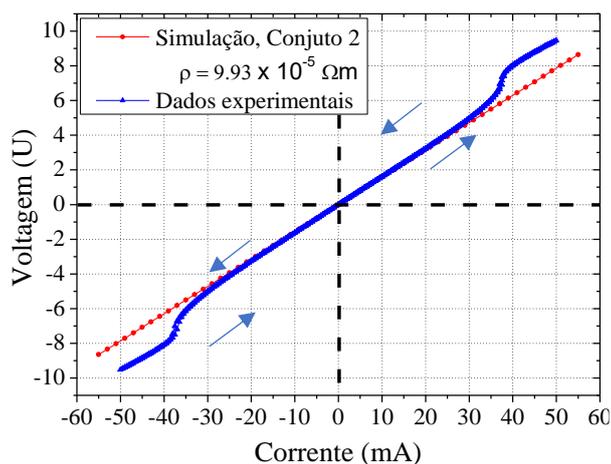
### 6.1. ESTUDO DO DISPOSITIVO MAET EM VÁCUO

Os resultados das medidas elétricas do dispositivo sem as vigas dissipadoras de calor e desacoplado da célula de carga são mostrados na Figura 6.1 (a) e Figura 6.2, onde um comportamento linear foi observado até 30mA nos valores experimentais. Os resultados mostrados na Figura 6.1 (a) foram obtidos conforme descrito na seção 5.4. A resistência média foi calculada a partir dos dados experimentais e são mostradas no gráfico da Figura 6.1(a), enquanto a resistividade foi obtida utilizando-se as dimensões mostradas na Figura 5.20 (página 80) e Tabela 5.1 (página 66). Os valores obtidos para a resistividade elétrica foram utilizados para construir o gráfico da Figura 6.1(b). As medidas elétricas da Figura 6.2 foram obtidas com uma elevação gradual da corrente elétrica enquanto se media a tensão elétrica. Ao se chegar ao valor de 50 mA, diminuía-se gradativamente a corrente até chegar em -50 mA. Voltou-se a subir o valor da corrente até 50 mA e finalizava-se, então, a medida. Os três gráficos, mostrados nas Figura 6.1 e Figura 6.2, indicam um comportamento aproximadamente linear entre  $\pm 30$  mA, sugerindo uma resistividade independente da temperatura nessa faixa, com um valor médio de  $(9,93 \pm 0,02) \times 10^{-5} \Omega m$  até 30 mA. Essa resistividade elétrica, já mostrada na Tabela 2.2, foi utilizada para construir uma curva de simulação (bolinhas vermelhas) mostrado na Figura 6.1(a), onde é possível observar uma compatibilidade entre o valor experimental e o valor simulado até 30 mA.



**Figura 6.1** - (a) Tensão  $U$  (V) versus corrente  $I$  (mA) para o dispositivo MAET. Para esta avaliação do gráfico, as correntes  $+I$  e  $-I$  foram variadas enquanto as tensões foram medidas. (b) Resistividade do MAET e comportamento da temperatura média em relação à corrente aplicada (mA) avaliada a partir das medições experimentais.

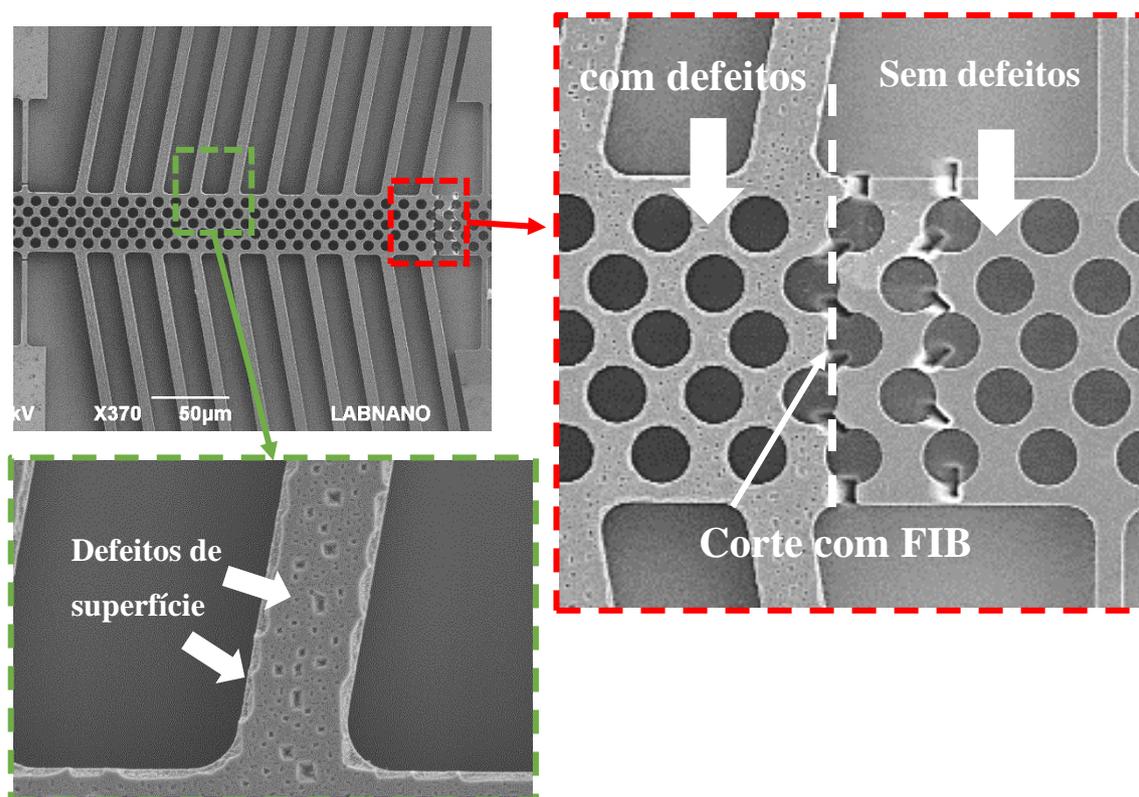
Para valores acima de 35mA, a resistividade aumenta drasticamente, atingindo um valor máximo de  $12,1 \times 10^{-5} \Omega m$  antes de começar a diminuir. O dispositivo utilizado nesse trabalho é composto por camada silício altamente dopado com arsênio (substrato tipo n). A densidade estimada de doadores é  $N_D=10^{19}cm^{-3}$  para uma resistividade medida em torno de 0,01 Ohm-cm. A resistividade elétrica ou a condutividade elétrica dependem da mobilidade do elétron semiconductor. O espalhamento elétron-dopante está relacionada à interação das forças de Coulomb e sua probabilidade de espalhamento, de forma que respeita uma dependência com a temperatura na forma  $\sim T^{3/2}$ . No entanto, o espalhamento dos elétrons-dopante torna-se menos significativa em temperaturas mais elevadas e a dispersão do elétron livre na rede cristalina torna-se dominante. Consequentemente, a vibração da rede aumenta à medida que a temperatura aumenta, e a mobilidade dos elétrons diminui proporcionalmente a  $\sim T^{-3/2}$  [133].



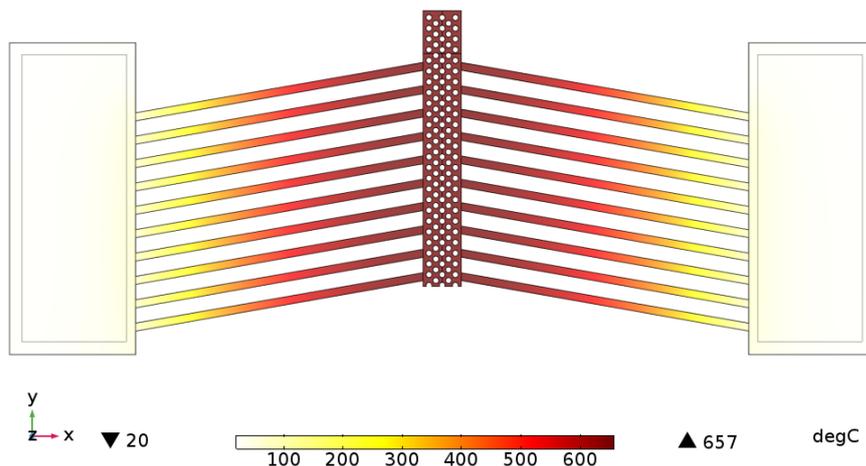
**Figura 6.2** – Dados experimentais de medida histerese elétrica com variação contínua e gradual.

Também, Zhu e colaboradores propõem [39] que algumas informações importantes sobre o atuador térmico podem ser encontradas a partir da temperatura estimada do dispositivo. Para tal, utiliza-se o valor da resistividade em função da temperatura, mostrada no conjunto 1 da Tabela 2.2 (página 5), para encontrar a temperatura média do dispositivo. Este procedimento foi realizado para os valores calculados de resistência e são mostrados no segundo eixo y na Figura 6.1(b) (quadrados preto). Devido ao comportamento quase linear da resistividade, a temperatura média não corresponde aos valores experimentais nem aos simulados, ao contrário do que foi mostrado por Zhu em seu trabalho.

A Figura 6.3 mostra o dispositivo MAET após a aplicação de uma corrente elétrica de 50 mA, onde é possível observar uma mudança da superfície do dispositivo devido à alta temperatura. Isso se confirma quando se compara com uma região não degradada (próxima) que foi isolada mecânica e eletricamente do restante do dispositivo. A Figura 6.4 mostra a simulação MEF do dispositivo para as mesmas condições. A simulação indica que, para a mesma condição experimental, a temperatura da plataforma central seria de aproximadamente 650 °C, bem longe do ponto de fusão do silício (1400 °C). Uma das possíveis explicações para este fenômeno de fusão precoce das vigas do dispositivo pode ser explicado pelos trabalhos de Stockmeier e colaboradores [134,144,145]. Segundo os pesquisadores, em altas temperaturas, a tensão gerada pela alta dopagem no silício atinge a ordem da tensão crítica de cisalhamento. O aumento desta tensão cisalhante pode ser suficientemente alto para permitir o incremento de discordâncias e defeitos na superfície, levando a um aumento de temperatura local e a fusão das vigas do dispositivo.

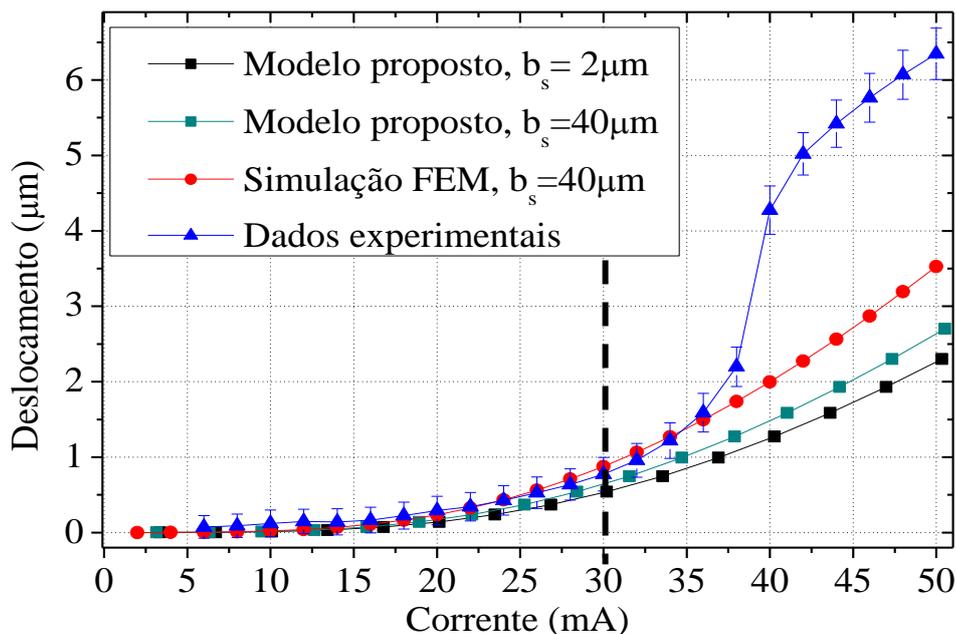


**Figura 6.3** – Micrografia de defeitos na superfície do dispositivo após 50mA de corrente aplicada.



**Figura 6.4** – Resultado gráfico de simulação MEF de temperatura para dispositivo. Passagem de corrente de 50mA.

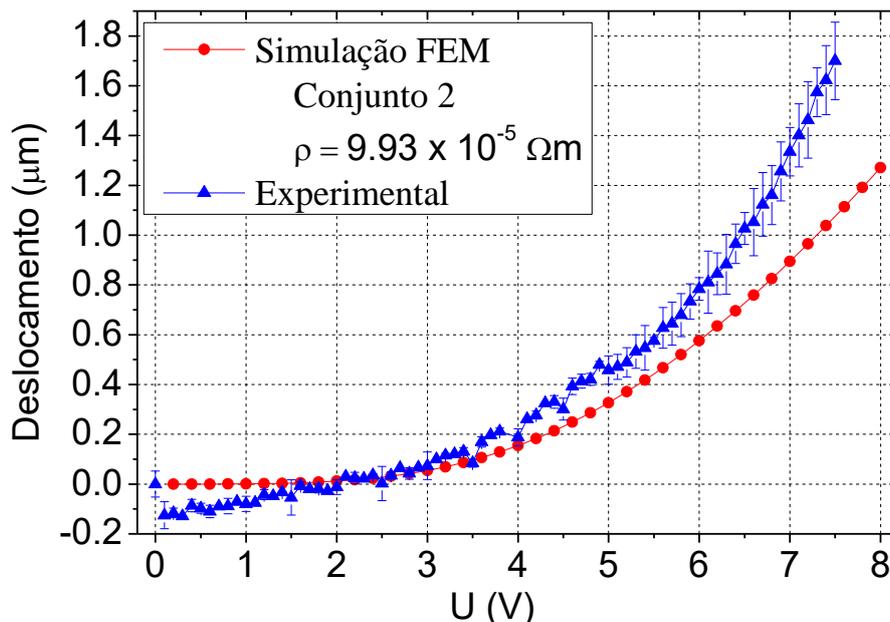
Na Figura 6.5 é mostrado o deslocamento por corrente elétrica para o resultado experimental, a simulação de MEF e o modelo proposto para um dispositivo com largura da plataforma central de  $b_s = 2 \mu\text{m}$  e  $b_s = 40 \mu\text{m}$ . O modelo proposto produziu um comportamento similar do deslocamento para plataforma central com  $2 \mu\text{m}$  e  $40 \mu\text{m}$  para aplicação de correntes até 30 mA. Para este valor de corrente, o deslocamento da plataforma central correspondente foi de  $(0,8 \pm 0,2) \mu\text{m}$ . Os erros experimentais de deslocamento foram obtidos por meio de uma média das diversas medidas de deslocamento somado à interação eletromagnética, conforme descrito na seção 5.4. O deslocamento experimental máximo do dispositivo atingiu  $6,3 \mu\text{m}$  para 50 mA. Todos os cálculos foram realizados usando os parâmetros Conjunto 2 da Tabela 2.2. Como visto na Figura 6.5, a simulação MEF e o modelo proposto reproduzem bem as curvas experimentais até 30 mA. Para correntes mais altas, a curva experimental mostra um aumento rápido de deslocamento, que pode ser atribuído à aproximação da temperatura de fusão, como discutido acima.



**Figura 6.5** – Gráfico de deslocamento versus corrente para dados experimentais, simulação MEF e Modelo proposto. Os parâmetros conjunto 1 da Tabela 2.2, usando a resistividade e  $\rho = 9,93 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$  são usados para nossa abordagem e simulação MEF. Linhas no gráfico para guiar os pontos de dados.

## 6.2. ESTUDO DO DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

Para medir o a força gerada pelo dispositivo com a célula de carga, realizou-se teste *in situ* no MEV da mesma forma que foi descrito nos capítulos anteriores. A Figura 6.6 mostra o deslocamento experimental versus a voltagem para o dispositivo acoplado à célula de carga e com vigas dissipadoras de calor, assim como a simulação do deslocamento do dispositivo com a mesma configuração. Para a simulação MEF foram utilizados os parâmetros físicos mostrados no conjunto 2 da Tabela 2.2, no entanto usou-se a resistividade medida experimentalmente para se obter um resultado simulado mais próximo do experimental. Diferente do que foi encontrado nas simulações anteriores, as simulações MEF de deslocamento não parecem estar em concordância com os resultados experimentais. Acredita-se que essa diferença pode ter vindo de escolhas experimentais, como usar fonte de tensão em vez de fonte de corrente. Também, a técnica de medida de deslocamento pode ser um dos fatores da diferença já que se utilizou a distância entre as placas dos extensômetros capacitivos para se realizar as medidas, diferente de como foi feito na seção anterior.



**Figura 6.6** – Gráfico de deslocamento vs. voltagem elétrica de dados experimentais e simulação.

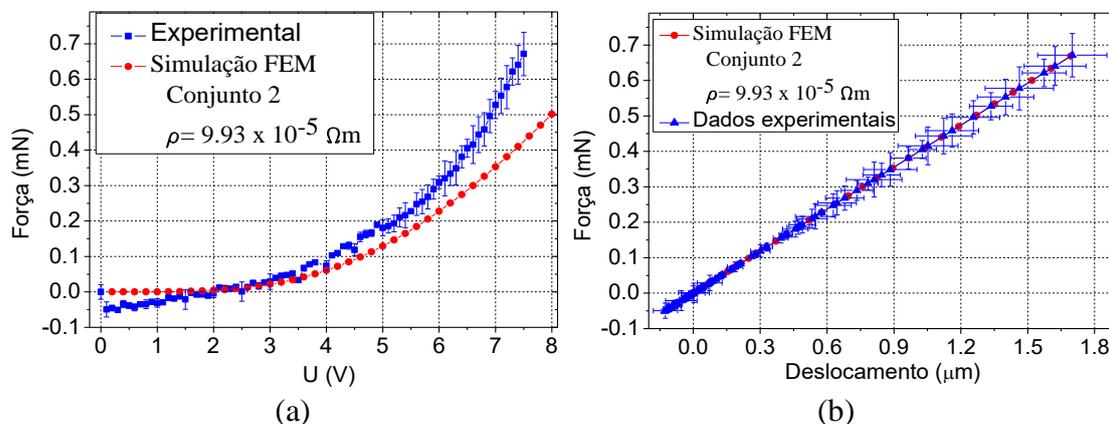
A Figura 6.7(a) mostra, para resultados experimentais e simulados, a força medida pela célula de carga versus a voltagem. As simulações foram feitas com base no conjunto 2 da Tabela 2.2. Para o cálculo da força utilizou-se a lei de Hooke, de forma que o erro foi obtido a partir da equação de propagação de erros [146], mostrado na equação (5.1),

$$\sigma_F = K_{cc}\sigma_{\Delta L} \quad (5.1),$$

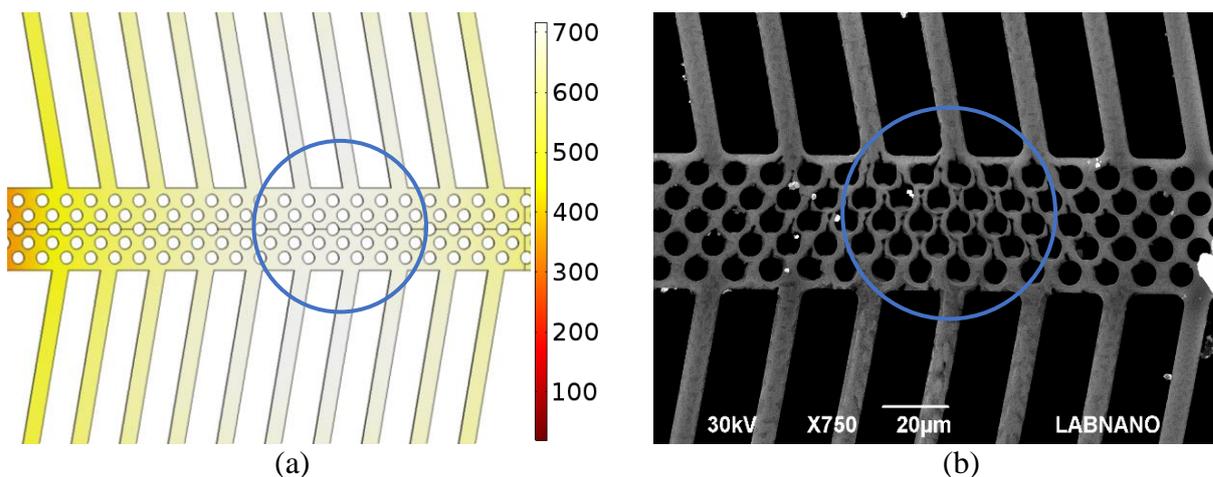
onde  $\sigma_F$  é o erro da força calculada,  $K_{cc}$  é a rigidez da célula de carga e  $\sigma_{\Delta L}$  é o erro da medida experimental de deslocamento. O erro da força pode ser interpretado como a resolução do sensor de carga [106], sendo o valor médio calculado igual à  $\sigma_F = 0,06 \text{ mN}$ . O cálculo da rigidez foi mostrada na seção 3.6. A Figura 6.7(b) mostra força por deslocamento para dados experimentais e simulados, onde a resolução da célula de carga ficou em torno de 0,02mN.

Não foi possível medir a distribuição de temperatura e a temperatura máxima dentro do MEV. No entanto, o dispositivo foi aquecido até o ponto de fusão, como mostrado na Figura 6.8 (b). Em comparação, Figura 6.8 (a), mostra a simulação de distribuição de temperatura na região do MAET. Observou-se que a temperatura máxima está na plataforma central, na altura da 5ª da viga inclinada, como mostra a simulação e a micrografia por MEV.

Ainda, da mesma forma do que mostrado na seção anterior, há uma diferença entre para o ponto de fusão encontrado por simulação MEF e o ponto de fusão do silício *bulk*.



**Figura 6.7** – Gráficos de simulação MEF e dados experimentais: (a) Força vs. Voltagem, (b) Força vs. Deslocamento.

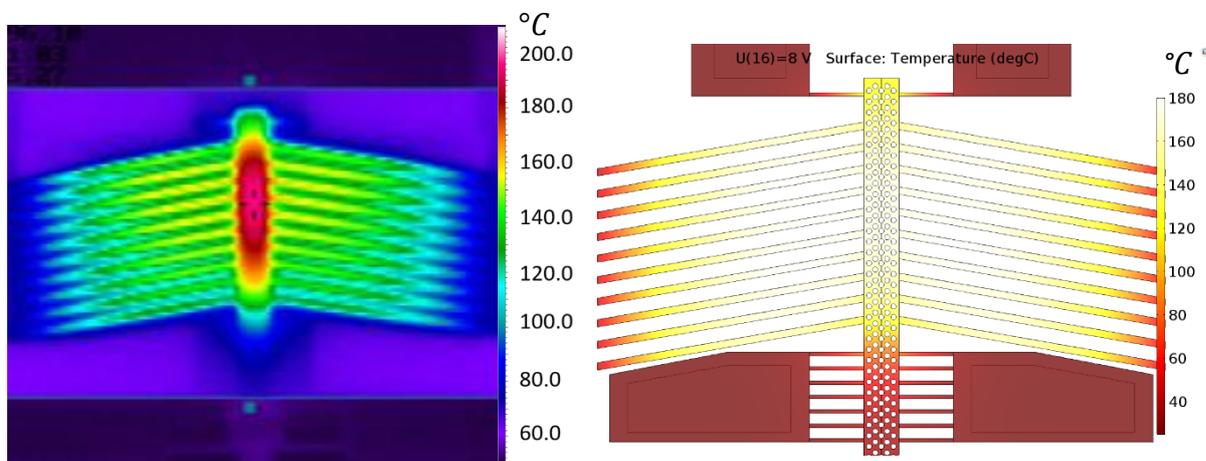


**Figura 6.8** – Simulação MEF de distribuição de temperatura para  $U = 9,5V$ . (b) imagem de MEV de momentos antes da fusão do dispositivo,  $U=9,6V$ .

### 6.3. ESTUDO DA TEMPERATURA EM AR

O dispositivo foi testado usando uma câmera térmica Optotherm Modelo IS640 para estudar o comportamento da temperatura em ar. A Figura 6.9 (a) mostra uma imagem da distribuição de temperatura para o dispositivo MAET para uma tensão aplicada de 8 V, onde é possível ver que a temperatura máxima está na plataforma central, na altura da 5ª da viga inclinada. Na Figura 6.9 (b), é mostrada uma simulação MEF de temperatura para as mesmas

condições das obtidas pela câmera térmica. Os dados experimentais da câmera térmica estão em concordância com os resultados de simulação MEF de distribuição de temperatura.

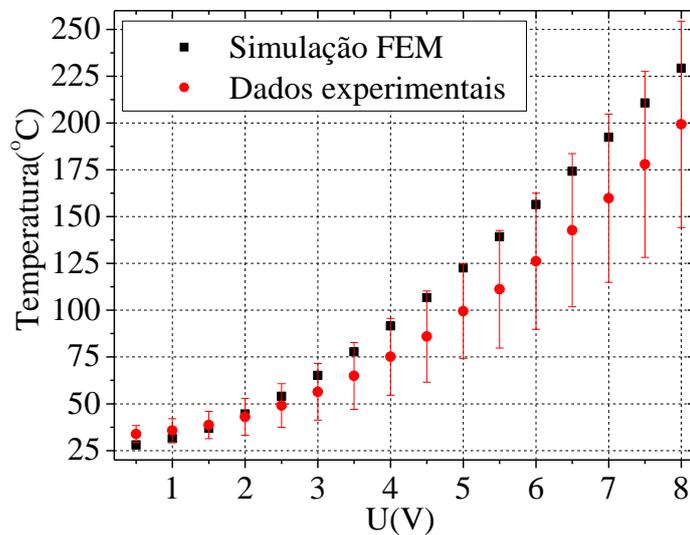


**Figura 6.9** – Distribuição de temperatura em °C no MAET para tensão  $U = 8$  V: (a) medida experimental (b) simulação MEF usando conjunto 2.

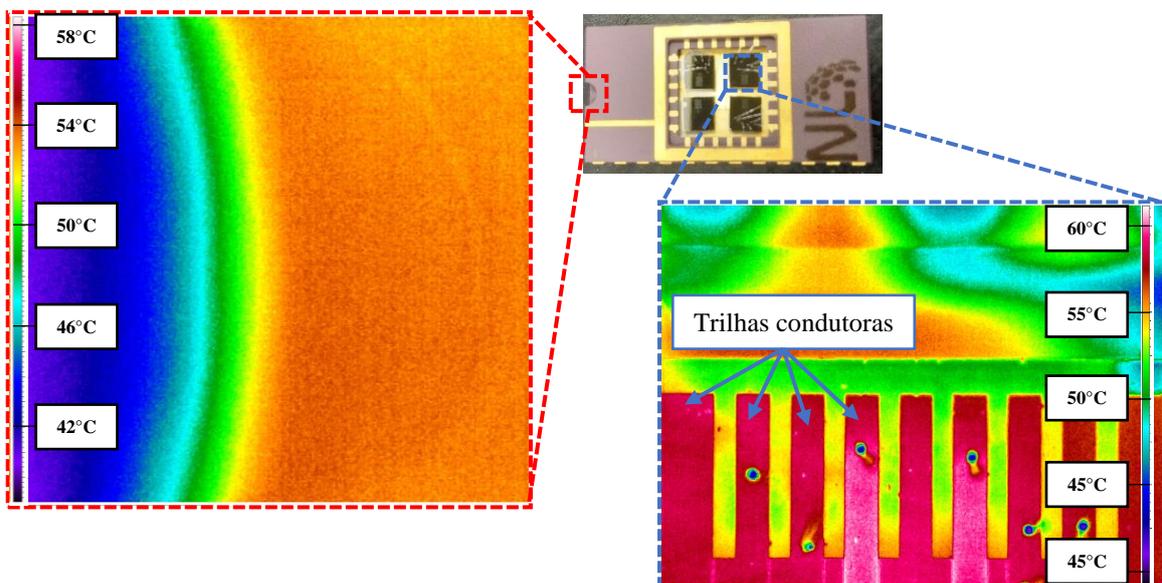
O gráfico da Figura 6.10 mostra uma comparação entre a temperatura média registrada pela câmera térmica e a temperatura máxima da simulação MEF para a plataforma central do dispositivo em ar. A simulação e o resultados experimentais possuem comportamento similares, apesar disso, a temperatura do dispositivo medida pela câmera térmica tem um erro aproximadamente de  $\pm 50$  °C para 8V.

As extremas variações de temperatura podem ser explicadas ao aquecimento do ar entre o substrato e o dispositivo. Este fenômeno pode levar a um superaquecimento do porta-chip cerâmico. A Figura 6.11 mostra algumas imagens de distribuição de temperatura feitas pela câmera térmica do porta-chip e das trilhas do dispositivo. Nesta, é possível encontrar valores de temperatura no porta-chip por volta de  $54^{\circ}\text{C}$ , que pode ser a origem da grande variação de temperatura registrada na Figura 6.10. Outra justificativa pode estar na limitação da câmera, sua faixa de temperatura varia de  $10^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ , onde o erro é de 2% da leitura para esta escala. Isso significa que a câmera pode medir a temperatura com mais precisão para valores de baixa temperatura. Experimento e simulação têm um valor de temperatura mais alto entre o quarto feixe inclinado, contando a partir da extremidade do dispositivo. Ainda é possível ver que a temperatura é drenada para os substratos pelas vigas dissipadoras de calor como indicavam as simulações. A temperatura máxima medida usando a câmera

térmica foi de cerca de  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a temperatura máxima na simulação para as mesmas condições foi de cerca de  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 6.10** – Gráfico de dados experimentais e simulação MEF para temperatura em função da tensão da DA.



**Figura 6.11** – Micrografia de câmera térmica mostrando distribuição de temperatura no porta-chip e nas pastilhas de silício para uma tensão  $U = 10\text{V}$ .

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi estudada uma nova abordagem para o microatuador eletrotérmico (MAET) com geometria em forma de “V”. Para tal, uma solução analítica para a equação transcendental foi proposta para se encontrar a distribuição de temperatura do dispositivo MAET. Ao final, encontrou-se uma solução que fornece a distribuição de temperatura em função da voltagem elétrica  $U$ . A distribuição de temperatura mostrou, também, ser dependente de propriedades físicas como condutividade térmica e a resistividade elétrica.

Uma instrumentação para aplicação de sinal elétrico dentro do MEV foi projetada, fabricada e aplicada. O equipamento permitiu o estudo de deslocamento do dispositivo MAET *in situ* no MEV. Desta forma, foi observado uma interação eletromagnética entre o feixe de elétrons e o campo magnético gerado pela atuação do dispositivo MAET, fenômeno ainda não reportado na literatura disponível consultada.

Alguns comportamentos inesperados foram registrados e discutidos, como a variação abrupta e cíclica da resistividade, e a degradação da superfície do dispositivo perto do ponto de fusão.

O deslocamento do dispositivo para as simulações MEF e para o modelo proposto, descreve bem os valores dos experimentos até 30 mA, com o respectivo deslocamento igual a  $(0,8 \pm 0,2) \mu\text{m}$ . Por esse motivo, acredita-se que a abordagem proposta possa ser um método eficiente, rápido e eficaz para prever o deslocamento da plataforma central, e a distribuição de temperatura em dispositivos MAET fabricados com materiais que possuam dependência de temperatura para parâmetros como condutividade térmica e resistividade elétrica.

Resultados experimentais mostraram que o dispositivo para ensaio de tração é capaz de alcançar um deslocamento de  $1,7 \mu\text{m}$ , para uma tensão elétrica de  $7,5\text{V}$ , quando acoplada à célula de carga. Esta, registrou uma força maior que  $0,6 \text{ mN}$  para a mesma tensão elétrica.

Em vácuo, a distribuição de temperatura foi bastante similar aos resultados observados dentro do MEV quando dispositivo foi posto em condições extremas. Ainda assim, com e sem vigas dissipadoras de calor, os valores de temperatura da simulação MEF mostraram valores muito abaixo do ponto de fusão do silício *bulk*. Os resultados de distribuição de temperatura, feito em ar com ajuda de uma câmera térmica, se mostraram

estar em concordância com os simulados, embora o erro experimental tenha sido grande devido ao aquecimento do porta-chip cerâmico utilizado.

Por fim, foi possível projetar e executar uma rota de fabricação de um dispositivo para ensaio de tração de nanomateriais *in situ*, dentro de um microscópio eletrônico de transmissão, e acoplável a um porta-amostra de bias elétrico comercial fabricado pela empresa *HummingBird*.

## 7.1. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros pretende-se:

- Prender e realizar um teste de tração em uma amostra de filme fino de cobre ou platina, colocada no microdispositivo fabricado usando FIB e nanomanipulador;
- Encontrar uma equação que descreva a mudança de potencial elétrico em função da largura da plataforma central;
- Encontrar uma equação que possa descrever a distribuição de temperatura nas vigas inclinadas dos atuadores MAET, assim como o deslocamento, levando-se em conta as vigas dissipadoras de calor;
- Desenvolver uma instrumentação que tenha a capacidade de medir a temperatura dentro do MEV enquanto se aplica corrente elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology, Volume I, Solid-State Physics, Fluidics, and Analytical Techniques in Micro- and Nanotechnology*, Third (Press, CRC, Cambridge, 2011).
- [2] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution* (Currency, 2017).
- [3] A. D. Maynard, *Nat. Nanotechnol.* **10**, 1005 (2015).
- [4] M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology, Volume II, Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology*, Third (CRC Press, 2011).
- [5] H.-Y. Y. Tang, Y. Lu, X. Jiang, E. J. Ng, J. M. Tsai, D. A. Horsley, and B. E. Boser, *IEEE J. Solid-State Circuits* **51**, 2522 (2016).
- [6] S. Yang and Q. Xu, *J. Micro-Bio Robot.* **13**, 1 (2017).
- [7] Jae-Sung Park, L. L. Chu, A. D. Oliver, and Y. B. Gianchandani, *J. Microelectromechanical Syst.* **10**, 255 (2001).
- [8] X. Xi, T. Clancy, X. Wu, Y. Sun, and X. Liu, *J. Micromechanics Microengineering* **26**, 025014 (2016).
- [9] S. Iqbal, A. A. Malik, and R. I. Shakoor, *Microsyst. Technol.* **25**, 861 (2019).
- [10] Z.-Q. Tan and Y.-C. Chen, *Compos. Part B Eng.* **161**, 183 (2019).
- [11] L. Hu, W.-M. Zhang, H. Yan, and H.-X. Zou, in (Springer, Cham, 2019), pp. 259–265.
- [12] D. Shojaei-Asanjan, M. Bakri-Kassem, and R. R. Mansour, *J. Microelectromechanical Syst.* **28**, 107 (2019).
- [13] M. Vutukuru, J. W. Christopher, C. Pollock, D. J. Bishop, and A. K. Swan, *J. Microelectromechanical Syst.* **28**, 550 (2019).
- [14] Potekhina and Wang, *Actuators* **8**, 69 (2019).
- [15] Z. Zhang, Y. Yu, and X. Zhang, in *2018 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.* (IEEE,

- 2018), pp. 521–526.
- [16] M. Saqib, M. Mubasher Saleem, N. Mazhar, S. Awan, and U. Shahbaz Khan, *Micromachines* **9**, 577 (2018).
- [17] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, and N. White, *MEMS Mechanical Sensors* (ARTECH HOUSE, INC, Boston, London, 2004).
- [18] T. T. and O. T. H. Hamaguchi, K. Sugano, in *TRANSDUCERS 2007 - 2007 Int. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems Conf.* (2007), pp. 213–221.
- [19] S. Park, D. Kwak, H. Ko, T. Song, and D. Cho, *J. Micromechanics Microengineering* **15**, 1607 (2005).
- [20] J. Singh, J. H. S. Teo, Y. Xu, C. S. Premachandran, N. Chen, R. Kotlanka, M. Olivo, and C. J. R. Sheppard, *J. Micromechanics Microengineering* **18**, 025001 (2008).
- [21] T. Tsuchiya and H. Funabashi, in *17th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst. Maastricht MEMS 2004 Tech. Dig.* (IEEE, 2004), pp. 524–527.
- [22] H. Rödjegård, C. Johansson, P. Enoksson, and G. Andersson, *Sensors Actuators, A Phys.* **123–124**, 50 (2005).
- [23] A. Chaudhry and M. J. Kumar, *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **4**, 99 (2004).
- [24] S. Cristoloveanu, D. Munteanu, and M. S. T. Liu, *IEEE Trans. Electron Devices* **47**, 1018 (2000).
- [25] A. Ortiz-Conde, F. J. García-Sánchez, J. Muci, S. Malobabic, and J. J. Liou, *IEEE Trans. Electron Devices* **54**, 131 (2007).
- [26] D. V. Dao, K. Nakamura, T. T. Bui, and S. Sugiyama, *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* **1**, (2010).
- [27] M. Mansoor, I. Haneef, S. Akhtar, M. A. Rafiq, S. Z. Ali, and F. Udrea, in *Proc. IEEE Sensors* (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014), pp. 1204–1207.
- [28] K. E. Petersen, in *1985 Int. Electron Devices Meet.* (IRE, 1985), pp. 2–7.
- [29] D. C. Miller, B. L. Boyce, M. T. Dugger, T. E. Buchheit, and K. Gall, *Sensors Actuators A Phys.* **138**, 130 (2007).
- [30] M. A. Hopcroft, W. D. Nix, and T. W. Kenny, *J. Microelectromechanical Syst.* **19**,

- 229 (2010).
- [31] J. Ouyang, M. McDonald, and Y. Zhu, *J. Micromechanics Microengineering* **23**, 125036 (2013).
- [32] J. Ouyang and Y. Zhu, *J. Microelectromechanical Syst.* **21**, 596 (2012).
- [33] Q. Qin and Y. Zhu, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 013101 (2013).
- [34] A. A. Geisberger, N. Sarkar, M. Ellis, and G. D. Skidmore, *J. Microelectromechanical Syst.* **12**, 513 (2003).
- [35] T.-H. Chang and Y. Zhu, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 263114 (2013).
- [36] M. F. Pantano, R. A. Bernal, L. Pagnotta, and H. D. Espinosa, *Meccanica* **50**, 549 (2015).
- [37] Y. Okada and Y. Tokumaru, *J. Appl. Phys.* **56**, 314 (1984).
- [38] M. Chiao and L. Lin, *J. Microelectromechanical Syst.* **9**, 146 (2000).
- [39] Y. Zhu, A. Corigliano, and H. D. Espinosa, *J. Micromechanics Microengineering* **16**, 242 (2006).
- [40] Gregory T. Kovacs, *Micromachined Transducers - Sourcebook*, 1st ed. (McGraw-Hill Science, San Francisco, 1998).
- [41] H. J. D. L. Santos, *Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems*, 2 edition (Artech House, 2004).
- [42] K. E. Petersen, *Appl. Phys. Lett.* **31**, 521 (1977).
- [43] W. Riethmuller and W. Benecke, *IEEE Trans. Electron Devices* **35**, 758 (1988).
- [44] D. Moser, R. Lenggenhager, and H. Baltes, *Sensors Actuators A Phys.* **27**, 577 (1991).
- [45] M. Parameswaran, L. Ristic, K. Chau, A. M. Robinson, and W. Allegretto, in *IEEE Proc. Micro Electro Mech. Syst. An Investig. Micro Struct. Sensors, Actuators, Mach. Robot.* (IEEE, Napa Valley, CA, USA, USA, 1990), pp. 128–131.
- [46] T. Lalinský, E. Burian, M. Držík, S. Hascík, Z. Mozolová, and J. Kuzmík, *J. Micromechanics Microengineering* **10**, 293 (2000).
- [47] H. Sehr, A. G. R. Evans, A. Brunnschweiler, G. J. Ensell, and T. E. G. Niblock, *J.*

- Micromechanics Microengineering **11**, 306 (2001).
- [48] L. Zhou, Z. Li, M. Liang, Y. Chen, X. Zhang, and H. Xie, in *MOEMS Miniaturized Syst. XVIII*, edited by W. Piyawattanametha, Y.-H. Park, and H. Zappe (SPIE, 2019), p. 11.
- [49] L. Liu, S. Pal, and H. Xie, *Sensors Actuators A Phys.* **188**, 349 (2012).
- [50] N. Lobontiu and E. Garcia, *Mechanics of Microelectromechanical Systems*, 1st ed. (Kluwer Academic Publishers, Boston, 2005).
- [51] H. Guckel, J. Klein, T. Christenson, K. Skrobis, M. Laudon, and E. G. Lovell, in *Tech. Dig. IEEE Solid-State Sens. Actuator Work.* (IEEE, 1992), pp. 73–75.
- [52] J. H. Comtois, V. M. Bright, and M. W. Phipps, in *Micromachined Devices and Components*, edited by R. M. Roop and K. H. Chau (1995), p. 10.
- [53] P. Lerch, C. K. Slimane, B. Romanowicz, and P. Renaud, *J. Micromechanics Microengineering* **6**, 134 (1996).
- [54] L. Lin and M. Chiao, *Sensors Actuators A Phys.* **55**, 35 (1996).
- [55] D. M. Burns and V. M. Bright, in *Micromachined Devices Components III*, edited by K. H. Chau and P. J. French (International Society for Optics and Photonics, 1997), p. 296.
- [56] D. Yan, A. Khajepour, and R. Mansour, *J. Micromechanics Microengineering* **13**, 312 (2003).
- [57] C. S. Pan and W. Hsu, *J. Micromechanics Microengineering* **7**, 7 (1997).
- [58] J. T. Butler, V. M. Bright, and W. D. Cowan, *Sensors Actuators A Phys.* **72**, 88 (1999).
- [59] Q.-A. Huang and N. K. S. Lee, *J. Micromechanics Microengineering* **9**, 64 (1999).
- [60] M. M. Othayq, *Out-of-Plane Thermal Actuators for Sensing and Surface Property Measurements*, 2018.
- [61] M. Lara-Castro, A. Herrera-Amaya, M. Escarola-Rosas, M. Vázquez-Toledo, F. López-Huerta, L. Aguilera-Cortés, and A. Herrera-May, *Micromachines* **8**, 203 (2017).
- [62] C. Guan and Y. Zhu, *J. Micromechanics Microengineering* **20**, 085014 (2010).

- [63] Z. Zhang, Y. Yu, X. Liu, and X. Zhang, in *2015 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.* (IEEE, 2015), pp. 1025–1030.
- [64] H. Hussein, A. Tahhan, P. Le Moal, G. Bourbon, Y. Haddab, and P. Lutz, *J. Micromechanics Microengineering* **26**, 025010 (2016).
- [65] W. C. Young and R. G. Budynas, *Roark 's Formulas for Stress and Strain*, Seventh Ed (2002).
- [66] M. Pustan, R. Chiorean, C. Birleanu, C. Dutescu, R. Muller, A. Baracu, and R. Voicu, *Microsyst. Technol.* **23**, 3863 (2017).
- [67] Z. Zhang, W. Zhang, Q. Wu, Y. Yu, X. Liu, and X. Zhang, *J. Micromechanics Microengineering* **27**, 015023 (2017).
- [68] Z. Zhang, Y. Yu, X. Liu, and X. Zhang, in *2016 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.* (IEEE, 2016), pp. 890–895.
- [69] Z. Zhang, Y. Yu, X. Liu, and X. Zhang, *Microsyst. Technol.* **23**, 3775 (2017).
- [70] Y. B. Gianchandani and K. Najafi, *J. Microelectromechanical Syst.* **5**, 52 (1996).
- [71] E. H. Klaassen, K. Petersen, J. M. Noworolski, J. Logan, N. I. Maluf, J. Brown, C. Storment, W. McCulley, and G. T. A. Kovacs, *Sensors Actuators A Phys.* **52**, 132 (1996).
- [72] Y. Zhu, C. Ke, and H. D. Espinosa, *Exp. Mech.* **47**, 7 (2007).
- [73] J. J. Brown, J. W. Suk, G. Singh, A. I. Baca, D. A. Dikin, R. S. Ruoff, and V. M. Bright, *Sensors Actuators A Phys.* **155**, 1 (2009).
- [74] M. A. Haque, H. D. Espinosa, and H. J. Lee, *MRS Bull.* **35**, 375 (2010).
- [75] H. D. Espinosa, R. A. Bernal, and T. Filleter, in *Nano Cell Mech.* (John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2012), pp. 191–226.
- [76] C. D. Lott, T. W. McLain, J. N. Harb, and L. L. Howell, *Sensors Actuators A Phys.* **101**, 239 (2002).
- [77] Y. Zhu, N. Moldovan, and H. D. Espinosa, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 013506 (2005).
- [78] B. Peng, M. Locascio, P. Zapol, S. Li, S. L. Mielke, G. C. Schatz, and H. D. Espinosa, *Nat. Nanotechnol.* **3**, 626 (2008).

- [79] S. Kumar, M. A. Haque, and H. Gao, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 253104 (2009).
- [80] S. KUMAR and M. A. HAQUE, *Int. J. Appl. Mech.* **02**, 745 (2010).
- [81] R. Ramachandramoorthy, A. Beese, and H. Espinosa, *Int. J. Mech. Sci.* **149**, 452 (2018).
- [82] J. J. Brown, A. I. Baca, K. A. Bertness, D. A. Dikin, R. S. Ruoff, and V. M. Bright, *Sensors Actuators A Phys.* **166**, 177 (2011).
- [83] R. A. Bernal, R. Agrawal, B. Peng, K. A. Bertness, N. A. Sanford, A. V. Davydov, and H. D. Espinosa, *Nano Lett.* **11**, 548 (2011).
- [84] M. S. Steighner, L. P. Snedeker, B. L. Boyce, K. Gall, D. C. Miller, and C. L. Muhlstein, *J. Appl. Phys.* **109**, 033503 (2011).
- [85] B. Pant, B. L. Allen, T. Zhu, K. Gall, and O. N. Pierron, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 053506 (2011).
- [86] B. Pant, S. Choi, E. K. Baumert, B. L. Allen, S. Graham, K. Gall, and O. N. Pierron, *Exp. Mech.* **52**, 607 (2012).
- [87] M. Yilmaz and J. W. Kysar, *Nanotechnology* **24**, 165502 (2013).
- [88] E. Hosseinian and O. N. Pierron, *Nanoscale* **5**, 12532 (2013).
- [89] Q. Qin, S. Yin, G. Cheng, X. Li, T.-H. Chang, G. Richter, Y. Zhu, and H. Gao, *Nat. Commun.* **6**, 5983 (2015).
- [90] H. D. Espinosa, Yong Zhu, and A. Corigliano, in *7th. Int. Conf. Therm. Mech. Multiphysics Simul. Exp. Micro-Electronics Micro-Systems* (IEEE, 2006), pp. 1–5.
- [91] R. Agrawal, B. Peng, E. E. Gdoutos, and H. D. Espinosa, *Nano Lett.* **8**, 3668 (2008).
- [92] J. K. Luo, A. J. Flewitt, S. M. Spearing, N. A. Fleck, and W. I. Milne, *J. Micromechanics Microengineering* **15**, 1294 (2005).
- [93] Y. Zhu and T.-H. Chang, *J. Micromechanics Microengineering* **25**, 093001 (2015).
- [94] T. Hu, K. Fang, Z. Zhang, X. Jiang, and Y. Zhao, *Sensors Actuators A Phys.* **283**, 26 (2018).
- [95] H.-W. Huang, H.-H. Liao, and Y.-J. Yang, in *2011 6th IEEE Int. Conf. Nano/Micro*

- Eng. Mol. Syst.* (IEEE, 2011), pp. 607–610.
- [96] C. Liu, *Foundations of MEMS*, Second Edi (Prentice Hall, 2012).
- [97] S. D. Senturia, *Microsystem Design*, 1st ed. (Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002).
- [98] H. D. Espinosa, Yong Zhu, and N. Moldovan, *J. Microelectromechanical Syst.* **16**, 1219 (2007).
- [99] D. Zhang, W. Drissen, J.-M. M. Breguet, R. Clavel, and J. Michler, *J. Micromechanics Microengineering* **19**, 075003 (2009).
- [100] W. C. Tang, T.-C. H. Nguyen, and R. T. Howe, *Sensors and Actuators* **20**, 25 (1989).
- [101] X. Zhu and Y. Sakka, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **9**, 033001 (2008).
- [102] Y. Zhu and H. D. Espinosa, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **102**, 14503 (2005).
- [103] Y. Sun, S. N. Fry, D. P. Potasek, D. J. Bell, and B. J. Nelson, *J. MICROELECTROMECHANICAL Syst.* **14**, 4 (2005).
- [104] C. Yamahata, D. Collard, B. Legrand, T. Takekawa, M. Kumemura, G. Hashiguchi, and H. Fujita, *J. Microelectromechanical Syst.* **17**, 623 (2008).
- [105] F. Beyeler, A. Neild, S. Oberti, D. J. Bell, Y. Sun, J. Dual, and B. J. Nelson, *J. Microelectromechanical Syst.* **16**, 7 (2007).
- [106] Dongfeng Zhang, J.-M. M. Breguet, R. Clavel, V. Sivakov, S. Christiansen, J. Michler, D. Zhang, J.-M. M. Breguet, R. Clavel, V. Sivakov, S. Christiansen, and J. Michler, *J. Microelectromechanical Syst.* **19**, 663 (2010).
- [107] L. L. Shaw, A. L. Ortiz, and J. C. Villegas, *Scr. Mater.* **58**, 951 (2008).
- [108] M. DAO, L. LU, R. ASARO, J. DEHOSSON, and E. MA, *Acta Mater.* **55**, 4041 (2007).
- [109] E. N. Hahn and M. A. Meyers, *Mater. Sci. Eng. A* **646**, 101 (2015).
- [110] M. A. Meyers, A. Mishra, and D. J. Benson, *Prog. Mater. Sci.* **51**, 427 (2006).
- [111] W. Wan, H. Chen, C. Long, Q. Sun, G. Li, H. Wang, and Q. Tang, *Mater. Charact.* **134**, 279 (2017).

- [112] W. D. Callister and J. Wiley, *Materials Science and Engineering - An Introduction*, 7th ed. (John Wiley & Sons, Ltd, 2007).
- [113] N. J. Petch, *J. Iron Steel Inst.* **174**, 25 (1953).
- [114] E. O. Hall, *Proc. Phys. Soc. Sect. B* **64**, 747 (1951).
- [115] K. K. C. M. A. Meyers, *Princípios de Metalurgia Mecânica* (São Paulo, SP, Brazil, 1982).
- [116] G. E. Dieter, *Metalurgia Mecânica* (Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP, Brazil, 1982).
- [117] H. Somekawa and T. Mukai, *Mater. Sci. Eng. A* **561**, 378 (2013).
- [118] W. Xu and L. P. Dávila, *Mater. Sci. Eng. A* **710**, 413 (2018).
- [119] H. Ryou, J. W. Drazin, K. J. Wahl, S. B. Qadri, E. P. Gorzkowski, B. N. Feigelson, J. A. Wollmershauser, H. Ryou, E. P. Gorzkowski, J. A. Wollmershauser, B. N. Feigelson, S. B. Qadri, and J. W. Drazin, *ACS Nano* **12**, 3083 (2018).
- [120] M. Sokol, M. Halabi, Y. Mordekovitz, S. Kalabukhov, S. Hayun, and N. Frage, *Scr. Mater.* **139**, 159 (2017).
- [121] S. S. Quek, Z. H. Chooi, Z. Wu, Y. W. Zhang, and D. J. Srolovitz, *J. Mech. Phys. Solids* **88**, 252 (2016).
- [122] Q.-A. Huang and N. K. S. Lee, *Microsyst. Technol.* **5**, 133 (1999).
- [123] J. Varona, M. Tecpoyotl-Torres, and A. A. Hamoui, in *Electron. Robot. Automot. Mech. Conf. (CERMA 2007)* (IEEE, 2007), pp. 591–596.
- [124] N. D. Mankame and G. K. Ananthasuresh, *J. Micromechanics Microengineering* **11**, 452 (2001).
- [125] W. C. Tang, T.-C. H. Nguyen, M. W. Judy, and R. T. Howe, *Sensors Actuators A Phys.* **21**, 328 (1990).
- [126] S. Datta, *COMSOL Blog* (2014).
- [127] X. H. Chen and L. Lu, *Scr. Mater.* **57**, 133 (2007).
- [128] J. H. Young, *Appl. Sci. Res.* **43**, 55 (1986).

- [129] R. Verma, S. Bhattacharya, and S. Mahapatra, *IEEE Trans. Electron Devices* **58**, 3991 (2011).
- [130] R. Hickey, M. Kujath, and T. Hubbard, *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.* **20**, 971 (2002).
- [131] Z. Zhang, W. Zhang, Q. Wu, Y. Yu, X. Liu, and X. Zhang, in *Mech. Mach. Sci.* (Springer, Cham, 2015), pp. 177–187.
- [132] D. Girbau, A. Lazaro, and L. Pradell, in *33rd Eur. Microw. Conf. Proc. (IEEE Cat. No.03EX723C)* (IEEE, 2003), pp. 651–654 vol.2.
- [133] S. M. Sze, *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, 2002).
- [134] L. Stockmeier, *Heavily N-Type Doped Silicon and the Dislocation Formation during Its Growth by the Czochralski Method.*, Fraunhofer IISB, 2017.
- [135] S. S. Li and W. R. Thurber, *Solid. State. Electron.* **20**, 609 (1977).
- [136] M. Asheghi, K. Kurabayashi, R. Kasnavi, and K. E. Goodson, *J. Appl. Phys.* **91**, 5079 (2002).
- [137] YES, *YES HMDS VAPOR PRIME PROCESS APPLICATION NOTE* (Yield Engineering Systems, 2019).
- [138] M. A. Haque and M. T. A. Saif, *Exp. Mech.* **42**, 123 (2002).
- [139] B. A. Samuel, M. A. Haque, B. Yi, R. Rajagopalan, and H. C. Foley, *Nanotechnology* **18**, 115704 (2007).
- [140] X. Li, Y. Zhao, T. Hu, W. Xu, Y. Zhao, Y. Bai, and W. Ren, *Microsyst. Technol.* **21**, 2367 (2015).
- [141] T. Moulton and G. . Ananthasuresh, *Sensors Actuators A Phys.* **90**, 38 (2001).
- [142] A. Hirshberg and D. Elata, in *2009 IEEE 22nd Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.* (IEEE, 2009), pp. 757–760.
- [143] M. Antelius, A. C. Fischer, F. Niklaus, G. Stemme, and N. Roxhed, *J. Micromechanics Microengineering* **22**, 045021 (2012).
- [144] L. Stockmeier, L. Lehmann, A. Miller, C. Reimann, and J. Friedrich, *Cryst. Res.*

- Technol. **52**, 1600373 (2017).
- [145] L. Stockmeier, M. Elsayed, R. Krause-Rehberg, M. Zschorsch, L. Lehmann, and J. Friedrich, *Solid State Phenom.* **242**, 10 (2015).
- [146] A. Santoro, J. R. Mahon, J. U. C. L. de Oliveira, L. M. M. Filho, V. Oguri, and W. L. P. da Silva, *Estimativas e Erros Em Experimentos de Física*, 2. ed. (EdUERJ, Rio de Janeiro, 2008).
- [147] D. Pollock, *Thermoelectricity Theory, Thermometry, Tool* (ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1985).
- [148] R. V. Mises, *ZAMM - Zeitschrift Für Angew. Math. Und Mech.* **8**, 161 (1928).

## APÊNDICE A Simplificação da equação de Young

Dada a equação de Young

$$\phi = \int \frac{\left[ \frac{\kappa(T)}{\sigma(T)} \right]}{\sqrt{\eta - 2 \int \left[ \frac{\kappa(T)}{\sigma(T)} \right] dT}} + v$$

Primeiro, fazendo uma mudança de variável  $\sigma(T) = \frac{1}{\rho(T)}$ , é possível obter

$$\phi = \int \frac{[\kappa(T)\rho(T)]dT}{\sqrt{\eta - 2 \int [\kappa(T)\rho(T)]dT}} + v$$

se,  $u = \int \kappa(T)\rho(T)dT$ , então,  $du = \kappa(T)\rho(T)dT$ . Então, a integral assume a forma

$$\phi = \int \frac{du}{\sqrt{\eta - 2u}} + v$$

O resultado da integração fornece

$$\phi = \sqrt{\eta - 2u} + v$$

E finalmente

$$\begin{cases} 2u = \eta - (\phi - v)^2 \\ u = \int \kappa(T)\rho(T)dT \end{cases} \quad (1)$$

## APÊNDICE B Equação de Young para conjunto 1

Definindo,  $u_0 = u(T = T_0)$ , and using  $\phi = 0 \rightarrow T = T_0$  and  $\phi = U \rightarrow T = T_0$ , (1) pode ser escrito como

$$\begin{cases} 2u_0 = \eta - v^2 \\ 2u_0 = \eta - (U - v)^2 \end{cases}$$

De forma que  $v^2 = (U - v)^2 \rightarrow v = \frac{U}{2}$  and  $\eta = 2u_0 - \left(\frac{U}{2}\right)^2$ . Na equação (1), se  $\kappa(T) = c_1 T^{-c_2}$ , e  $\rho(T) = \rho_0 [1 - \gamma(T - 273)]$ , é possível obter:

$$u = \int c_1 T^{-c_2} \rho_0 [1 - \gamma(T - 273)] dT$$

$$\begin{aligned}
u &= c_1 \rho_0 \int [T^{-c_2} - \gamma(T T^{-c_2} - 273T^{-c_2})] dT \\
u &= c_1 \rho_0 \int [T^{-c_2} - \gamma(T^{-c_2+1} - 273T^{-c_2})] dT \\
u &= c_1 \rho_0 \left[ \int T^{-c_2} dT - \gamma \int T^{-c_2+1} dT + 273\gamma \int T^{-c_2} dT \right] \\
u(T) &= c_1 \rho_0 \left[ \frac{T^{1-c_2}}{1-c_2} - \gamma \frac{T^{2-c_2}}{2-c_2} + 273\gamma \frac{T^{1-c_2}}{1-c_2} \right] \\
u(T) &= c_1 \rho_0 \left[ \frac{T^{1-c_2}}{1-c_2} (273\gamma + 1) - \gamma \frac{T^{2-c_2}}{2-c_2} \right] \\
u(T) &= c_1 \rho_0 \left[ \frac{(273\gamma + 1)}{1-c_2} T^{1-c_2} - \frac{\gamma T}{2-c_2} T^{1-c_2} \right] \\
u(T) &= c_1 \rho_0 T^{1-c_2} \left[ \frac{(273\gamma + 1)}{1-c_2} - \frac{\gamma T}{2-c_2} \right] \\
u(T) &= \frac{c_1 \rho_0}{(1-c_2)(2-c_2)} \left[ \frac{\gamma(c_2 - 1)T + (273\gamma + 1)(2 - c_2)}{T^{c_2-1}} \right]
\end{aligned}$$

Consequentemente

$$u_0 = \frac{c_1 \rho_0}{(1-c_2)(2-c_2)} \left[ \frac{\gamma(c_2 - 1)T_0 + (273\gamma + 1)(2 - c_2)}{T_0^{c_2-1}} \right]$$

Usando as propriedades físicas mostradas no conjunto 1 da Tabela 2.2 (página 23) é possível chegar a:

$$\frac{10 + U^2}{4} - \left( \phi - \frac{U}{2} \right)^2 = \frac{1.1 \times 10^{-5} (8241 T - 1.3 \times 10^6)}{T^{0.2747}} \quad (2)$$

## APÊNDICE C Solução da equação Young para conjunto 1 com Maple

*restart;*

$$\begin{aligned}
eq &:= \frac{1}{4} U^2 + 0.04055503892293 \frac{7253}{10000} - \left( \phi - \frac{1}{2} U \right)^2 \\
&= \frac{0.00001078454412 (8241. T - 1.312793 \cdot 10^6)}{T^{\frac{2747}{10000}}};
\end{aligned}$$

$U := 5.5$

$n := 500;$

for i from 0 by  $\frac{U}{n}$  to U do phi[i] := i end do;

for i from 0 by  $\frac{U}{n}$  to U do eq[i] :=  $\frac{U^2}{4} + 0.04055503892293 \frac{7253}{10000} - \left(i - \frac{U}{2}\right)^2$   
 $= \frac{0.00001078454412 (8241. T - 1.312793000 10^6)}{\frac{2747}{T^{10000}}}$  end do;

for i from 0 by  $\frac{U}{n}$  to U do  $T\_eq[i] := fsolve(eq[i])$  end do

## APÊNDICE D Ajuste polinomial para $f_1$ e $f_2$

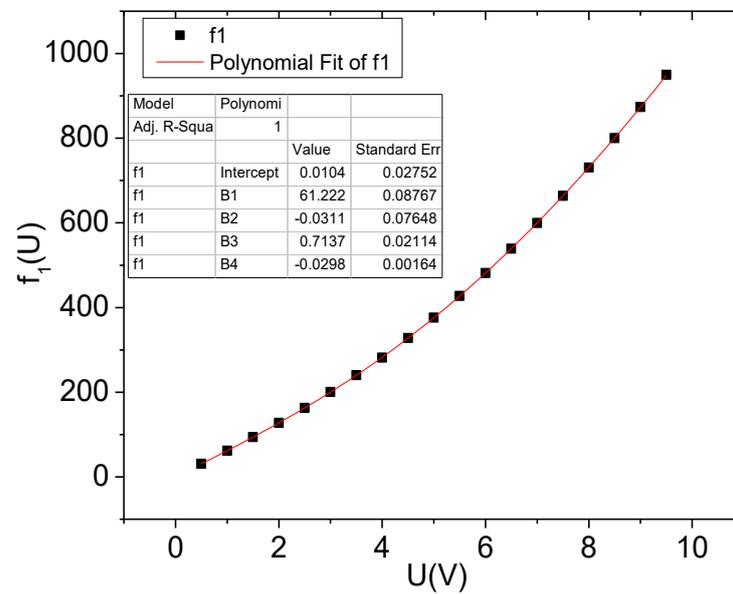


Figura D.1 – Ajuste polinomial de  $f_1$

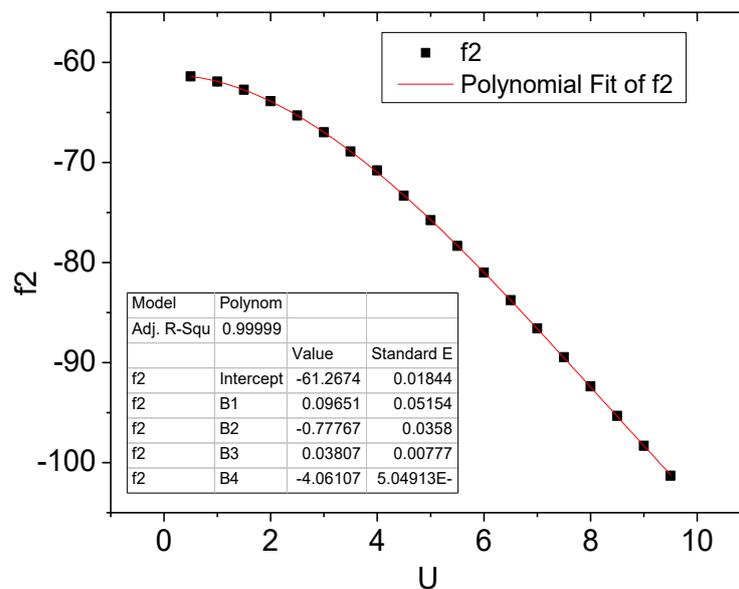


Figura D.2 – Ajuste polinomial de  $f_2$

## APÊNDICE E Solução analítica para conjunto 1

A equação (2) pode ser calculada numericamente a partir de um ajuste polinomial do tipo  $T(\phi) = T_0 + f_1\phi + f_2\phi^2$ . Para encontrar a dependência da posição, usa-se o potencial elétrico auxiliar  $\nabla^2\psi = 0$  e  $\psi = \rho_0 \int \frac{d\phi}{\rho(T)}$ . Se  $\rho(T) = \rho_0[1 + \gamma(T - 273)]$ , então é possível escrever que

$$\begin{aligned}\psi &= \rho_0 \int \frac{d\phi}{\rho_0[1 + \gamma(T_0 + f_1\phi + f_2\phi^2) - 273]} \\ &= \frac{\rho_0}{\rho_0} \int \frac{d\phi}{\underbrace{\gamma f_2}_A \phi^2 + \underbrace{\gamma f_1}_B \phi + \underbrace{(T_0\gamma + 1 - 273)}_C} \\ \psi &= \frac{2}{\sqrt{4AC - B^2}} \tan^{-1} \left( \frac{2A\phi + b}{\sqrt{4AC - B^2}} \right)\end{aligned}\quad (3)$$

Por outro lado, a solução da equação de Laplace fornecerá uma solução linear dado por:  $\nabla^2\psi = 0 \rightarrow \psi = ax + b$ . Substituindo em (3) é possível obter

$$ax + b = \frac{2}{\underbrace{\sqrt{4AC - B^2}}_\lambda} \tan^{-1} \left( \frac{2A\phi + b}{\sqrt{4AC - B^2}} \right)$$

$$\frac{\lambda}{2}(ax + b) = \tan^{-1} \left( \frac{2A\phi + b}{\lambda} \right)$$

$$\tan \left( \frac{\lambda}{2}(ax + b) \right) = \frac{2A\phi + b}{\lambda}$$

$$\phi = \frac{1}{2A} \left[ \lambda \tan \left( \frac{\lambda}{2}(ax + b) \right) - b \right]$$

Fazendo a transformação para o caminho hiperbólico, isso significa que  $\lambda = i\Lambda$ , ent

$$\phi = \frac{1}{2A} \left[ i\Lambda \tan \left( \frac{i\Lambda}{2}(ax + b) \right) - b \right]$$

$$\phi = \frac{\Lambda}{\underbrace{2A}_{r_1}} \tanh \left( \frac{\Lambda}{\underbrace{2}_{r_2}} ax + \frac{\Lambda}{\underbrace{2}_{r_3}} b \right) + \left( \frac{-\Lambda}{\underbrace{2A}_{r_4}} b \right)$$

$$\phi = r_1 \tanh(r_2 x + r_3) + r_4 \quad (4)$$

Tabela E.1 Constantes para equação de potencial elétrico

U	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	Comprimento total ( $2L_0$ )
1	2.44	692.7	-0.21	0.5	$2L_0 = 600 \mu\text{m}$ Fig.4. (a)
2	2.56	1378.2	-0.41	1.0	
3	2.74	2048.8	-0.61	1.49	
4	2.99	2697.2	-0.80	1.99	
5	3.29	3319.1	-0.98	2.48	
6	3.63	3913.7	-1.15	2.97	
7	4.01	4484.2	-1.31	3.46	
1	2.44	670.3	-0.21	0.5	$2L_0 = 620 \mu\text{m}$ Fig.4. (b)
2	2.56	1333.8	-0.41	1.0	
3	2.74	1982.7	-0.61	1.49	
4	2.99	2610.2	-0.80	1.99	
5	3.29	3212.1	-0.98	2.48	
6	3.63	3787.5	-1.15	2.97	
7	4.01	4339.5	-1.31	3.46	

Usando (4) em ajuste de temperatura, é possível escrever

$$\Delta T(x) = f_1[r_1 \tanh(r_2 x + r_3) + r_4] + f_2[r_1 \tanh(r_2 x + r_3) + r_4]^2$$

$$\Delta T(x) = f_1[r_1 \tanh(r_2 x + r_3) + r_4] + f_2[r_1^2 \tanh^2(r_2 x + r_3) + 2r_1 \tanh(r_2 + r_3)r_4 + r_4^2]$$

$$\Delta T(x) = f_1 r_1 \tanh(r_2 x + r_3) + f_1 r_4 + f_2 r_1^2 \tanh^2(r_2 x + r_3) + 2f_2 r_1 \tanh(r_2 + r_3)r_4 + f_2 r_4^2$$

$$\Delta T(x) = \underbrace{f_2 r_1^2}_{\Gamma} \tanh^2(r_2 x + r_3) + \underbrace{(2f_2 r_1 + f_1 r_1)}_E \tanh(r_2 + r_3)r_4 + \underbrace{f_2 r_4^2 + f_1 r_4}_{\Theta}$$

$$\boxed{\Delta T(x) = \Gamma \tanh^2(r_2 x + r_3) + E \tanh(r_2 x + r_3) + \Theta} \quad (5)$$

A expansão linear, na forma integral, pode ser dada por  $\Delta L = \int_0^{L_0} \alpha(x) \Delta T(x) dx$ . O coeficiente de expansão térmica não é exibido por:

$$\alpha(T) = -\frac{4 \times 10^{-12}}{\alpha_1} T^2 + \frac{8 \times 10^{-9}}{\alpha_2} T + \frac{4 \times 10^{-7}}{\alpha_3}$$

$$\alpha(T) = -\alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3$$

$$\alpha(T) = -\alpha_1 (\Gamma \tanh^2(r_2 x + r_3) + E \tanh(r_2 x + r_3) + \Theta + T_0)^2 + \alpha_2 (\Gamma \tanh^2(r_2 x + r_3) + E \tanh(r_2 x + r_3) + \Theta + T_0) + \alpha_3$$

Obs:

$$(\Gamma \tanh^2(r_2 x + r_3) + E \tanh(r_2 x + r_3) + \Theta + T_0)^2 =$$

$$\begin{aligned}
&= (\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + \Theta + T_0)^2 + 2(\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + \Theta + T_0)(E \tanh(r_2x + r_3)) + (E \tanh(r_2x + r_3))^2 \\
&= \Gamma^2 \tanh^4(r_2x + r_3) + 2\Gamma E \tanh^3(r_2x + r_3) + [2(\Theta + T_0)\Gamma + E^2] \tanh^2(r_2x + r_3) + 2(\Theta + T_0)E \tanh(r_2x + r_3) + (\Theta + T_0)^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha(T) &= -\alpha_1[\Gamma^2 \tanh^4(r_2x + r_3) + 2\Gamma E \tanh^3(r_2x + r_3) + [2(\Theta + T_0)\Gamma + E^2] \tanh^2(r_2x + r_3) + 2(\Theta + T_0)E \tanh(r_2x + r_3) \\
&\quad + (\Theta + T_0)^2] + \alpha_2 (\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta + T_0) + \alpha_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha(T) &= -\alpha_1\Gamma^2 \tanh^4(r_2x + r_3) - 2\alpha_1\Gamma E \tanh^3(r_2x + r_3) - \alpha_1[2(\Theta + T_0)\Gamma + E^2] \tanh^2(r_2x + r_3) \\
&\quad - 2\alpha_1(\Theta + T_0)E \tanh(r_2x + r_3) - \alpha_1(\Theta + T_0)^2 + \alpha_2\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + \alpha_2E \tanh(r_2x + r_3) + \alpha_2(\Theta + T_0) \\
&\quad + \alpha_3
\end{aligned}$$

Usando essas equações a integral se tornará:

$$\Delta L = \int_0^{L_0} \alpha(x) \Delta \Gamma(x) dx$$

$$\begin{aligned}
\Delta L &= \int_0^{L_0} \{-\alpha_1\Gamma^2 \tanh^4(r_2x + r_3) - 2\alpha_1\Gamma E \tanh^3(r_2x + r_3) - \alpha_1[2(\Theta + T_0)\Gamma + E^2] \tanh^2(r_2x + r_3) \\
&\quad - 2\alpha_1(\Theta + T_0)E \tanh(r_2x + r_3) - \alpha_1(\Theta + T_0)^2 + \alpha_2\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + \alpha_2E \tanh(r_2x + r_3) + \alpha_2(\Theta + T_0) \\
&\quad + \alpha_3\} \{\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta\} dx
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta L &= \int_0^{L_0} \{-\alpha_1\Gamma^2 \tanh^4(r_2x + r_3) - 2\alpha_1\Gamma E \tanh^3(r_2x + r_3) - [2\alpha_1\Gamma\Theta + 2\Gamma T_0 + \alpha_1 E^2] \tanh^2(r_2x + r_3) \\
&\quad - (2\alpha_1\Theta E + 2\alpha_1 E T_0) \tanh(r_2x + r_3) - (\alpha_1\Theta + \alpha_1 T_0)^2 + \alpha_2\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + \alpha_2E \tanh(r_2x + r_3) \\
&\quad + \alpha_2(\Theta + T_0) + \alpha_3\} \{\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta\} dx
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta L &= \int_0^{L_0} \{-\alpha_1\Gamma^2 \tanh^4(r_2x + r_3) [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta] \\
&\quad - 2\alpha_1\Gamma E \tanh^3(r_2x + r_3) [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta] \\
&\quad - [2\alpha_1\Gamma\Theta + 2\Gamma T_0 + \alpha_1 E^2] \tanh^2(r_2x + r_3) [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta] \\
&\quad - (2\alpha_1\Theta E + 2\alpha_1 E T_0) \tanh(r_2x + r_3) [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) \\
&\quad + \Theta] - (\alpha_1\Theta + \alpha_1 T_0)^2 [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta] \\
&\quad + \alpha_2\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta] \\
&\quad + \alpha_2E \tanh(r_2x + r_3) [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta] \\
&\quad + [\alpha_2(\Theta + T_0) + \alpha_3] [\Gamma \tanh^2(r_2x + r_3) + E \tanh(r_2x + r_3) + \Theta]\} dx
\end{aligned}$$

$\Delta L$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{L_0} \left\{ -\frac{\alpha_1\Gamma^3}{P_6} \tanh^6(r_2x + r_3) - \left( \frac{3\alpha_1\Gamma^2 E}{P_5} \right) \tanh^5(r_2x + r_3) \right. \\
&\quad - \frac{(4\alpha_1\Gamma E^2 + 3\alpha_1\Gamma^2\Theta + 2\alpha_1\Theta E\Gamma + 2\Gamma\alpha_1 E T_0 + \alpha_2\Gamma^2\alpha_1\Theta^2 + \alpha_2\Gamma^2\alpha_1 T_0\Theta)}{P_4} \tanh^4(r_2x + r_3) \\
&\quad - \frac{(4\Theta\alpha_1\Gamma E + 2E\Gamma T_0 + \alpha_1 E^3 - 2\alpha_2\Gamma E)}{P_3} \tanh^3(r_2x + r_3) \\
&\quad - \left[ \frac{2\alpha_1\Gamma\Theta^2 + 2\Theta\Gamma T_0 + 3\alpha_1\Theta E^2 + 2\alpha_1 E^2 T_0 + \Gamma\alpha_1^2(\Theta^2 + 2\Theta T_0 + T_0^2) - \alpha_2\Gamma\Theta - \alpha_2 E^2 - \Gamma\alpha_2\Theta - \Gamma\alpha_2 T_0 - \Gamma\alpha_3}{P_2} \right] \tanh^2(r_2x + r_3) \\
&\quad \left. - \left( \frac{E\alpha_1\Theta + E\alpha_1 T_0 + 2\alpha_1\Theta^2 E + 2\Theta\alpha_1 E T_0 - \alpha_2 E\Theta - E\alpha_2\Theta - E\alpha_2 T_0 - E\alpha_3}{P_1} \right) \tanh(r_2x + r_3) + \left( \frac{\Theta\alpha_2\Theta + \Theta\alpha_2 T_0 + \Theta\alpha_3}{P_0} \right) \right\} dx
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta L &= \int_0^{L_0} \{-P_6 \tanh^6(r_2x + r_3) - P_5 \tanh^5(r_2x + r_3) - P_4 \tanh^4(r_2x + r_3) - P_3 \tanh^3(r_2x + r_3) - P_2 \tanh^2(r_2x + r_3) \\
&\quad - P_1 \tanh(r_2x + r_3) + P_0\} dx
\end{aligned}$$

Da tabela de integral, é possível escrever

$$\int \tanh(ax+b)dx = \frac{\ln[\cosh(ax+b)]}{a}, \int \tanh^2(ax+b)dx = x - \frac{\tanh(ax+b)}{a}, \int \tanh^3(ax+b)dx = \frac{\operatorname{sech}^2(ax+b) + 2\ln[\cosh(ax+b)]}{2a}$$

$$\int \tanh^4(ax+b)dx = \frac{\tanh(ax+b)[\operatorname{sech}^2(ax+b) - 4]}{3a}, \int \tanh^5(ax+b)dx = \frac{-\operatorname{sech}^4(ax+b) + 4\operatorname{sech}^2(ax+b) + 4\ln(\cosh(ax+b))}{4a}$$

$$\int \tanh^6(ax+b)dx = \frac{11 \tanh(ax+b) \operatorname{sech}^2(ax+b) - 23 \tanh(ax+b)}{15a} - \frac{\tanh(ax+b) \operatorname{sech}^4(ax+b)}{5a} + x$$

Assim, é possível escrever que

$$\begin{aligned} \Delta L = & -P_6 \left[ \frac{11 \tanh(ax+b) \operatorname{sech}^2(ax+b) - 23 \tanh(ax+b)}{15a} - \frac{\tanh(ax+b) \operatorname{sech}^4(ax+b)}{5a} + x \right]_0^{L_0} \\ & - P_5 \left[ \frac{-\operatorname{sech}^4(ax+b) + 4\operatorname{sech}^2(ax+b) + 4\ln(\cosh(ax+b))}{4a} \right]_0^{L_0} \\ & - P_4 \left[ \frac{\tanh(ax+b)[\operatorname{sech}^2(ax+b) - 4]}{3a} \right]_0^{L_0} - P_3 \left[ \frac{\operatorname{sech}^2(ax+b) + 2\ln[\cosh(ax+b)]}{2a} \right]_0^{L_0} \\ & - P_2 \left[ x - \frac{\tanh(ax+b)}{a} \right]_0^{L_0} - P_1 \left[ \frac{\ln[\cosh(ax+b)]}{a} \right]_0^{L_0} + P_0 L_0 \end{aligned}$$

Finalmente

$$\begin{aligned} \Delta L = & -P_6 \left\{ \tanh(aL_0+b) \left( \frac{11 \operatorname{sech}^2(aL_0+b) - 23}{15a} - \frac{\operatorname{sech}^4(aL_0+b)}{5a} + x \right) - \tanh(b) \left( \frac{11 \operatorname{sech}^2(b) - 23}{15a} - \frac{\operatorname{sech}^4(b)}{5a} + x \right) \right\} \\ & - P_5 \left[ \left( \frac{-\operatorname{sech}^4(aL_0+b) + 4\operatorname{sech}^2(aL_0+b) + 4\ln(\cosh(aL_0+b))}{4a} \right) \right. \\ & \left. - \left( \frac{-\operatorname{sech}^4(b) + 4\operatorname{sech}^2(b) + 4\ln(\cosh(b))}{4a} \right) \right] \\ & - P_4 \left[ \left( \frac{\tanh(aL_0+b)[\operatorname{sech}^2(aL_0+b) - 4]}{3a} \right) - \left( \frac{\tanh(b)[\operatorname{sech}^2(b) - 4]}{3a} \right) \right] \\ & - P_3 \left[ \left( \frac{\operatorname{sech}^2(aL_0+b) + 2\ln[\cosh(aL_0+b)]}{2a} \right) - \left( \frac{\operatorname{sech}^2(b) + 2\ln[\cosh(b)]}{2a} \right) \right] \\ & - P_2 \left[ \left( L_0 - \frac{\tanh(aL_0+b)}{a} \right) - \left( \frac{\tanh(b)}{a} \right) \right] - P_1 \left[ \left( \frac{\ln[\cosh(aL_0+b)]}{a} \right) - \left( \frac{\ln[\cosh(b)]}{a} \right) \right] + P_0 L_0 \end{aligned}$$

## APÊNDICE F Solução numérica para conjunto 1 usando

### Maple

$$T := f_0 + f_1 \cdot \text{phi} + f_2 \cdot \text{phi}^2;$$

$$\text{rho} := m \cdot (1 + n \cdot (T - 273));$$

$$m(1 + n(f_2 \phi^2 + f_1 \phi + f_0 - 273))$$

$$q := \text{rho}_0 \cdot \text{int}\left(\frac{1}{\text{rho}}, \text{phi}\right);$$

$$\frac{2 \text{rho}_0 \arctan\left(\frac{2f_2 n \phi + f_1 n}{\sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n}}\right)}{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n}}$$

$$\text{sys} := a \cdot x + b = q;$$

$$ax + b = \frac{2 \text{rho}_0 \arctan\left(\frac{2f_2 n \phi + f_1 n}{\sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n}}\right)}{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n}}$$

$$\text{aux} := \text{solve}(\text{sys}, \{\text{phi}\});$$

$$\left\{ \phi \right. \\ \left. = \frac{1}{2} \frac{1}{f_2 n} \left( \tan\left( \frac{1}{2} \frac{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n} (ax + b)}{\text{rho}_0} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n} - f_1 n \right) \right\}$$

$$\text{assign}(\text{aux}[1]);$$

phi

$$\frac{1}{2} \frac{1}{f_2 n} \left( \tan\left( \frac{1}{2} \frac{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n} (ax + b)}{\text{rho}_0} \right) \right. \\ \left. \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092f_2 n^2 + 4f_2 n} - f_1 n \right)$$

$$\text{phi} := \text{unapply}(\text{phi}, x);$$

$x$

$$\rightarrow \frac{1}{2} \frac{1}{f_2 n} \left( \tan \left( \frac{1}{2} \frac{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n} (ax + b)}{\rho_0} \right) \right. \\ \left. \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n} - f_1 n \right)$$

$resposta := solve(phi(0) = 0, \{b\});$

$$\left\{ b = \frac{2 \arctan \left( \frac{f_1 n}{\sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n}} \right) \rho_0}{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n}} \right\}$$

$assign(resposta[1]);$

$phi := x$

$$\rightarrow \frac{1}{2} \frac{1}{f_2 n} \left( \tan \left( \frac{1}{2} \frac{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n} (ax + b)}{\rho_0} \right) \right. \\ \left. \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n} - f_1 n \right);$$

$subs(b = b, phi(x));$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{f_2 n} \left( \tan \left( \frac{1}{2} \frac{1}{\rho_0} \left( m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n} \left( ax \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left. + \frac{2 \arctan \left( \frac{f_1 n}{\sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n}} \right) \rho_0}{m \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n}} \right) \right) \right) \right) \\ \left. \sqrt{4f_0 f_2 n^2 - f_1^2 n^2 - 1092 f_2 n^2 + 4f_2 n} - f_1 n \right)$$

$phi(x);$



$T := \text{subs}(\text{phi} = \text{phi}(x), T);$

$\text{alpha} := (-4\text{e-}12) \cdot T^2 + (8\text{e-}9) \cdot T + 4\text{e-}7;$

$\text{aux} := \text{alpha} \cdot (T - 293);$

$\text{sol} := \text{int}(\text{aux}, x);$

$x := L;$

$\text{sol1} := \text{sol};$

$x := 0;$

$\text{sol2} := \text{sol};$

$\text{deltaL} := (\text{sol1} - \text{sol2});$

$f\_0 := 293$

$f\_1 := 0.0104926616353033 + 61.2220089038499 \cdot U - 0.0311567961195442 \cdot U^2$   
 $+ 0.713783637796191 \cdot U^3 - 0.0298199407347699 \cdot U^4;$

$f\_2 := -61.26747 + 0.0965093340597409 \cdot U - 0.777672403083163 \cdot U^2$   
 $+ 0.0380662286681078 \cdot U^3 - 4.06107385512006\text{E-}4 \cdot U^4;$

$m := 5.1\text{e-}5;$

$n := 3\text{e-}3;$

$L := 300\text{e-}6;$

$\text{rho}_0 := 5.1\text{e-}5;$

$b := 8\text{e-}6;$

$\text{theta} := \frac{10 \cdot 3.14159265359}{180};$

$f\_theta := \frac{\sin(\text{theta})}{\sin^2(\text{theta}) + \left(\frac{\cos(\text{theta}) \cdot b}{L}\right)^2};$

**for i from 0.5 by 0.5 to 10 do  $\frac{\text{deltaL}(i) \cdot f\_theta}{1\text{e-}6}$  do;**

0.01043088201

0.04274293060

0.09999485054

0.1871993926	1.774666048	4.117839920
0.3111849670	2.268182379	3.565867723
0.4802679518	2.806648513	2.206502862
0.7036054547	3.349462429	-0.2942322926
0.9900658189	3.827738296	-4.314027180
1.346423945	4.135091931	

### APÊNDICE G Solução analítica para conjunto 3

Alguns comentários devem ser feitos: O potencial elétrico auxiliar é a limitação da metodologia proposta neste trabalho; Se um ajuste polinomial maior fosse escolhido, não seria possível encontrar uma solução aplicável da coordenada de transformação para a temperatura; Um ajuste polinomial quadrático foi escolhido no ajuste de temperatura porque gerou uma solução disponível para o melhor ajuste polinomial possível.

#### Dispositivo MAET em forma de V para parâmetros constantes

Partimos da mesma equação, mas com a condutividade térmica e constante de resistividade elétrica.

$$\begin{cases} 2u = \eta - (\phi - v)^2 \\ u = \kappa_0 \rho_0 T \end{cases}$$

$$u(T_0) = u_0 = \kappa_0 \rho_0 T_0$$

For  $\phi = 0 \rightarrow T = T_0$  and  $\phi = U \rightarrow T = T_0$ .

$$\begin{cases} 2u_0 = \eta - v^2 \\ 2u_0 = \eta - (U - v)^2 \end{cases},$$

$$v^2 = (U - v)^2 \rightarrow v = \frac{U}{2}$$

$$2u_0 = \eta - \left(U - \frac{U}{2}\right)^2$$

$$2\kappa_0\rho_0T_0 + \left(\frac{U}{2}\right)^2 = \eta$$

$$2(\kappa_0\rho_0T) = 2\kappa_0\rho_0T_0 + \left(\frac{U}{2}\right)^2 - \left(\phi - \frac{U}{2}\right)^2$$

$$\boxed{T = T_0 + \frac{1}{2\kappa_0\rho_0} \left[ \left(\frac{U}{2}\right)^2 - \left(\phi - \frac{U}{2}\right)^2 \right]}$$

O potencial elétrico auxiliar retornará  $\phi = ax + b$ . Se  $\phi(0) = 0$  e  $\phi(2L_0) = U$  o potencial elétrico dependente da posição será a seguinte equação, que é

$$\boxed{\phi(x) = \frac{U}{2L_0}x}$$

Eles, a posição de temperatura dependente será

$$\boxed{T = T_0 + \frac{1}{8\kappa_0\rho_0} U^2 \left[ 1 - \left(\frac{x}{L_0} - 1\right)^2 \right]}$$

O deslocamento para cada viga é dado por

$$\Delta L_{\kappa_0\rho_0} = \int \alpha_0 \Delta T(x) dx$$

$$\Delta L_{\kappa_0\rho_0} = \int_0^{L_0} \alpha_0 \frac{U^2}{8\kappa_0\rho_0} \left[ 1 - \left(\frac{x}{L_0} - 1\right)^2 \right] dx$$

$$\boxed{\Delta L_{\kappa_0\rho_0} = \frac{\alpha_0 L_0}{12\kappa_0\rho_0} U^2}$$

Se o silício possui propriedades constantes (como foi encontrado neste trabalho e será mostrado na próxima seção) é possível obter o conjunto de equações exibidas em (10), seguindo os mesmos passos do documento principal (equações (1) ) até (9)), com os parâmetros constantes da Tabela 2.2, onde o  $\Delta L_{\kappa_0\rho_0}$  é o deslocamento,  $m$  é o par de feixe inclinado,  $b_s$  é a largura da lançadeira e  $I$  é a corrente através do dispositivo. Mostrou-se com o conjunto de equações (10) um aumento de temperaturas à medida que a resistividade e a condutividade térmica diminuem. Também pode ser visto com o conjunto de equações

(10) que o potencial elétrico tem uma dependência de posição de feixe linear ( $x$ ) quando as propriedades físicas do dispositivo MAET são independentes da temperatura.

$$\left\{ \begin{array}{l} T(\phi) = T_0 + \frac{1}{2\rho_0\kappa_0} \left[ \frac{U^2}{4} - \left( \phi - \frac{U}{2} \right)^2 \right] \quad (a) \\ \phi(x) = \frac{U}{2L_0} x \quad (b) \\ T(x) = T_0 + \frac{U^2}{8\kappa_0\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right] \quad (c) \\ \Delta L_\theta = f(\theta) \Delta L_{\kappa_0\rho_0} = f(\theta) \left[ \frac{\alpha_0 L_0}{12\kappa_0\rho_0} U^2 \right] \quad (d) \\ I = U \frac{mbh}{\rho_0(2L_0 + b_s)} \quad (e) \end{array} \right. \quad (10)$$

## APÊNDICE H Solução analítica para conjunto 3 com Maple

$$\rho := \rho_0; \quad \kappa := \kappa_0;$$

$$u := \text{int}(\rho \cdot \kappa, T);$$

$$u0 := \text{eval}(u, T = T0);$$

$$v := \frac{U}{2}; \quad \eta := 2 \cdot u0 + v^2;$$

$$eq := \eta - (\phi - \text{nu})^2 = 2 \cdot u;$$

$$\frac{1}{4} U^2 + 2\rho_0\kappa_0 T0 - \left( \phi - \frac{1}{2} U \right)^2 = 2\rho_0\kappa_0 T$$

$$\text{solve}(eq, [T]);$$

$$\left[ \left[ T = \frac{1}{2} \frac{2\rho_0 T0 \kappa_0 + U\phi - \phi^2}{\rho_0 \kappa_0} \right] \right]$$

$$T := \frac{1}{2} \frac{2\rho_0 T0 \kappa_0 + U\phi - \phi^2}{\rho_0 \kappa_0};$$

$$q := \rho_0 \cdot \text{int} \left( \frac{1}{\rho}, \phi \right);$$

$$\text{sys} := a \cdot x + b = q;$$

$$\text{aux} := \text{solve}(\text{sys}, \{\phi\});$$

$$\{\phi = ax + b\}$$

$assign(aux[1]);$

$\phi := unapply(\phi, x);$

$x \rightarrow ax + b$

$b := 0$

$\phi(L);$

$aL$

$resposta\_2 := solve(\phi(2 \cdot L) = U, \{a\});$

$$\left\{a = \frac{1}{2} \frac{U}{L}\right\}$$

$assign(resposta\_2);$

$subs(a = a, \phi(x));$

$$\frac{1}{2} \frac{Ux}{L}$$

$T := subs(\phi = \phi(x), T);$

$$\frac{1}{2} \frac{2\rho\_0 \kappa\_0 T_0 + \frac{1}{2} \frac{U^2 x}{L} - \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L^2}}{\rho\_0 \kappa\_0}$$

$\alpha := \alpha\_0;$

$aux := \alpha \cdot (T - T_0);$

$$\alpha\_0 \left( \frac{1}{2} \frac{2\rho\_0 \kappa\_0 T_0 + \frac{1}{2} \frac{U^2 x}{L} - \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L^2}}{\rho\_0 \kappa\_0} - T_0 \right)$$

$sol := int(aux, x);$

$$\alpha\_0 \left( \frac{1}{2} \frac{2\rho\_0 \kappa\_0 T_0 x + \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L} - \frac{1}{12} \frac{U^2 x^3}{L^2}}{\rho\_0 \kappa\_0} - T_0 x \right)$$

$x := L;$

$sol1 := sol;$

$$\alpha_0 \left( \frac{1}{2} \frac{2\rho_0 \kappa_0 T0L + \frac{1}{6} U^2 L}{\rho_0 \kappa_0} - T0L \right)$$

$x := 0;$

$sol2 := sol;$

$deltaL := (sol1 - sol2);$

$$\alpha_0 \left( \frac{1}{2} \frac{2\rho_0 \kappa_0 T0L + \frac{1}{6} U^2 L}{\rho_0 \kappa_0} - T0L \right)$$

$T0 := 293;$

$\rho_0 := 9.93e-5;$

$\kappa_0 := 130;$

$b := 8e-6;$

$L := 300E-6;$

$\alpha_0 := 2.6E-6;$

$h := 5E-6;$

$deltaL := unapply(deltaL, U);$

$$U \rightarrow -1.30 \cdot 10^{-16} + 5.035246726 \cdot 10^{-9} U^2$$

$$theta := \frac{10 \cdot 3.14159265359}{180};$$

$$f\_theta := \frac{\sin(theta)}{\sin^2(theta) + \left( \frac{\cos(theta) \cdot b}{L} \right)^2};$$

5.630002319

**for**  $i$  **from** 0.5 **by** 0.5 **to** 10 **do**  $\frac{deltaL(i) \cdot f\_theta}{1e-6}$  **do**;

0.007087111957

0.06378401342

0.1771778164

0.02834845001

0.1133938022

0.2551360559

0.3472685209	1.020544226	2.048175566
0.4535752112	1.197722044	2.296224510
0.5740561270	1.389074086	2.558447679
0.7087112683	1.594600354	2.834845074
0.8575406347	1.814300847	

$$current := U \rightarrow \frac{U}{\rho_0} \cdot \frac{10 \cdot b \cdot h}{2 \cdot L + 2E-6};$$

**for** U **from** 0.5 **by** 0.5 **to** 10 **do** current(U) **do**;

0.003345678889	0.02676543111	0.05018518332
0.006691357777	0.03011111000	0.05353086221
0.01003703666	0.03345678889	0.05687654110
0.01338271555	0.03680246777	0.06022222000
0.01672839444	0.04014814666	0.06356789889
0.02007407332	0.04349382555	0.06691357777
0.02341975223	0.04683950444	

## APÊNDICE I Solução analítica para conjunto 2

No entanto, Pantano e colaboradores consideram os parâmetros constantes  $\rho_0$  e  $\kappa_0$  e uma dependência de temperatura para o coeficiente de expansão térmica ( $\alpha = f(T)$ ), enquanto que Zhu e colaboradores consideram esta dependência de temperatura para todos os parâmetros  $\rho(T)$ ,  $\kappa(T)$  e  $\alpha(T)$ . Para gerar os resultados teóricos, é necessário usar (10c) na integral (8) com  $\alpha(T)$  (parâmetro Pantano na Tabela 2.2) e inserir o resultado no fator de inclinação (9). Abaixo mostra-se a decomposição do cálculo, mas o resultado pode ser encontrado no documento principal na Fig. 5. Usando as propriedades físicas usadas por Pantano, a equação será  $\Delta L_{\kappa_0 \rho_0} = \int \alpha(x) \Delta T(x) dx$ . A função do coeficiente de expansão térmica é a mesma para a abordagem constante, mas com dependência térmica na expansão térmica. A função de coeficiente de expansão térmica é:

$$\alpha(T) = \frac{3.725 \times 10^{-6}}{A_1} \left\{ 1 - \exp \left[ 1 - \frac{5.88 \times 10^{-3}}{A_2} \left( T - \frac{124}{A_3} \right) \right] \right\} + \frac{5.548 \times 10^{-10}}{A_4} T \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha(T) = A_1 \{ 1 - e^{1-A_2(T-A_3)} \} + A_4 T$$

Substituindo em integral de deslocamento

$$\Delta L_{\alpha(T)} = \int_0^{L_0} (A_1 - A_1 e^{1-A_2(T-A_3)} + A_4 T) (\Delta T) dx$$

$$\Delta L_{\alpha(T)} = \int_0^{L_0} (A_1 \Delta T - A_1 e^{1-A_2(T-A_3)} \Delta T + A_4 T \Delta T) dx$$

$$\Delta L_{\alpha(T)} = \int_0^{L_0} A_1 (\Delta T) dx - \int_0^{L_0} A_1 e^{1-A_2(T-A_3)} (\Delta T) dx + \int_0^{L_0} A_4 T (\Delta T) dx$$

$$\Delta L_{\alpha(T)} = A_1 \int_0^{L_0} (\Delta T) dx - A_1 \int_0^{L_0} e^{1-A_2(T-A_3)} (\Delta T) dx + A_4 \int_0^{L_0} (\Delta T + T_0) (\Delta T) dx$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{\alpha(T)} &= A_1 \int_0^{L_0} (\Delta T) dx - A_1 \int_0^{L_0} e^{1-A_2[(\Delta T+T_0)-A_3]} (\Delta T) dx \\ &\quad + A_4 \left[ \int_0^{L_0} (\Delta T)^2 dx + \int_0^{L_0} T_0 \Delta T dx \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{\alpha(T)} &= A_1 \int_0^{L_0} (\Delta T) dx - A_1 \int_0^{L_0} e^{1-A_2 \Delta T - A_2 T_0 + A_2 A_3} (\Delta T) dx + A_4 \int_0^{L_0} (\Delta T)^2 dx \\ &\quad + A_4 T_0 \int_0^{L_0} \Delta T dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta L_{\alpha(T)} &= (A_1 + A_4 T_0) \underbrace{\int_0^{L_0} (\Delta T) dx}_{I_1} + A_4 \underbrace{\int_0^{L_0} (\Delta T)^2 dx}_{I_2} \\ &\quad - A_1 e^{1-A_2 T_0 + A_2 A_3} \underbrace{\int_0^{L_0} e^{-A_2 \Delta T} (\Delta T) dx}_{I_3} \end{aligned}$$

$$I_1 = \int_0^{L_0} (\Delta T) dx$$

$$I_1 = \int_0^{L_0} \left\{ \frac{1}{8 \kappa_0 \rho_0} U^2 \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right] \right\} dx$$

$$I_1 = \frac{U^2}{12\kappa_0\rho_0} L_0$$

$$I_2 = \int_0^{L_0} (\Delta T)^2 dx$$

$$I_2 = \int_0^{L_0} \left( \frac{1}{8\kappa_0\rho_0} U^2 \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right]^2 dx$$

$$I_2 = \frac{1}{64\kappa_0^2\rho_0^2} U^4 \int_0^{L_0} \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right]^2 dx$$

$$I_2 = \frac{1}{64\kappa_0^2\rho_0^2} U^4 \left\{ \underbrace{\int_0^{L_0} dx}_{L_0} - 2 \underbrace{\int_0^{L_0} \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 dx}_{L_0/3} + \underbrace{\int_0^{L_0} \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^4 dx}_{L_0/5} \right\}$$

$$I_2 = \frac{L_0}{120\kappa_0^2\rho_0^2} U^4$$

$$I_3 = \int_0^{L_0} e^{-A_2\Delta T} (\Delta T) dx$$

$$I_3 = \int_0^{L_0} e^{-\frac{A_2 U^2}{8\kappa_0\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right]} \left\{ \frac{U^2}{\frac{8\kappa_0\rho_0}{\xi/A_2}} \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right] \right\} dx$$

$$I_3 = \frac{\xi}{A_2} \int_0^{L_0} \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right] e^{-\xi \left[ 1 - \left( \frac{x}{L_0} - 1 \right)^2 \right]} dx$$

$$I_3 = \frac{\xi L_0}{A_2} \int_{-1}^0 (1 - u^2) e^{-\xi(1-u^2)} dx$$

$$I_3 = \frac{\xi L_0}{A_2} \left[ \sqrt{\pi} \frac{e^{-\xi}(2\xi + 1) \operatorname{erf}(\sqrt{\xi})}{4\xi^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{2\xi} \right]$$

Ou usando a expansão em série da integral em  $\xi = 0$ ,

$$\operatorname{erf}(\sqrt{\xi}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( 2\xi^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3}\xi^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{5}\xi^{\frac{5}{2}} + \frac{1}{21}\xi^{\frac{7}{2}} + \frac{1}{108}\xi^{\frac{9}{2}} + \frac{1}{660}\xi^{\frac{11}{2}} + \frac{1}{4680}\xi^{\frac{13}{2}} \right)$$

Essa aproximação é possível porque  $\xi = \frac{A_2}{8 \kappa_0 \rho_0} U^2 = \frac{5.88 \times 10^{-3}}{8 \times 130 \times 10^{-4}} U^2 \approx 0.057 U^2$ .  $\xi(1) = 0.057 U^2 = 0.057$  e  $\xi(10) = 0.057 U^2 = 5.7$ .

$$I_3 = \frac{\xi L_0}{A_2} \left[ -\frac{1}{2\xi} + \sqrt{\pi} \frac{e^{-\xi}(2\xi + 1) \operatorname{erf}(\sqrt{\xi})}{4 \xi^{\frac{3}{2}}} \right]$$

$$I_3 = \frac{\xi L_0}{A_2} \left[ -\frac{1}{2\xi} + \sqrt{\pi} \frac{e^{-\xi}(2\xi + 1)}{4 \xi^{\frac{3}{2}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( 2\xi^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3}\xi^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{5}\xi^{\frac{5}{2}} + \frac{1}{21}\xi^{\frac{7}{2}} + \frac{1}{108}\xi^{\frac{9}{2}} + \frac{1}{660}\xi^{\frac{11}{2}} + \frac{1}{4680}\xi^{\frac{13}{2}} + o(\xi^7) \right) \right]$$

$$I_3 = \frac{\xi L_0}{A_2} \left[ -\frac{1}{2\xi} + \frac{e^{-\xi}(2\xi + 1)}{4 \xi} \left( 2 + \frac{2}{3}\xi + \frac{1}{5}\xi^2 + \frac{1}{21}\xi^3 + \frac{1}{108}\xi^4 + \frac{1}{660}\xi^5 + \frac{1}{4680}\xi^6 \right) \right]$$

Voltando à equação inicial de deslocamento:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\alpha(T)} = & (A_1 + A_4 T_0) \left[ \frac{U^2}{12 \kappa_0 \rho_0} L_0 \right] + A_4 \left[ \frac{L_0}{120 \kappa_0^2 \rho_0^2} U^4 \right] \\ & - \frac{\xi L_0 A_1}{A_2} e^{(1-A_2 T_0 + A_2 A_3)} \left[ -\frac{1}{2\xi} \right. \\ & \left. + \frac{e^{-\xi}(2\xi + 1)}{4 \xi} \left( 2 + \frac{2\xi}{3} + \frac{\xi^2}{5} + \frac{\xi^3}{21} + \frac{\xi^4}{108} + \frac{\xi^5}{660} + \frac{\xi^6}{4680} \right) \right] \end{aligned}$$

aonde  $\xi = \frac{A_2 U^2}{8 \kappa_0 \rho_0}$

## APÊNDICE J Solução analítica para conjunto 2 usando Maple

alpha := (3.725E-6) · (1 - exp(1 - (5.88E-3) · (T - 124))) + (5.548E-10) · T;

$$0.000003725 - 0.000003725 e^{1.72912 - \frac{0.002940000000 \left( 2 \rho_0 \kappa_0 T_0 + \frac{1}{2} \frac{U^2 x}{L} - \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L^2} \right)}{\rho_0 \kappa_0}}$$

$$+ \frac{2.774000000 \cdot 10^{-10} \left( 2 \rho_0 \kappa_0 T_0 + \frac{1}{2} \frac{U^2 x}{L} - \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L^2} \right)}{\rho_0 \kappa_0}$$

$$\text{aux} := \alpha \cdot (T - T_0);$$

$$\left( \begin{array}{l} 0.000003725 \\ - 0.000003725 e^{1.72912 - \frac{0.002940000000 \left( 2 \rho_0 \kappa_0 T_0 + \frac{1}{2} \frac{U^2 x}{L} - \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L^2} \right)}{\rho_0 \kappa_0}} \\ + \frac{2.774000000 \cdot 10^{-10} \left( 2 \rho_0 \kappa_0 T_0 + \frac{1}{2} \frac{U^2 x}{L} - \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L^2} \right)}{\rho_0 \kappa_0} \end{array} \right)$$

$$\left( \frac{1}{2} \frac{2 \rho_0 \kappa_0 T_0 + \frac{1}{2} \frac{U^2 x}{L} - \frac{1}{4} \frac{U^2 x^2}{L^2}}{\rho_0 \kappa_0} - T_0 \right)$$

$$\text{sol} := \text{int}(\text{aux}, x);$$

$$\text{simplify}(\text{sol});$$

$$x := L;$$

$$\text{sol1} := \text{sol};$$

$$x := 0;$$

$$\text{sol2} := \text{sol};$$

$$\text{deltaL} := (\text{sol1} - \text{sol2});$$

$$T_0 := 293;$$

$$\rho_0 := 9.9\text{e}-5;$$

$$\kappa_0 := 130;$$

$$b := 8\text{e}-6;$$

$$L := 300\text{E}-6;$$

$h := 5E-6;$

$\text{deltaL} := \text{unapply}(\text{deltaL}, U);$

**for**  $i$  **from** 0.5 **by** 0.5 **to** 10 **do**  $\frac{\text{deltaL}(i) \cdot f_{\theta}}{1e-6}$  **do;**

0.0004995737518	0.3699475712	2.301380070
0.003396129436	0.5398352724	2.702909169
0.01264008373	0.7475975328	3.132755468
0.03406061548	0.9922731249	3.591362891
0.07441201821	1.272035149	4.079697762
0.1403453500	1.584733351	4.599116735
0.2375108718	1.928359982	

**for**  $U$  **from** 0.5 **by** 0.5 **to** 10 **do**  $\text{current}(U)$  **do;**

0.003156565656	0.02525252525	0.04734848484
0.006313131312	0.02840909091	0.05050505050
0.009469696970	0.03156565656	0.05366161616
0.01262626263	0.03472222222	0.05681818181
0.01578282828	0.03787878788	0.05997474747
0.01893939394	0.04103535353	0.06313131312
0.02209595959	0.04419191919	