



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM NANOCIÊNCIA E NANOBIOTECNOLOGIA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
ESTRUTURAIS E MAGNÉTICAS DE FILMES FINOS DE SNO_2 DOPADOS
COM O ELEMENTO FERRO PARA A APLICAÇÃO COMO SENSORES DO
GÁS METANO**

Brasília - DF

2017

NATÁLIA CAROLINA SILVA GOMES

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
ESTRUTURAIS E MAGNÉTICAS DE FILMES FINOS DE SnO_2 DOPADOS
COM O ELEMENTO FERRO PARA A APLICAÇÃO COMO SENSORES DO
GÁS METANO**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Nanociência e Nanobiotecnologia da Universidade de Brasília – UnB, como pré-requisito para a obtenção do grau de Mestre, sob orientação do Prof. Dr. José Antônio Huamaní Coaquira e co-orientação do Dr. Fermin Fidel Herrera Aragón.

Brasília – DF

2017

NATÁLIA CAROLINA SILVA GOMES

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES
ESTRUTURAIS E MAGNÉTICAS DE FILMES FINOS DE SnO_2 DOPADOS
COM O ELEMENTO FERRO PARA A APLICAÇÃO COMO SENSORES DO
GÁS METANO**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Nanociência e Nanobiotecnologia da Universidade de Brasília – UnB, como pré-requisito para a obtenção do grau de Mestre, sob orientação do Prof. Dr. José Antônio Huamaní Coaquira e co-orientação do Dr. Fermin Fidel Herrera Aragón.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Antônio Huamaní Coaquira
Universidade de Brasília - UnB

Prof^ª. Dr^a. Maria Sílvia Carvalho Barbosa
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Prof. Dr. John Carlos Mantilla Ochoa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Aprovada em: 28 de julho de 2017.

*Dedico este trabalho ao meu pai,
pelo apoio imprescindível em todos os momentos...
Mas, principalmente, por me mostrar, durante toda a
vida, que não há obstáculo que não possa ser superado
com fé, força, resiliência, dedicação, dignidade e
determinação..!*

AGRADECIMENTOS

“... Não deixe que a rotina acomode, que o medo impeça de tentar. Desconfie do destino e acredite em você. Gaste mais horas realizando que sonhando, fazendo que planejando, vivendo que esperando, porque embora quem quase morre esteja vivo, quem quase vive, já morreu.” (Sarah Westphal).

A cada pessoa que me permite viver por completo, alcançar o “inalcançável” e tornar o medo e as dificuldades insignificantes perante os meus ideais, a minha gratidão: minha chegada até aqui, com tantas vitórias e aprendizados, não teria sido possível não fosse a ajuda, o apoio, os conselhos e ensinamentos, a compreensão e o carinho de cada uma! Em especial, agradeço:

Aos meus pais, por todo o amparo.

Ao meu irmão Cristiano e à Samy, por toda a ajuda que me concederam, sem a qual a realização deste trabalho não seria possível.

Ao André, pelo carinho, compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos, sempre presentes e solidários, sobretudo à Maíra, Diego e Jordânia; por terem me impulsionado a fazer o mestrado.

À Tamiris, Simone e Mara, pelas significativas amizades iniciadas no mestrado.

Ao meu orientador, Dr. José Antônio Coaquira, pela oportunidade em fazer este trabalho e pelos ensinamentos na realização do mesmo.

Ao meu co-orientador, Dr. Fermin Aragón, pelo amor à ciência: obrigada pelo conhecimento transmitido, pela paciência e por toda a ajuda no decorrer do trabalho.

Aos professores Dr. John Mantilla e Dr^a. Maria Sílvia Barbosa por terem aceito o convite para compor a banca e pelas valiosas contribuições.

Aos colegas da Física e da Nano, pelo companheirismo e por cada contribuição dada a este trabalho.

Aos funcionários dos laboratórios, pelas medições realizadas.

“... Todo gesto generoso, todo oferecimento de ajuda, ainda nas coisas mais simples, cultiva a simpatia e desperta saudáveis reações de amizade e sinceridade.”(Carlos Bernardo González Pecotche).

Muito obrigada!

Manifesto ainda, o meu agradecimento à Deus, pelo dom da vida!

“A gratidão é o sentimento que mais aproxima o homem de Deus.” (Miguel de Cervantes).

“Desvios e rodeios pequenos e esquisitos fazem parte da formação de um indivíduo.

Suprimí-los todos e seguir o relógio, o calendário e o credo até que o indivíduo se perca no cinzento neutro da multidão, é ser muito pouco fiel à nossa herança.

A vida, essa qualidade esplêndida da vida, não se consegue seguindo as regras de outro homem.

É verdade que temos as mesmas fomes e as mesmas sedes, mas são fomes e sedes por coisas diferentes, de maneiras diferentes e em diferentes épocas.

Estabeleça o seu próprio dia.

Siga-o até o meridiano, até o seu próprio meridiano.

Ou então você se sentará em um salão exterior ouvindo a melodia, mas nunca chegando a uma altura suficiente para que você possa tocar a sua própria.”

Sylvia Nasar em “Uma Mente Brilhante”.

“... And there is no question that there is enough room on the head of a pin to put all of the Encyclopedia Britannica.”

Richard Feynman, *“There’s plenty of room at the bottom”*, 1959.

RESUMO

O gás natural é um hidrocarboneto proveniente da decomposição da matéria orgânica pela ação de bactérias anaeróbicas a grandes profundidades e altas temperaturas. É responsável por 20% da geração de energia mundial atualmente, o que prova a sua importância para o setor energético. O gás metano é o principal constituinte do gás natural, podendo chegar a representar até 97% da sua composição. Por ser um grande poluente e um dos gases que mais contribuem para o efeito estufa no planeta, o gás metano tem sido o assunto de muitos debates que envolvem riscos ao meio ambiente. Muitos desses riscos são relacionados às emissões fugitivas em gasodutos, os quais são tubulações que realizam o transporte de gás natural que parte da indústria petrolífera e chega aos clientes residenciais e industriais finais. Tais emissões caracterizam o principal tipo de emissão de gás natural gerada pela indústria petrolífera. Como o metano é um gás altamente inflamável, as emissões fugitivas de gás natural colocam em risco a vida das pessoas que trabalham na indústria do petróleo e que moram em regiões atravessadas pelos gasodutos. Por isso, nos últimos anos, a demanda por sensores de gás que consigam operar de forma mais eficiente, confiável e com menos custos para detectar emissões fugitivas de gás natural em gasodutos aumentou significativamente. Óxidos semicondutores de estanho atuam como uma importante e atraente base para classes de sensores de gás. Com isso, muitas pesquisas recentes têm abordado temas relacionados à melhoria de desempenho de sensores desse tipo, tais como: propriedades dos óxidos semicondutores, redução ao tamanho nanométrico dos óxidos semicondutores, dopagem de óxidos semicondutores com elementos químicos específicos, entres outros. A partir disso, neste trabalho, foram confeccionados cinco filmes finos de dióxido de estanho dopados com o elemento ferro em cinco diferentes concentrações estequiométricas e um filme fino de dióxido de estanho sem dopagem. O objetivo da confecção dos filmes finos foi aplicá-los como nanosensores do gás metano. Todos esses filmes finos foram depositados durante duas horas sobre substratos de vidro através do uso da técnica de pulverização catódica. Para a produção de cada um desses filmes, primeiramente, foram feitas seis ligas metálicas de Sn e Sn/Fe, usando um forno de arco. A liga composta somente por estanho foi utilizada para a fabricação do filme de SnO₂ não dopado, enquanto que as outras cinco ligas compostas por estanho e ferro foram usadas para a produção dos filmes de SnO₂ dopados com ferro. Além disso, foram realizadas caracterizações estruturais, óticas, morfológicas e magnéticas dos filmes através dos métodos de Difractometria de Raios-X, Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível, Microscopia Eletrônica de Varredura, Microscopia de Força Atômica e Medições Magnéticas. Tais métodos possibilitaram o estudo das propriedades dos filmes finos. Em seguida, foram feitos testes de sensores para o gás metano no interior de uma câmara fechada a uma temperatura de 200°C. Tais testes permitiram a medição da resistência elétrica de cada filme aplicado como nanosensor em função do tempo, na presença de uma mistura gasosa contendo gás metano e na presença do ar atmosférico. As caracterizações morfológicas evidenciaram a presença dos filmes finos depositados sobre os substratos de vidro. As caracterizações estruturais mostraram a formação de uma única fase correspondente à estrutura cristalina do dióxido de estanho. As caracterizações óticas permitiram encontrar o valor do *gap* de energia de cada filme fino, sendo que cada valor encontrado se aproximou do respectivo valor encontrado na literatura para o sólido cristalino de dióxido de estanho. As medições magnéticas mostraram a coexistência dos comportamentos paramagnéticos e ferromagnéticos nos filmes finos com dopagem de ferro. Os testes de sensores de gás permitiram verificar a influência da dopagem do ferro no desempenho dos nanosensores de dióxido de estanho. Os resultados dos testes indicaram que o filme fino de SnO₂ dopado com 5% de ferro teve uma melhora significativa na resposta como nanosensor do gás metano, em comparação aos outros filmes finos de SnO₂ produzidos, não dopados e dopados com ferro. Logo, é possível concluir que a dopagem com ferro a partir dessa concentração tem importante influência na melhoria do desempenho dos filmes finos de SnO₂ como nanosensores do gás metano.

Palavras-chave: nanotecnologia, nanosensor, gás metano, gás natural.

ABSTRACT

Natural gas is a hydrocarbon derived from the decomposition of organic matter by the action of anaerobic bacteria at great depths and high temperatures. It accounts for 20% of the global energy generation nowadays, a fact which proves its importance to the world's energy sector. Methane gas is the main constituent of natural gas and accounts for up to 97% of its composition. It has been the subject of many debates that involve risks to the environment because it is a major pollutant and one of the gases that most contribute to the greenhouse effect on the planet. Many of those risks are related to fugitive emissions from gas pipelines. These pipelines transport natural gas from the oil industry to residential and industrial final customers. Fugitive emissions of natural gas endanger the people's life who work in the oil industry and people who live in the regions crossed by pipelines. That is why the demand for gas sensors that can operate efficiently, reliably and with less cost to detect fugitive emissions from gas pipelines has significantly increased in the last years. Tin oxide semiconductors act as an important and attractive base for gas sensors. Then, many recent researches has been devoted to topics related to the performance improvement of this type of sensors such as: the semiconducting oxides properties, size reduction of semiconducting oxide to a nanometric scale, doping of semiconducting oxides with specific chemical elements, etc. In this work, six thin films of tin dioxide were deposited to test the methane gas sensing response. Five of these films were doped with iron at five different stoichiometric concentrations. The sixth film was an undoped sample. All these thin films were deposited on glass substrates during two hours using the sputtering technique. The purpose of making thin films was to apply them as methane gas nanosensors. The targets used for the films deposition were alloys of Sn/Fe with specific stoichiometry previously fabricated in an arc furnace. Pure tin was used for the fabrication of the undoped SnO₂ (intrinsic) film while the other five Sn/Fe alloys were used for the production of iron doped SnO₂ film. In addition, the structural, optical, morphological and magnetic characterization of the films were carried out using the following methods: X-ray Diffraction, Ultraviolet and Visible Spectrophotometry, Scanning Electron Microscopy, Atomic Force Microscopy and Magnetic Measurements. The study of thin films properties was based on the results of these methods. Subsequently, tests were performed using methane gas and thin films inside a closed chamber at a temperature of 200°C. These tests consist in measuring the electrical resistance of each film as a function of time in the presence of atmospheric air and the methane gas. The morphological characterization evidenced the presence of the films deposited on the glass substrates. The structural characterization showed the formation of a single phase corresponding to the tin dioxide crystalline structure. The optical characterization indicated the energy gap value of each thin film. These values found experimentally are close to the theoretical values for the tin dioxide crystalline solid. Magnetic measurements showed the coexistence of paramagnetic and ferromagnetic behavior in iron doped films. The gas sensor tests verified the influence of iron doping on tin dioxide nanosensors performance. The general results indicated the SnO₂ film doped with 5% iron had a significant improvement in the response to the methane gas in comparison to films with other Fe concentration (0% to 4%). Therefore, it is possible to conclude the 5% iron doping has an important influence on the performance of SnO₂ thin films as methane gas nanosensors.

Key words: nanotechnology, nanosensor, methane gas, natural gas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Representação dos estágios de transformação da matéria orgânica e dos hidrocarbonetos gerados em cada estágio 28
- Figura 2 - Representação esquemática das faixas de energias permitidas (bandas de condução e valência) e proibidas nos: (A) Condutor ou metal; (B) Isolante; (C) Semicondutor..... 32
- Figura 3 - Representação esquemática das bandas de condução, valência e proibida nos semicondutores intrínseco e extrínsecos, e dos níveis de energias permitidos dos semicondutores extrínsecos, E_d e E_a : (A) Intrínseco (B) Extrínseco tipo-n; (C) Extrínseco tipo-p 34
- Figura 4 - Esquema de fabricação de uma liga composta pelos elementos estanho e ferro, através da técnica de dopagem..... 35
- Figura 5 - Técnica de pulverização catódica: (A) Sistema de pulverização catódica dentro da câmara fechada, à vácuo, mostrando o cátodo, onde está fixado o alvo, o ânodo, com os substratos, sobre os quais os filmes serão depositados, o plasma, o gás, entrando na câmara, e o potencial elétrico (-V), aplicado no sistema; (B) Incidência de um íon, oriundo do gás, nos átomos da superfície do alvo e remoção de alguns destes átomos..... 36
- Figura 6 - Tipos de crescimento dos filmes finos, ilhas, camadas e ilhas em camadas ou Stranski-Krastanov, em um substrato, conforme as condições experimentais e as interações entre os íons do gás e os átomos da superfície do alvo 37
- Figura 7 - Curva de histerese dos materiais ferromagnéticos: (A) Força coerciva e magnetização remanente; (B) Parte inicial evidenciando o ponto R..... 41
- Figura 8 - Representação da magnetização (M) em função do campo magnético (H) aplicado, mostrando o comportamento das substância ferromagnéticas e paramagnéticas . 42
- Figura 9 - Representação esquemática dos mecanismos de resposta do sensor de SnO_2 na presença de um gás oxidante, o O_2 , e de um gás redutor (R) 46
- Figura 10 - Representação, em desenho, de um óxido semicondutor (produto) em duas situações distintas: (A) Semicondutor com uma camada compacta, mostrando um menor alcance do gás à sua superfície, resultando em uma menor interação entre o gás e o sensor; (B) Semicondutor com uma camada porosa, cuja porosidade aumenta o alcance do gás à sua superfície, promovendo uma maior interação entre o gás e o sensor..... 47
- Figura 11 - Mecanismos de condutância relacionados aos vários tamanhos de cristalitos e às características dos grãos de SnO_2 , relacionando as conexões intergranulares das partículas (neck widths ou largura do “pescoço”) e o comprimento de Debye (λ_D), estimado em aproximadamente 3 nanômetros. Abaixo de cada par de partícula, é listado, primeiramente, o modelo de resistência, abaixo, os mecanismos de condutância interpartículas e por último, regime de condutância do sensor. Onde “~” é o mesmo que aproximadamente, “<” representa “menor que” e “>” significa “bem maior que” 49

Figura 12 - Representação esquemática dos mecanismos de resposta do sensor de SnO ₂ dopado com um metal, na presença de um gás redutor (R), segundo os mecanismos eletrônico e catalítico.....	51
Figura 13 - Organograma das principais etapas realizadas no trabalho	56
Figura 14 - Desenho esquemático das etapas específicas realizadas no trabalho	57
Figura 15 - Laboratórios para preparação: (A) Do alvo metálico; (B) Dos filmes finos	58
Figura 16 - Laboratórios para a caracterização estrutural e magnética dos filmes finos: (A) Espectrofotômetro de Ultravioleta-Visível; (B) Microscópio de Força Atômica (foto comercial disponível no site da empresa responsável); (C) Sistema de Medição de Propriedades Magnéticas; (D) Microscópio Eletrônico de Varredura; (E) Sistema de Difração de Raios-X.....	59
Figura 17 - Equipamentos para fazer o alvo metálico: (A) Forno de arco; (B) Prensa hidráulica	65
Figura 18 - Organograma das etapas realizadas para confeccionar os alvos metálicos	65
Figura 19 - Compostos ou alvos metálicos preparados: (A) Composto metálico de Sn e Fe, em diferentes concentrações de Fe indicadas; (B) Composto metálico de Sn	66
Figura 20 - Organograma com as etapas de escolha e corte do substrato de vidro para a deposição do filme fino em sua superfície.	67
Figura 21 - Organograma com as etapas de preparo do substrato de vidro para a deposição do filme fino em sua superfície.	67
Figura 22 - Organograma com as etapas de deposição do filme fino no substrato de vidro.....	68
Figura 23 - Organograma com as etapas de tratamento térmico e cristalinização dos filmes finos.	69
Figura 24 - Equipamento montado no laboratório do trabalho, para a preparação dos filmes finos: (A) Câmara fechada de vácuo, evidenciando a presença do gás argônio em seu interior, no momento de deposição de um filme fino; (B) Equipamento completo de preparação de filmes finos; (C) Bombas, mecânica e turbo, respectivamente, da esquerda para a direita, utilizadas para fazer o vácuo dentro da câmara.....	69
Figura 25 - Desenho do equipamento montado no laboratório do trabalho, para a preparação dos filmes finos, especificando as principais partes deste equipamento.....	70
Figura 26 - Filmes finos transparentes de SnO ₂ , dopados com 2% e 5% de ferro, utilizados para os testes como sensores do gás metano, preparados em um tempo de deposição de 2 horas.....	72
Figura 27 - Filmes finos transparentes de SnO ₂ dopado e não dopado com Fe, depositados em 2 horas, utilizados para caracterizações estruturais, óticas, microscópicas e magnéticas: (A) SnO ₂ ; (B) SnO ₂ dopado com 3% de Fe.....	73

Figura 28 - Filmes finos transparentes de SnO ₂ dopados e não dopados com Fe, depositados em diferentes tempos, utilizados para caracterizações estruturais, óticas, microscópicas e magnéticas: (A) SnO ₂ dopado com 1% de Fe e depositado por 2 horas; (B) SnO ₂ depositados no tempo de 1 a 4 horas; (C) SnO ₂ dopados com 5% de Fe, depositados por 1 hora e 3 horas	74
Figura 29 – Substrato de vidro transparente, evidenciando, discretamente, cores sobre a sua superfície, que representam o filme fino de SnO ₂ , depositado pelo tempo de 3 horas ..	75
Figura 30 - Equipamentos utilizados para o teste de sensor: (A) Multímetro digital; (B) Câmara fechada para teste de gás ou calibrador portátil de calor, fios do multímetro e mangueiras de entrada de ar e de gás, e a garrafa pet, contendo água em seu interior; (C) Computador com os programas do teste instalados; (D) Mistura de gás comprimido contendo 4% de gás metano	76
Figura 31 - Desenho, representativo, dos equipamentos utilizados para o teste de sensor ..	76
Figura 32 - Etapas, esquematizadas, do teste de sensor com o gás metano	77
Figura 33 - Imagem da topografia e perfil topográfico da superfície do filme fino de SnO ₂ dopado com 3% de Fe: (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de 15µm por 15µm, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de 15µm, a variação da topografia do filme.....	88
Figura 34 - Imagem da topografia, para visualização da espessura, e perfil topográfico da superfície do filme fino de SnO ₂ dopado com 3% de Fe: (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de 30µm por 30µm, com grande destaque para a elevação da topografia em uma parte desta área, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de aproximadamente 3µm, uma elevação importante da topografia, no substrato de vidro, indicando o filme.	89
Figura 35 - Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do filme fino de SnO ₂ dopado com 3% de Fe, na mesma de 15µm por 15µm da imagem topográfica: (A) Imagem da amplitude; (B) Imagem de contraste de fase.	90
Figura 36 - Imagem da topografia e o perfil topográfico, da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO ₂ dopado com 3% de Fe, e na mesma área de varredura, de 15µm por 15µm: (A) Imagem da topografia, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico.....	92
Figura 37 - Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO ₂ dopado com 3% de Fe, e na mesma área de varredura, de 15µm por 15µm: (A) Imagem da amplitude; (B) Imagem de contraste de fase.....	93
Figura 38 - Imagem da topografia e perfil topográfico da superfície do filme fino de SnO ₂ : (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de 15µm por 15µm, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de 15µm, a variação da topografia.....	95

Figura 39 - Imagem da topografia, para visualização da espessura, e perfil topográfico da superfície do filme fino de SnO ₂ : (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de 30µm por 30µm, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de aproximadamente 6µm, uma elevação máxima da topografia, no substrato de vidro, indicando o filme, de aproximadamente 0.6 µm.	96
Figura 40 - Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do substrato de vidro, do lado que contém o filme fino de SnO ₂ , na área de varredura de 15µm por 15µm: (A) Imagem da amplitude; (B) Imagem de contraste de fase.	97
Figura 41 - Imagem da topografia e perfil topográfico da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO ₂ , e na mesma área de varredura de 15µm por 15µm: (A) Imagem da topografia; onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico (B) Perfil topográfico.....	98
Figura 42 - Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO ₂ , e na mesma área de varredura de 15µm por 15µm: (A) Imagem da amplitude (B) Imagem de contraste de fase.....	99
Figura 43 - Imagem da superfície do filme fino de SnO ₂ com dopagem de 5% de Fe, em uma magnificação (aumento) de 5000 vezes.....	100
Figura 44 - Imagem da superfície do filme fino de SnO ₂ com dopagem de 5% de Fe, em uma magnificação de 25000 vezes.	101
Figura 45 - Imagem da superfície do filme fino de SnO ₂ em uma magnificação de 1500 vezes.	101
Figura 46 - Padrão de difração de Raios-X dos filmes finos de SnO ₂ e SnO ₂ -5%Fe mostrando o padrão observado ou medido, o refinamento ou ajuste pelo Método de Rietveld, e a diferença entre ambos: (A) Filme fino de SnO ₂ ; (B) Filme fino de SnO ₂ -5%Fe.	103
Figura 47 - Padrão de difração de Raios-X dos filmes finos de SnO ₂ e SnO ₂ com dopagem de 1 a 5% de Fe, refinados ou ajustados pelo Método de Rietveld, indicando os índices de Miller (h,k,l) referente a cada pico do padrão de difração.	104
Figura 48 - Espectro de absorção dos filmes finos de SnO ₂ e de SnO ₂ dopados com 1 a 5% de Fe, pela técnica de Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível.	106
Figura 49 - Gráfico de $h\nu A^2$ vs $h\nu$ dos filmes finos de SnO ₂ e de SnO ₂ dopados com 1 a 5% de Fe, confeccionado para a aplicação do Método de Tauc. O método é apresentado, para a amostra de SnO ₂ - Fe5%, no menor quadrante, para a visualização da sua aplicação e determinação do <i>gap</i> ótico de energia para este filme e, semelhantemente, para os outros filmes finos. O <i>gap</i> de energia para o filme de SnO ₂ – Fe 5% é de 3.75 eV	107
Figura 50 - Energia do <i>gap</i> ótico pela concentração de Fe em cada filme fino de SnO ₂ ...	108

Figura 51 - Medidas, no sistema de medições magnéticas, da magnetização (M) pelo campo magnético H, do vidro, que é o substrato sobre o qual os filmes foram depositados, e do filme fino de SnO ₂ -Fe 5%, a uma temperatura de 300K, para visualização da influencia da resposta do vidro das medições magnéticas através da diferença da resposta deste para a resposta do filme	109
Figura 52 - Magnetização (M), onde os valores obtidos de magnetização na análise foram divididos pela área (cm ²) de cada filme, pelo campo magnético (H), à temperatura (T) de 300K, dos filmes finos de SnO ₂ dopados com concentrações de 1 a 5% de Fe. O gráfico de MxH no menor quadrante mostra, para três dos cinco filmes, dopados em 1%, 4% e 5%, o comportamento magnético dos filmes finos	110
Figura 53 - Magnetização (M) do filme fino de SnO ₂ dopado com 1% de Fe, em função do campo magnético (H), a uma temperatura (T) de 300K, evidenciando o comportamento paramagnético mais evidente nas regiões de alto campo magnético (entre ±70kOe e ±10kOe) e o comportamento ferromagnético menos evidente nas regiões de baixo campo magnético (entre ±10kOe e 0kOe).....	111
Figura 54 - Magnetização (M) do filme fino de SnO ₂ dopado com 5% de Fe, em função do campo magnético (H), a uma temperatura (T) de 300K, evidenciando o comportamento paramagnético menos evidente nas regiões de alto campo magnético (entre ±70kOe e ±10kOe) e o comportamento ferromagnético mais evidente nas regiões de baixo campo magnético (entre ±10kOe e 0kOe)..	112
Figura 55 - Magnetizações (M) normalizadas em função da temperatura (T). A normalização da magnetização é a razão da magnetização à temperatura no intervalo de 5K a 300K pela magnetização à temperatura de 300K. O gráfico do menor quadrante representa os comportamentos paramagnético e ferromagnético esperados para uma amostra em um gráfico de magnetização por temperatura, segundo a lei de Curie que estabelece, para materiais que possuem uma fase paramagnética, mas que não são paramagnetos ideais, que a magnetização é inversamente proporcional à temperatura.....	113
Figura 56 - Resistência (R) pelo tempo (t) dos testes para sensores do gás metano à 200°C, de filmes finos de SnO ₂ – Fe 5%, depositados em 1 a 4 horas pela técnica de pulverização catódica	115
Figura 57 - Dados de sensibilidade dos testes para sensores do gás metano, à 200°C, de filmes finos de SnO ₂ - Fe 5%, depositados em 1 a 4 horas	116
Figura 58 - Resistência (R) pelo tempo (t) dos testes para sensores do gás metano à 200°C, de filmes finos de SnO ₂ , sem dopagem, depositados em 1 a 4 horas	117
Figura 59 - Dados de sensibilidade dos testes para sensores do gás metano, à 200°C, de filmes finos de SnO ₂ intrínsecos, depositados em 1 a 4 horas	118
Figura 60 - Resistência (R) pelo tempo (t) dos testes para sensores do gás metano de filmes finos de SnO ₂ , sem dopagem, depositados em 2, 3 e 4 horas, em temperaturas entre 35 a 60°C	121
Figura 61 - Resistência (R) em função do tempo (t), dos filmes finos de SnO ₂ dopados com 1 a 5% de Fe, nos testes de sensores para o gás metano à 200°C.....	122

Figura 62 - Resistência (R) em função do tempo (t), do filme fino de SnO ₂ não-dopado com Fe, no teste de sensor para o gás metano à 200°C	123
Figura 63 - Sensibilidade dos sensores de SnO ₂ e de SnO ₂ dopados com Fe, na concentração de 1 a 5%, para testes com o gás metano à 200°C	125
Figura 64 - Estrutura cristalina do semicondutor de SnO ₂ , mostrando os átomos de estanho (Sn) ligados ao átomos de oxigênio (O), formando a estrutura cristalina tetragonal	127
Figura 65 - Estrutura cristalina tetragonal do semicondutor de SnO ₂ , mostrando alguns átomos de estanho (Sn) sendo substituídos por átomos de ferro (Fe ³⁺)	128
Figura 66 - Estrutura cristalina tetragonal do semicondutor de SnO ₂ , mostrando os átomos de estanho (Sn) ligados ao átomos de oxigênio (O), com átomos de ferro (Fe ³⁺) intersticiais no interior da estrutura cristalina.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Listagem dos materiais utilizados no trabalho	60
Tabela 2 - Continuação da listagem dos materiais utilizados no trabalho	61
Tabela 3 - Término da listagem dos materiais utilizados no trabalho	62
Tabela 4 - Massas calculadas, dos elementos Sn e Fe, para cada $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x$	64
Tabela 5 - Condições de deposição de filmes finos de SnO_2 intrínsecos	71
Tabela 6 - Condições de deposição de filmes finos de SnO_2 dopados com 5% de Fe	71
Tabela 7 - Condições de deposição dos filmes finos de Sn dopados com 1 a 5% de Fe.....	72
Tabela 8 - Parâmetros de rede a , b e c , volume da célula unitária e densidade dos filmes finos	105
Tabela 9 - Valores da energia do gap dos filmes finos.....	108
Tabela 10 - Dados dos testes para sensores do gás metano de filmes finos de SnO_2 -Fe 5%.....	116
Tabela 11 - Dados dos testes para sensores do gás metano de filmes de SnO_2 intrínsecos.....	118
Tabela 12 - Dados da sensibilidade dos principais filmes finos.....	124
Tabela 13 - Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO_2 dopado com 1% de Fe.	147
Tabela 14 - Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO_2 dopado com 2% de Fe.	155
Tabela 15 - Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO_2 dopado com 3% de Fe.	163
Tabela 16 - Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO_2 dopado com 4% de Fe.	171
Tabela 17 - Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO_2 dopado com 5% de Fe.	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem ou percentual
°	Graus
µm	Micrômetro
Ω	Ohms
Å	Angstroms
θ	Teta (ângulo)
°/min	Graus por minuto
amp/m	Ampère por metro
cc/min	Centímetros cúbicos por minuto
cm	Centímetro
cm ⁻¹	Inverso de centímetro ou centímetro elevado a menos um
cm ³	Centímetro cúbico
°C	Grau Celsius
DRX	Difração de Raios-X
e.m.u/cm ²	Unidade eletromagnética por centímetro ao quadrado
eV	Elétron-volt
g	Gramas
g/mol	Gramas por mol
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
J	Joule
K	Grau Kelvin
KHz	Quilohertz
Km	Quilômetros
KOe	Quilo-oersted
Kv	Quilovolts
m	Metro

mA	Miliampère
Mbar	Milibar
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MFA	Microscópio de Força Atômica
mm	Milímetro
mV	Milivolt
nm	Nanômetro
N/m	Newton-metro
Oe	Oersted
Pa	Pascal
Pa mm	Pascal · milímetro
ppb	Parte por bilhão
rpm	Rotações por minuto
s	Segundo
SQUID	Superconductor Quantum Interference Device
T	Tesla
u.a.	Unidade de área
UV-VIS/ UV-Visível	Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível
V	Volt
W	Watt
Webers/m ²	Webers por metro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	21
1.1	Introdução	22
1.2	Objetivos	24
1.2.1	Objetivo geral	24
1.2.2	Objetivos específicos	24
2	REVISÃO TEÓRICA	25
2.1	Gás natural e o gás metano	26
2.2	Sólidos cristalinos	29
2.3	Materiais semicondutores	31
2.3.1	Semicondutores intrínsecos e extrínsecos	32
2.3.2	Técnica de dopagem por liga para preparação de alvos metálicos	34
2.3.3	Técnica de pulverização catódica para preparação de filmes finos	35
2.4	Magnetismo	38
2.4.1	Diamagnetismo, Paramagnetismo e Ferromagnetismo	39
2.5	Óxidos metálicos semicondutores aplicados como sensores de gás	42
2.5.1	Parâmetros de desempenho característicos para sensores de gás	52
3	METODOLOGIA	55
3.1	Etapas e materiais	56
3.2	Confecção dos alvos metálicos, de $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x$, com $x = 0$ à 0.05	63
3.2.1	Cálculo estequiométrico para a preparação dos alvos metálicos.....	63
3.2.2	Etapas e equipamentos de preparação dos alvos metálicos	65
3.3	Crescimento dos filmes finos pela técnica de pulverização catódica	66
3.4	Preparações dos testes para sensores do gás metano	75
3.5	Caracterizações morfológicas, estruturais, óticas e magnéticas dos filmes	79
3.5.1	Microscopia de Força Atômica	80
3.5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	81
3.5.3	Difratometria de Raios-X	82
3.5.4	Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível	83
3.5.5	Medições magnéticas	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
4.1	Resultados	87
4.1.1	Microscopia de Força Atômica	87

4.1.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	100
4.1.3	Difratometria de Raios-X	102
4.1.4	Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível	105
4.1.5	Medições magnéticas	109
4.1.6	Testes de sensores para o gás metano dos filmes finos	114
4.2	Discussão	126
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	130
5.1	Conclusões	131
5.2	Trabalhos futuros	132
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
	APÊNDICE A.....	142
	ANEXO A.....	146

Introdução e Objetivos

1.1 INTRODUÇÃO

A Nanotecnologia tem sido apontada, nos últimos anos, como uma das áreas responsáveis pela quarta revolução industrial, e sua extensiva e promissora contribuição abrange todos os campos do conhecimento, impactando os mais diversos setores de várias indústrias como a farmacêutica, médica, materiais, automotiva, química, petróleo e gás, ambiental, entre tantas outras (Baker 2005; Kong & Ohadi 2010).

Ela pode ser definida como a precisa manipulação e controle da matéria em dimensões de 1 a 100 nanômetros, ou, em outras palavras, como a ciência, a engenharia e a tecnologia conduzidas a uma escala nanométrica (El-Diasty & Ragab 2013). Seu principal enfoque está em tornar os processos mais eficientes, menos custosos e mais modernos, impactando menos o meio-ambiente e gerando novos materiais que sejam capazes de alcançar resultados que ainda não puderam ser alcançados, com as tecnologias atuais, e que são importantes para o desenvolvimento e a evolução da humanidade (Baker 2005; Kong & Ohadi 2010).

Dentre estes resultados pode-se citar a cura de doenças, detecção de doenças graves a tempo de tratá-las completamente, detecção de níveis perigosos de gases e contaminantes no meio-ambiente, melhoria no desempenho dos processos industriais, geração eficiente de energia não-poluente, solução para a escassez de água potável, entre outros, findando muitos dos atuais problemas enfrentados pela sociedade (Baker 2005; Kong & Ohadi 2010).

Para a indústria de petróleo e gás natural, no que diz respeito ao controle e ao monitoramento de vazamentos, tanto de contaminantes, durante os processos operacionais desta indústria, como do gás natural, que é extraído pela mesma, no processo de retirada deste gás do reservatório natural, e, até mesmo, no seu transporte, por gasodutos, existem perigos iminentes aos setores de operação e aos trabalhadores, oferecendo, inclusive, riscos de explosões e poluições muito danosas ao meio-ambiente, além de prejuízos financeiros consideráveis à indústria petrolífera (Mahendranath *et al.* 2015; Matteo *et al.* 2012).

Além do enfoque ao monitoramento de vazamentos e poluição ambiental, e aos riscos associados a estes, com o avanço das pesquisas cada vez maior em nanotecnologia, muito se tem também estudado sobre a aplicação desta na detecção de

gás natural em reservatórios, de forma mais barata e menos impactante ao meio-ambiente que os atuais métodos de detecção, e no melhoramento do processo de perfuração e produção de óleo e gás, tornando menos difícil a identificação e a separação dos dois (Krishnamoorti 2006; Nabhani *et al.* 2011; Pandey *et al.* 2016).

Dessa forma, a nanotecnologia é promissora em tornar inteligente o campo de exploração e produção de óleo e gás, introduzindo às principais áreas responsáveis pelos estudos de todo o processo da indústria petrolífera, que são a Geologia e a Geofísica, um novo e promissor campo de pesquisa: a “NanoGeociências” (El-Diasty & Ragab 2013; Pourafshary *et al.* 2009; Sunjay 2010).

O processo de utilização do gás natural como fonte energética segue etapas sistemáticas de produção, que vão desde a extração do recurso em campo até a sua distribuição final aos consumidores (Cofala *et al.* 2007). O transporte de gás consiste em uma etapa intermediária desse processo de produção, sendo, os gasodutos, a forma mais conveniente de realizá-lo (Bezerra 2008; Salgado 2004).

Os gasodutos são tubulações que encontram-se geralmente enterradas por extensões quilométricas, atravessando reservas naturais e regiões, entre a fonte natural do gás e o seu destino final de consumo, que podem ser densamente povoadas (Bezerra 2008; Murvay & Silea 2012). A etapa de transporte do gás natural pode ocasionar emissões fugitivas na natureza, de forma imprópria, de metano, principal constituinte do gás natural, decorrente de um vazamento não intencional do gás de equipamentos e gasodutos defeituosos (Guelfi & Scheer 2007). As emissões fugitivas consistem nos principais tipos de emissões totais de metano pela indústria de gás (Bezerra 2008; Murvay & Silea 2012; Salgado 2004).

Os vazamentos de gás natural e os perigos associados à liberação deste gás na natureza tem levado a uma crescente preocupação mundial relacionada à poluição do ar, especialmente pelo metano, já que é um dos principais gases causadores do efeito estufa, contribuindo significativamente com o aquecimento global e as mudanças climáticas atmosféricas (CENPES 1984; Cofala *et al.* 2007). Esta preocupação demanda que sejam desenvolvidos sistemas tecnológicos capazes de detectar este tipo de vazamento, o que inclui a fabricação de novos sensores de detecção de gases poluentes (Göpel & Schierbaum 1995; Krishnamoorti 2006).

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho são divididos em objetivo geral, que consiste no principal objetivo do trabalho, e em objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de sensores do gás metano a partir da preparação de filmes finos de dióxido de estanho (SnO_2) não dopados e dopados com ferro (Fe) em diferentes concentrações, e a influência da dopagem na melhoria deste desempenho.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Preparar composto metálico de um grama de estanho (Sn) e de cinco compostos metálicos de Sn com dopagem estequiométrica de ferro (Fe), em concentrações de 1 a 5 por cento (1 a 5%) de Fe, por meio de fusão em um forno de arco;
- II. preparar, pelo método de pulverização catódica ou *sputtering* (em inglês), filmes finos de dióxido de estanho (SnO_2) sem dopagem ou intrínsecos, e filmes finos de SnO_2 dopados com Fe;
- III. caracterizar estruturalmente, ópticamente e microscopicamente os filmes finos de SnO_2 dopados com o Fe e intrínseco, pelos métodos de caracterização Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microscopia de Força Atômica (MFA), Difração de Raios-X (DRX) e Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível (UV-VIS);
- IV. caracterizar magneticamente os filmes finos de SnO_2 dopados com o Fe, por meio de medições magnéticas;
- V. realizar testes individuais para sensores de gás dos filmes finos, utilizando uma mistura gasosa contendo 4% de gás metano.

Revisão Teórica

2.1 GÁS NATURAL E O GÁS METANO

O gás natural encontra-se associado ao petróleo, na natureza, gerado e armazenado em rochas sedimentares. São hidrocarbonetos, gasoso e líquido, respectivamente, formados basicamente por carbono e hidrogênio e, pela associação, os métodos para a busca e a exploração do gás natural são equiparáveis aos do petróleo. São amplamente utilizados como fonte de energia, sendo, o gás natural, responsável por 20% da geração de energia mundial (Suguio 2003).

A origem do gás natural e do petróleo é orgânica, proveniente de microorganismos marinhos acumulados em sedimentos pelíticos, denominadas rochas geradoras, decompostos pela ação de bactérias anaeróbicas e soterrados pelo peso das camadas rochosas sobrejacentes. Este soterramento, por milhões de anos, a grandes profundidades, acarreta altas e crescentes temperaturas que levam à gradual e completa perda dos componentes voláteis da matéria orgânica e o enriquecimento e concentração do carbono, formando os hidrocarbonetos. A depender das condições de pressão e temperatura no local de formação e armazenamento dos hidrocarbonetos, será possível encontrar gás natural e petróleo, associados, ou apenas um deles (Santos Neto 2014; Suguio 2003).

Por meio do processo de migração, através de falhas e fraturas, o petróleo e o gás natural se deslocam da rocha geradora até rochas sedimentares reservatórios, que são rochas que apresentam características geológicas adequadas à acumulação dos mesmos, que são a porosidade e a permeabilidade (Suguio 2003). Entretanto, para que o petróleo e o gás natural fiquem acumulados nas rochas reservatórios, é necessária a existência das chamadas trapas ou armadilhas estruturais, estratigráficas ou mistas, que irão colocar as rochas reservatórios em contato com as chamadas rochas capeadoras (selantes), para selar estes hidrocarbonetos no interior das rochas reservatórios, impedindo a continuidade do processo de migração (Einsle 1965).

As rochas capeadoras compreendem rochas não porosas e não permeáveis, de alta plasticidade, não sendo, assim, consideravelmente deformadas. Estas rochas capeadoras podem estar em contato com as rochas reservatórios estratigraficamente ou em decorrência da presença de falhas ou dobras geológicas, que são trapas estruturais que colocam rochas reservatório e selante, não adjacentes, em contato. Todo este

sistema petrolífero é necessário para a existência de depósitos de petróleo e gás natural (Einsle 1965).

O metano é um hidrocarboneto gasoso, de fórmula química CH_4 , principal constituinte do gás natural, podendo chegar a até 97% de constituição deste. Consiste em um átomo de carbono ligado a quatro átomos de hidrogênio por meio de ligação simples covalente estruturalmente não aromática e tetraédrica, de hibridação sp^3 . É um tipo de hidrocarboneto alifático alcano, sendo alifáticos os hidrocarbonetos de cadeia estrutural não aromática e sendo os alcanos, ou parafínicos, o grupo de hidrocarbonetos formados apenas por ligações simples entre carbonos e hidrogênios (Morrison & Boyd 1990).

A molécula do metano é apolar, devido a alta simetria de distribuição média de cargas nesta, que faz com que as polaridades das ligações carbono-hidrogênio se anulem mutuamente, ou seja, o momento dipolo resultante é nulo, e que a atração entre as moléculas se dê por forças de van der Waals, devido a existência de dipolos momentâneos decorrentes da movimentação de elétrons e consequente deformação da distribuição simétrica de cargas (Morrison & Boyd 1990).

Por serem moléculas de pequenas dimensões, as forças de van der Waals são bastante reduzidas e, dessa forma, as forças atrativas nas moléculas de metano são facilmente vencidas pela energia térmica, caracterizando o metano por baixos pontos de fusão (-183°C) e ebulição ($-161,5^\circ\text{C}$), e, por esta razão, como gasoso à temperatura ambiente. É um gás inodoro e incolor, à pressão e temperatura ambientes, inflamável quando misturado ao ar e pouco solúvel em água (Morrison & Boyd 1990).

A formação do metano (CH_4) está relacionada a três diferentes estágios de transformação da matéria orgânica, que são a diagênese, a catagênese e a metagênese (Figura 1), conforme as condições de temperatura e profundidade do soterramento da bacia sedimentar, tendo as suas características associadas a essas condições (Clennell 2001; Santos Neto 2014).

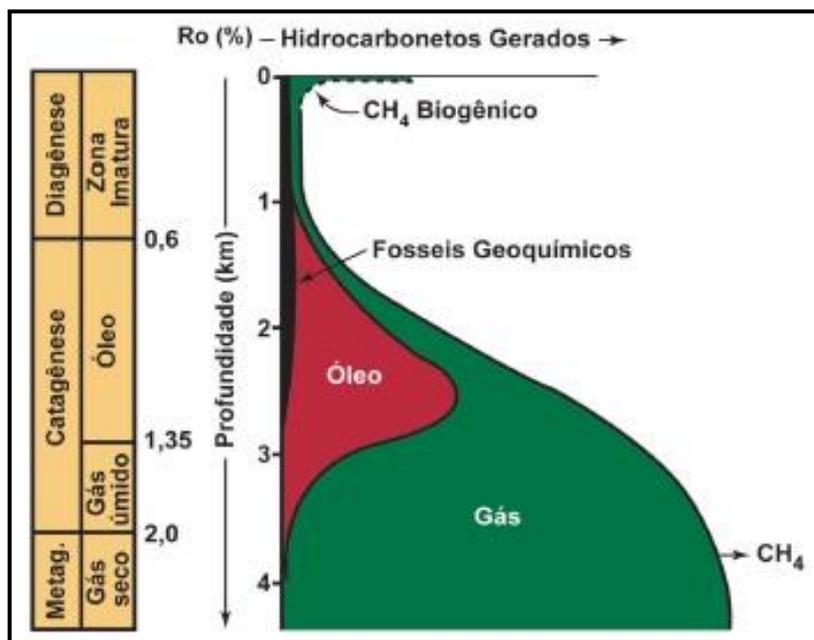


Figura 1: Representação dos estágios de transformação da matéria orgânica e dos hidrocarbonetos gerados em cada estágio (adaptado de: Santos Neto 2014).

O metano pode ser encontrado em praticamente todos os tipos de solos ou sedimentos superficiais, em quantidades variáveis, mas, dificilmente, é inferior a uma parte por bilhão (1ppb). Este metano em solos e sedimentos superficiais tem a sua origem associada a processos diagenéticos, ocorridos a baixas temperaturas e a pequenas profundidades, em geral até 50°C e 1000m, mediados ou não por microorganismos. Processos diagenéticos podem levar à formação e ao acúmulo de hidrocarbonetos gasosos em quantidades variáveis nos solos e nos sedimentos superficiais, sendo o metano o único hidrocarboneto gerado em quantidades significativas neste processo (Clennell 2001; Santos Neto 2014).

A produção do metano biogênico ocorre através da ação de bactérias presentes em sedimentos depositados em variados ambientes geológicos, onde, com o soterramento progressivo, a reação química de decomposição da matéria orgânica, na presença de água, elimina algumas ligações químicas, libera alguns componentes, como dióxido de carbono, e transforma a matéria orgânica em querogênio, que é a fração da matéria orgânica insolúvel nos solventes orgânicos. Alguns outros hidrocarbonetos, como o etano, podem ser gerados neste processo biogênico, mas suas quantidades são ínfimas comparadas a quantidade de metano gerada (Clennell 2001; Santos Neto 2014).

Com o aumento da profundidade de soterramento das bacias sedimentares e, conseqüentemente, da temperatura, entre 50°C e 150°C, são gerados os hidrocarbonetos termogênicos. Essa fase, conhecida por catagéneses, transforma parte do querogênio em

hidrocarbonetos, formando, primeiramente, óleos, e em seguida, gás (CENPES 1984). Na formação de óleos, na fase inicial da catagênese, são gerados gases úmidos que ocorrem associados ao óleo, uma mistura de óleo condensado e gás. A proporção de gás é pequena, em relação ao óleo, e a quantidade de metano é inferior ao presente nos gases biogênicos. À medida que ocorre a evolução térmica, na catagênese, há o predomínio de hidrocarbonetos gasosos (Santos Neto 2014).

Na fase metagênese, que é a fase que ocorre a grandes profundidades e, portanto, a temperaturas maiores que 150°C, somente o metano pode ser gerado, de forma estável, e, com isso, são formados apenas óleos secos, constituídos por mais de 95% de metano (CENPES 1984). Os gases termogênicos podem migrar para profundidades mais rasas que as em que são gerados, podendo ficar, inclusive, retidos na fração fina dos solos (Clennell 2001; Santos Neto 2014).

2.2 SÓLIDOS CRISTALINOS

O estado sólido é um dos três estados tradicionais de agregação das substâncias existentes na natureza, que são os estados sólido, líquido e gasoso. De uma forma bem ampla pode-se definir como sólido toda a substância que se comporta de forma rígida e elástica quando submetida a forças ou tensões, embora existam algumas substâncias que apresentam esta rigidez e elasticidade perante a aplicação de tensões sobre elas, mas que não são consideradas substâncias sólidas (Guimarães 1977). A distância entre átomos, vizinhos em um sólido, é da ordem de alguns Angstroms, semelhantemente aos de um líquido, com a diferença de que, no sólido, as posições relativas entre os átomos constituintes são fixas, e no líquido, não são, tendo entre 10^{22} e 10^{23} átomos a cada cm^3 de um sólido (Leite & Castro 1978).

Dentre as substâncias designadas sólidas, conforme as características mencionadas, há uma divisão destas em amorfas e cristalinas. A diferença entre estas duas divisões de uma substância sólida reside no fato de que, quando amorfo, o sólido não exibe uma regularidade no seu arranjo estrutural, apesar da forte ligação entre seus átomos ou moléculas e, quando cristalino, exibe um arranjo ou agregado tridimensional, regular, resultante da repetição tridimensional, no espaço, de uma unidade estrutural contendo um ou mais átomos ou moléculas (Guimarães 1977). Esta aproximação, de um sólido perfeito ou cristal ideal, permite o estudo das propriedades dos sólidos cristalinos considerando todos eles como uma ordem absoluta, sem desvios ou imperfeições (Leite & Castro 1978).

A rede cristalina de um cristal sólido é a estrutura periódica simples, que é repetida no espaço, formando o cristal. É constituída por um grupo de átomos, denominados como a base da rede cristalina, que estão ligados a cada ponto desta estrutura geométrica simples e periódica. Esta rede cristalina, associada a uma base apropriada, define todos os sólidos cristalinos (Mello & Biasi 1975).

A célula unitária é definida como o paralelepípedo, sólido geométrico prismático cujas faces são paralelogramos, que, ao ser translacionado em três eixos perpendiculares xyz , gera a rede cristalina do sólido cristalino. A célula primitiva é o menor paralelepípedo que pode gerar a rede cristalina (Mello & Biasi 1975).

O lado da célula unitária é denominado parâmetro de rede e é designado convencionalmente por a , b e c . Existem sete sistemas cristalinos decorrentes das relações entre os ângulos α , β , e γ , e os lados a , b e c , da célula unitária das redes cristalinas, que são o triclínico, monoclínico, ortorrômbico, tetragonal, cúbico, hexagonal e o trigonal ou romboédrico. Dentro destes sete sistemas, existem 14 tipos possíveis de redes cristalinas, que possuem em comum determinados elementos característicos de simetria, e são denominadas redes de Bravais. Nestas redes, os sete sistemas cristalinos podem ser simples, de face centrada, corpo centrado ou base centrada (Mello & Biasi 1975).

Os índices de Miller, representados como (h,k,l) , definem a orientação de um plano ou o conjunto de planos paralelos formados pelos átomos de um sólido cristalino (Mello & Biasi 1975). Para a sua determinação, considerando, por exemplo, o parâmetro de rede a de um sólido cristalino cúbico simples, um plano que intercepta os eixos x , y e z do sólido em ax , ay e az , terá seu índice de Miller determinado a partir do recíproco à distância da origem $(0,0,0)$ dos interceptos do plano, expressos como múltiplos inteiros do menor denominador comum. Os números encontrados são os índices de Miller deste plano para o sólido cristalino cúbico simples. Em casos em que haja intercepto no semi-eixo negativo, atribui-se um sinal negativo à coordenada correspondente, representada, no índice de Miller, por um traço acima do índice da coordenada (Guimarães 1977).

Os sólidos cristalinos reais diferem consideravelmente dos sólidos perfeitos ou cristais ideais por apresentarem falhas e impurezas em sua estrutura cristalina, como lacunas (espaços não preenchidos por átomos ou vazios), átomos intersticiais (átomos a mais preenchendo espaços entre átomos da rede cristalina) e defeitos geométricos. Porém as imperfeições no sólido real pouco afetam as propriedades dos sólidos cristalinos perfeitos e/ou podem ser estudadas em separado, não impossibilitando a

aproximação dos sólidos, real e ideal, nos estudos das suas propriedades e características (Leite & Castro 1978).

2.3 MATERIAIS SEMICONDUTORES

O semicondutor é um cristal que possui uma estrutura de bandas de energia, uma banda de valência e uma banda de condução, separadas por uma região muito estreita de banda proibida ou energias proibidas, conhecida, em inglês, por *band gap*. À temperatura de zero kelvin (0K), a banda de valência está totalmente preenchida por elétrons e a banda de condução está totalmente vazia (Guimarães 1977; Mora *et al.* 2010).

Nesta temperatura, os semicondutores funcionam como isolantes, pois as ligações químicas, predominantemente covalentes, se mantêm praticamente intactas, ou seja, não tem agitação térmica capaz de romper alguma ligação e tornar um elétron livre, e como a banda de valência está totalmente preenchida, não há, assim, condução de corrente elétrica. Um elétron, em um cristal, só pode se propagar se possuir energia dentro das faixas de energias permitidas, em outras palavras, as bandas de energia. Nas faixas de energia proibidas, que são as energias que os elétrons não podem assumir, o movimento dos elétrons é muito atenuado e a propagação pelo cristal é dificultada. A energia quantizada necessária para que um elétron consiga passar da banda de valência para a banda de condução é denominada *gap* de energia (Guimarães 1977; Mello & Biasi 1975; Mora *et al.* 2010).

A diferença de um semicondutor para um condutor é que, no condutor, não existe faixa de energia proibida, entre as bandas de valência e condução, ambas estão parcialmente superpostas e, assim, mesmo a baixas temperaturas, existirão elétrons com energias suficientes para os tornarem livres no cristal e conduzirem corrente elétrica. Já um isolante se diferencia de um semicondutor por apresentar uma faixa proibida de energia muito maior que a apresentada pelos semicondutores, que separa completamente as bandas de valência e condução, necessitando fornecer uma energia bastante alta a um elétron para que ele se torne livre e consiga passar da banda de valência para a banda de condução e, dessa forma, conduzir corrente elétrica (Figura 2). Portanto, materiais isolantes praticamente não possuem elétrons livres (Mello & Biasi 1975; Mora *et al.* 2010).

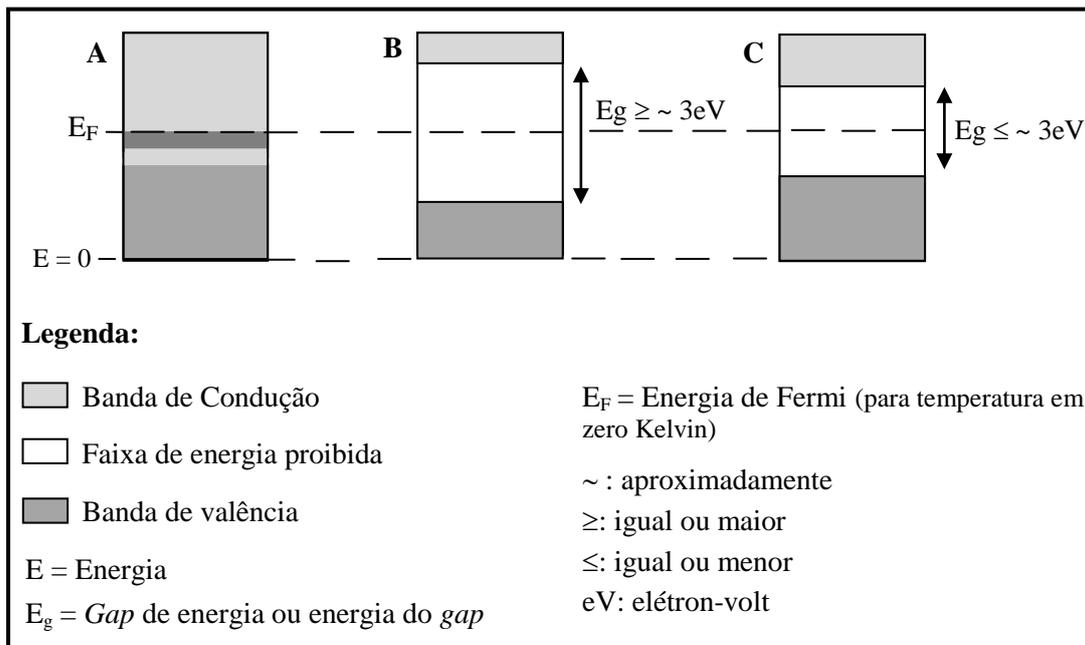


Figura 2: Representação esquemática das faixas de energias permitidas (bandas de condução e valência) e proibidas, indicando o gap de energia, nos: (A) Condutor ou metal; (B) Isolante; (C) Semicondutor (adaptado de: Gallas 2002; Mello & Biasi 1975).

2.3.1. Semicondutores intrínsecos e extrínsecos

Nos materiais semicondutores denominados puros ou intrínsecos, que não contém átomos de outros elementos, ou seja, impurezas, a geração térmica, que se trata da agitação térmica proveniente do aumento da temperatura de um cristal a partir do 0K pode ser capaz de romper ligações covalentes, que são ligações altamente direcionais e que limitam o movimento do elétron à direção da ligação, impedindo que este elétron se desloque pelo cristal. Este rompimento de uma ligação libera um elétron, que pode se deslocar do estado de valência para estados vazios da banda de condução, deixando uma lacuna no lugar que ocupava na banda de valência (Mello & Biasi 1975).

O deslocamento do elétron e a formação da lacuna na banda de valência formam um par elétron-lacuna, ou seja, formam dois portadores de carga. São denominados portadores, o elétron e a lacuna, por serem responsáveis pelo transporte de cargas de um ponto para outro no semicondutor (Guimarães 1977; Mello & Biasi 1975). O deslocamento de elétrons excitados leva à condição diferente da temperatura a zero kelvin, passando a ter uma banda de valência não mais totalmente preenchida e uma banda de condução parcialmente preenchida, podendo assim, o material semicondutor intrínseco, conduzir corrente elétrica. Entretanto esta condutividade é inferior à condutividade dos materiais condutores tendo em vista o número reduzido de elétrons na banda de condução (Guimarães 1977; Mora *et al.* 2010).

Com a liberação de um elétron pelo rompimento de uma ligação de valência entre átomos vizinhos em um semicondutor intrínseco, e o deslocamento deste para a banda de condução, a lacuna ou buraco deixado por este elétron pode ser ocupado por outro elétron, de uma ligação covalente vizinha, que pode saltar para esta lacuna, preenchendo-a, e assim sucessivamente, podendo também contribuir com a condutividade no semicondutor, denominada condutividade intrínseca (Guimarães 1977; Nussbaum 1971). Dessa forma, tanto elétrons como lacunas funcionam como transportadores de carga no semicondutor intrínseco, aplicado um determinado campo elétrico, onde os elétrons se portarão como cargas negativas e, as lacunas, como cargas positivas (Guimarães 1977; Mora *et al.* 2010).

Nos semicondutores denominados extrínsecos ou impuros, há a presença de outras substâncias, denominadas impurezas ou dopantes, capazes de alterar as propriedades destes materiais. Quando as impurezas encontram-se substituindo átomos da rede cristalina, são denominadas impurezas substitucionais, e quando encontram-se nas posições vagas da rede, entre os átomos da mesma, são denominadas impurezas intersticiais (Nussbaum 1971).

O acréscimo de impurezas a um semicondutor aumenta o número total de portadores de carga e altera a proporção entre elétrons e lacunas. Há dois tipos de semicondutores extrínsecos, denominados como tipo-p e tipo-n. Nos semicondutores tipo-p a maioria dos portadores são lacunas, os elétrons são a minoria de portadores de cargas e as impurezas são denominadas aceitadoras ou receptoras, por cederem lacunas ao cristal, já que a valência da impureza é menor que a do átomo do cristal. Nos semicondutores tipo-n, é o oposto, os elétrons são a maioria de portadores de cargas e, pelo fato da valência da impureza ser maior que a do átomo do cristal, esta é denominada doadora e cede elétrons ao cristal (Mello & Biasi 1975; Nussbaum 1971).

O fornecimento de energia ao cristal, que pode ser, no caso dos semicondutores extrínsecos, calor ou outras fontes, como radiações, eleva alguns elétrons de valência, de ligações químicas entre os átomos do cristal, em energias maiores, os tornando livres no cristal. A inclusão de impureza em um semicondutor origina um nível permitido de energias (E) dentro da faixa de energias proibidas (Figura 3) que, no caso do semicondutor extrínseco tipo-n, onde se tem elétrons em excesso da impureza doadora, fica localizada próxima à faixa ou banda de condução (E_d) e, no caso do semicondutor extrínseco do tipo-p, fica próxima à faixa ou banda de valência (E_a), uma vez que a impureza é receptora (Mello & Biasi 1975; Mora *et al.* 2010).

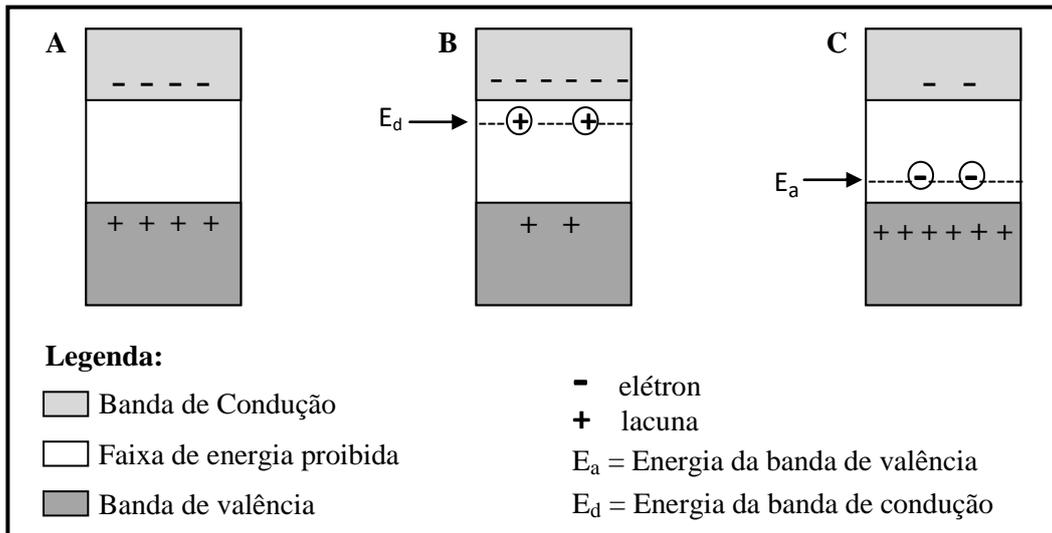


Figura 3: Representação esquemática das bandas de condução, valência e proibida nos semicondutores intrínseco e extrínsecos, e dos níveis de energias permitidos dos semicondutores extrínsecos, E_d e E_a : (A) Intrínseco (B) Extrínseco tipo-n; (C) Extrínseco tipo-p (adaptado de: Mello & Biasi 1975).

Impurezas que consistem em metais de transição, como o ferro, quando adicionadas a determinados cristais semicondutores, podem produzir níveis bastante profundos e distantes das bordas das bandas de valência e condução, gerando níveis de energia na faixa ou banda proibida que podem funcionar como armadilhas, aprisionando elétrons ou lacunas, que são os portadores de cargas dos semicondutores, abaixando, com isso, a condutividade do semicondutor extrínseco (Yu & Cardona 2003).

2.3.2. Técnica de dopagem por liga para preparação de alvos metálicos

Na dopagem por liga (Figura 4), de um cristal semicondutor, o elemento de base do cristal é levado, junto à fusão em um forno de arco elétrico, a um elemento de acréscimo ou dopante, formando-se, dessa forma, uma liga ou composto metálico. Assim que formados e resfriados, ambos os elementos estão agregados entre si, formando um semicondutor dopado (Mora *et al.* 2010; Nussbaum 1971).

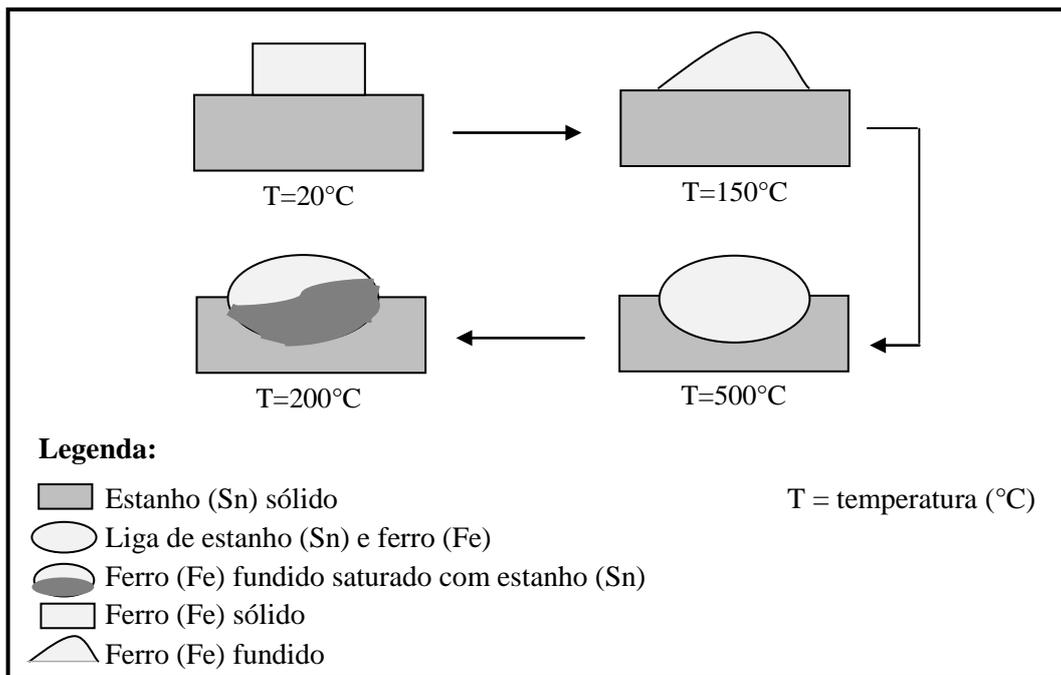


Figura 4: Esquema de fabricação de uma liga composta pelos elementos estanho e ferro, através da técnica de dopagem (adaptado de: Nussbaum 1971).

2.3.3. Técnica de Pulverização Catódica para preparação de filmes finos

Filmes finos são camadas, constituídas por um material determinado, cuja espessura varia de alguns nanômetros até microns, crescidos ou depositados através de um fluxo atômico ou molecular contínuo sobre diversos tipos de substratos, que podem ser amorfos, monocristalinos ou policristalinos, por meio de variadas técnicas de deposição. O objetivo da sua fabricação é a obtenção de propriedades físico-químicas diferentes dos substratos onde encontram-se depositados. Os filmes finos são bastante requeridos como materiais para diversas aplicações nos mais variados setores das indústrias em decorrência das características da sua fabricação, como a menor quantidade de material requerido para serem produzidos, a praticidade, a qualidade e a possibilidade de obtenção de novas propriedades destes materiais (Machuno 2016).

A técnica de pulverização catódica ou *sputtering* (em inglês) é amplamente utilizada para a deposição de um material com o intuito de recobrir, com uniformidade na espessura, baixa densidade de defeitos, composição estequiométrica controlada, alta pureza, baixa contaminação por partículas, bom preenchimento de espaços e boa conformidade, uma determinada superfície ou substrato. O princípio da técnica se baseia na deposição física, para a formação de um filme sólido, por meio da

condensação de clusters e átomos, removidos de um material, pulverizado, na superfície de um substrato (Krug 2010).

Um material sólido, denominado alvo, é colocado no cátodo de uma câmara fechada, à vácuo, juntamente com um outro material, colocado no ânodo da câmara e que será utilizado como o substrato, no qual ocorrerá a deposição do filme fino em sua superfície. Além da câmara à vácuo, o sistema de pulverização catódica inclui bombas de vácuo, fontes de alta tensão para gerar os íons, energizados, que colidirão com os átomos da superfície do alvo, e um potencial elétrico a ser aplicado no alvo para acelerar os íons de um gás, apropriado, em sua direção, para o bombardeamento, formando um plasma de descarga luminescente dentro da câmara fechada. Este potencial elétrico é negativo em relação às paredes da câmara fechada, o que faz com este movimento dos íons do gás em direção ao alvo, ocorra (Krug 2010; Machuno 2016).

A superfície do alvo é bombardeada e erodida por íons inertes, pesados e com energia cinética suficiente para remover alguns átomos superficiais do alvo pulverizado. A interação entre íons do gás e átomos do alvo que leva à ejeção de átomos da superfície do alvo é denominada *sputtering* (Figura 5). Um dos gases mais utilizados para o bombardeamento de alvos é o gás argônio, uma vez que os átomos deste gás são inertes o suficiente para não reagirem entre si, e pesados, possuindo, dessa forma, um momento linear no instante do impacto com a superfície do alvo, conseguindo, assim, remover átomos deste alvo (Cadieu & Chencinski 1975; Krug 2010; Machuno 2016).

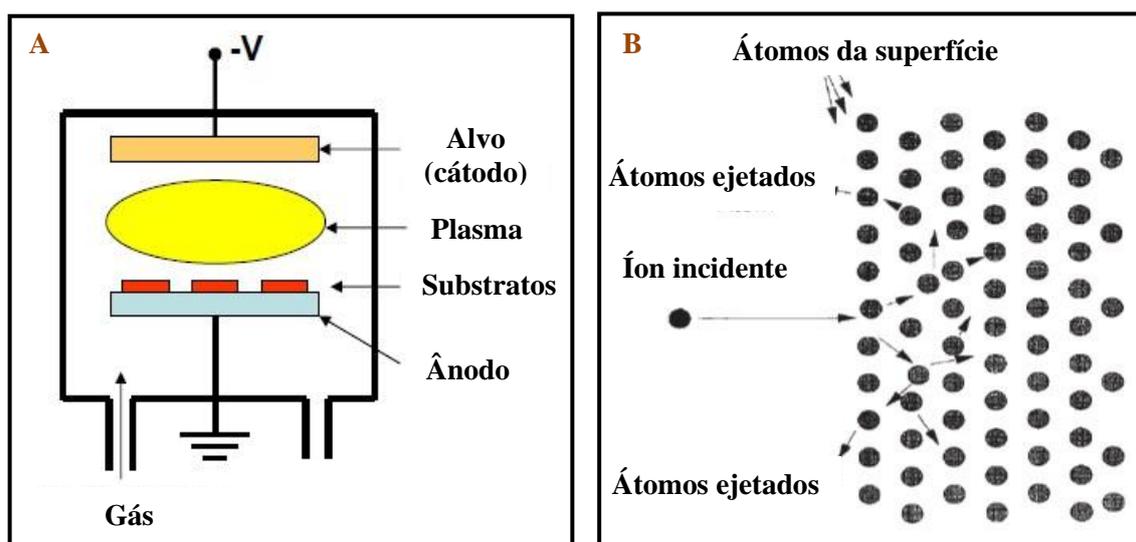


Figura 5: Técnica de pulverização catódica: (A) Sistema de pulverização catódica dentro da câmara fechada, a vácuo, mostrando o cátodo, onde está fixado o alvo, o ânodo, com os substratos, sobre os quais os filmes serão depositados, o plasma, o gás, entrando na câmara, e o potencial elétrico (-V), aplicado no sistema; (B) Incidência de um íon, oriundo do gás, nos átomos da superfície do alvo e remoção de alguns destes átomos (adaptado de: Krug 2010).

A ionização dos átomos se dá pela produção de uma descarga elétrica entre o ânodo e o cátodo, à baixa pressão. A taxa de bombardeamento do alvo depende das características deste, do ângulo de incidência e da energia cinética do íon. Em compostos metálicos, que contém elementos dopantes, pode ocorrer uma remoção não estequiométrica dos átomos da superfície do alvo, devido às diferenças nas energias de ligação entre os diferentes compostos, que favorece a remoção dos que estão mais fracamente ligados, até que se alcance uma situação de equilíbrio, após um determinado tempo de bombardeamento (Cadieu & Chencinski 1975; Krug 2010; Mori 2011).

A formação de um filme fino sobre um substrato envolve os processos de nucleação e crescimento, sendo que, no primeiro momento, tem-se um grande número de átomos ou moléculas que vão se fixando de forma permanente no substrato, caracterizando a etapa de nucleação do filme. Após esta etapa inicia-se o processo de crescimento do filme fino (Figura 6), decorrentes das interações entre os átomos da superfície do alvo e os íons do gás, que, de acordo com os tipos de interações e as condições experimentais, poderão ser de três tipos, que são ilhas, camadas e ilhas sobre camadas, esta última conhecida também por *Stranski-Krastanov* (Krug 2010; Ohring 2002).

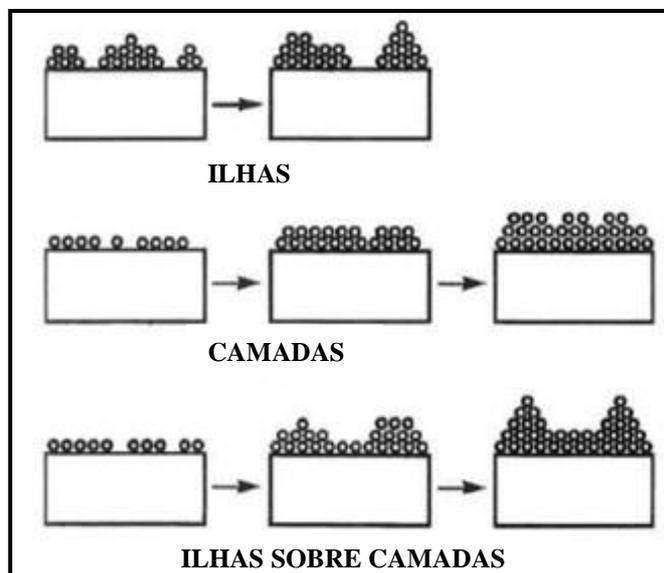


Figura 6: Tipos de crescimento dos filmes finos, ilhas, camadas e ilhas sobre camadas ou *Stranski-Krastanov*, em um substrato (adaptado de: Ohring 2002).

A formação em ilhas acontece quando as ligações entre os átomos ou moléculas que estão sendo depositados no substrato, formando o filme, são mais fortemente ligados entre si que com o substrato. Tem-se, neste caso, um cluster, que é um aglomerado de átomos ou moléculas, nucleando-se no substrato e crescendo nas três

direções. O crescimento em camadas ocorre na situação oposta ao crescimento em ilhas, resultando na formação de camadas planares. E, por fim, o crescimento em ilhas sobre camadas ou *Stranski-Krastanov*, representa uma mistura dos dois tipos de crescimento, em ilhas e em camadas, onde, após crescer uma ou mais camadas, o crescimento em ilhas começa a ser favorecido (Krug 2010; Machuno 2016; Ohring 2002).

Como reportado na literatura (Cadieu & Chencinski 1975; Hoffman & Thornton 1998; Mori 2011), o processo de termalização, que é a perda de energia devido às colisões entre os íons do gás e os átomos do alvo, antes de chegar ao substrato, pode levar à produção de filmes finos não compactos e densos. Para tanto faz-se necessário, uma vez que o produto da pressão do gás durante o processo de deposição do filme e da distância alvo-substrato determina o número de colisões àquela temperatura de deposição, que, a uma determinada potência, aumenta-se a distância alvo-substrato ou a pressão na deposição, para evitar a termalização. A termalização ocorre, para gases, a uma temperatura até 1000K, entre 200 e 300 Pa mm.

A técnica de pulverização catódica apresenta vantagens, sobre outras técnicas, como a possibilidade de controlar os parâmetros de deposição do filme, a utilização de diversos tipos de substratos e grande variedade de alvos, com a produção de filmes finos de boa qualidade e sem danos prejudiciais, a possibilidade de altas taxas de deposição e, com isso, a formação de filmes policristalinos, a adaptação do filme depositado na superfície do substrato, ao formato do mesmo, e a possibilidade de determinar a espessura dos filmes produzidos, através do controle do tempo de deposição (Krug 2010; Mori 2011).

2.4 MAGNETISMO

A força magnética influencia os portadores de carga e depende, não apenas da posição da partícula, como também da velocidade do seu movimento. Associada a essa força magnética existe um vetor campo magnético (\vec{B}) cuja direção especifica a direção fixa da partícula, e cuja constante de proporcionalidade especifica a velocidade e a carga da partícula (Teles 2008).

O campo magnético só surge na presença de corrente elétrica, não existindo, desta forma, campos magnéticos se os elétrons não estão em movimento. Além disso, as linhas do campo magnético sempre são fechadas e, todas as linhas que entram na superfície magnética devem sair da mesma, pois o fluxo através de qualquer superfície

fechada é nulo. Todos os corpos magnéticos possuem dois pólos magnéticos, um Norte e um Sul, ou seja, possuem dipolos magnéticos (Nussbaum 1971; Teles 2008).

2.4.1. Diamagnetismo, Paramagnetismo e Ferromagnetismo

Em um átomo, os elétrons, carregados negativamente, orbitam o seu núcleo e possuem um momento angular intrínseco, denominado spin, que resulta da rotação do elétron em torno do próprio eixo. As órbitas dos elétrons produzem campos magnéticos, tendo em vista que magnetismo é a manifestação das cargas elétricas que se encontram em movimento (Teles 2008). Um elétron orbitando o núcleo, o qual está associado, pode ter a sua trajetória interpretada como uma corrente numa espiral, sendo a espiral, a órbita que o elétron faz em torno do núcleo, com um momento magnético determinado. Em átomos com mais de um elétron, órbitas individuais (orbitais) são ocupadas por pares de elétrons com a orientação dos seus spins em direções opostas. A magnetização total vinda das duas contribuições (orbital e de spin) é nula, sendo a magnetização definida como o dipolo magnético por unidade de volume (Nussbaum 1971).

Mesmo tendo os seus orbitais cheios, a circulação dos elétrons em torno do núcleo do átomo gera um campo magnético que se opõe, em direção, ao campo magnético externo, ou seja, pode ser associado a um momento magnético negativo (Teles 2008). Estes momentos magnéticos podem ser induzidos pela aplicação de um campo magnético externo (\vec{B}), gerando momentos magnéticos induzidos nos átomos, que irão se opor ao sentido do campo (Nussbaum 1971).

Os materiais diamagnéticos apresentam uma magnetização não espontânea e oposta ao campo magnético externo aplicado, pois este campo irá gerar os dipolos em uma direção oposta à própria direção, sendo o campo magnético interno menos intenso que o externo, pois a polarização induzida tende a reduzir o campo interno total (Dartora 2010).

Diferentemente dos materiais diamagnéticos, os materiais denominados paramagnéticos são permanentemente polarizados, ou seja, possuem dipolos atômicos (orbital e de spin) na ausência de campos magnéticos externos. Porém, na ausência de um campo magnético externo, estes materiais não são diferentes dos materiais diamagnéticos, pois os dipolos permanentes não interagem entre si, resultando em uma orientação ao acaso destes dipolos (Dartora 2010; Nussbaum 1971).

Com a ação do campo magnético externo aplicado, os momentos combinados do orbital e do spin dos átomos dos materiais paramagnéticos tendem a alinhá-los segundo

a direção deste campo externo, superando a contribuição diamagnética dos orbitais cheios destes materiais (Nussbaum 1971; Teles 2008).

Os materiais paramagnéticos tem suas propriedades magnéticas dependentes da temperatura, que pode ser modelada pela Lei de Curie¹, onde a capacidade do material em magnetizar-se sob a ação de um campo magnético externo (a susceptibilidade magnética, χ_M), é inversamente proporcional à temperatura (Nussbaum 1971).

A susceptibilidade magnética também pode ser descrita como a razão entre a magnetização (M) e o campo magnético \vec{B} . Dessa forma, comparando materiais diamagnéticos e paramagnéticos, a susceptibilidade magnética dos materiais diamagnéticos será sempre negativa, e dos paramagnéticos, sempre positiva (Nussbaum 1971).

Em elementos químicos de transição com camadas eletrônicas incompletas, como o ferro, por exemplo, existem momentos magnéticos permanentes, oriundo das camadas internas não preenchidas, que são altamente magnéticas (Dartora 2010; Nussbaum 1971).

Os dipolos do material ferromagnético interagem entre si gerando um campo interno alto, diferentemente dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos. A natureza do ciclo de histerese (Figura 7) pode ser explicada pelo comportamento dos domínios magnéticos, regiões do sólido em que todos os dipolos atômicos são paralelos entre si, na aplicação ou inversão de um campo magnético externo (Teles 2008). O material ferromagnético perde a sua magnetização acima da temperatura de Curie, que é específica de cada material (Dartora 2010; Nussbaum 1971).

Um cristal não ideal, ou um sólido policristalino, é constituído por um grande número de pedaços menores, denominados cristalitos, cujas polarizações estão orientadas, sem direção preferencial, constituindo a orientação natural de magnetização. E, sendo as energias internas de um material ferromagnético muito altas, associadas ao campo \vec{H} , os domínios nestes materiais irão se arranjar de maneira a atingir uma posição de menor energia e de equilíbrio estável, produzindo um grande número de domínios adicionais para que a energia interna se torne menor (Nussbaum 1971).

Juntamente à geração de novos domínios, que irão diminuir a alta energia interna, paredes entre os domínios são formadas, de forma que não seja criado um número infinito de domínios, sendo que estas paredes aumentam a energia interna para compensar o decréscimo provocado pela criação de domínios adicionais (Dartora 2010; Nussbaum 1971).

¹ De acordo com a Lei de Curie, para materiais que possuem uma fase paramagnética, mas que não são paramagnetos ideais, a susceptibilidade magnética é obtida pela relação: $\chi_M = C / T$, onde C é uma constante e T é a temperatura (Nussbaum 1971).

A energia das paredes é composta pela energia de troca e a energia de anisotropia. A energia de troca é proveniente dos momentos de spin dos elétrons desemparelhados, paralelos e antiparalelos, das camadas internas não preenchidas dos elementos de transição. Na presença de um campo magnético, elétrons com spin não alinhados com o campo podem passar para a banda com elétrons com spin alinhados ao campo, que é uma condição de menor energia, uma vez que as bandas estão parcialmente preenchidas. A energia que corresponde ao arranjo dos elétrons é a energia de troca (Nussbaum 1971; Teles 2008).

Já a energia de anisotropia é proveniente das diferenças nas direções de magnetização cristalinas, que podem ser preferenciais, intermediárias ou não privilegiadas. A aplicação de um campo \vec{H} em um material não magnetizado implicará em três possíveis situações, que serão ou a movimentação das paredes, ou crescimento dos domínios ou, ainda, a rotação dos domínios (Nussbaum 1971).

A propriedade de histerese dos materiais ferromagnéticos (Figura 7) é explicada, em partes, pela saturação magnética para além de um ponto R, característico do material. Até este ponto de magnetização R, a condição original do material pode ser revertida caso o campo magnético seja invertido e reduzido a zero. Ultrapassado este ponto R, essa reversibilidade se torna impossível e, assim, ao inverter e reduzir o campo, a curva de magnetização (M) não retorna segundo a curva inicial de magnetização. Os pontos em que a curva completa intercepta os eixos são denominados força coerciva ou campo coercivo (H_C) e magnetização remanente (M_R) (Nussbaum 1971).

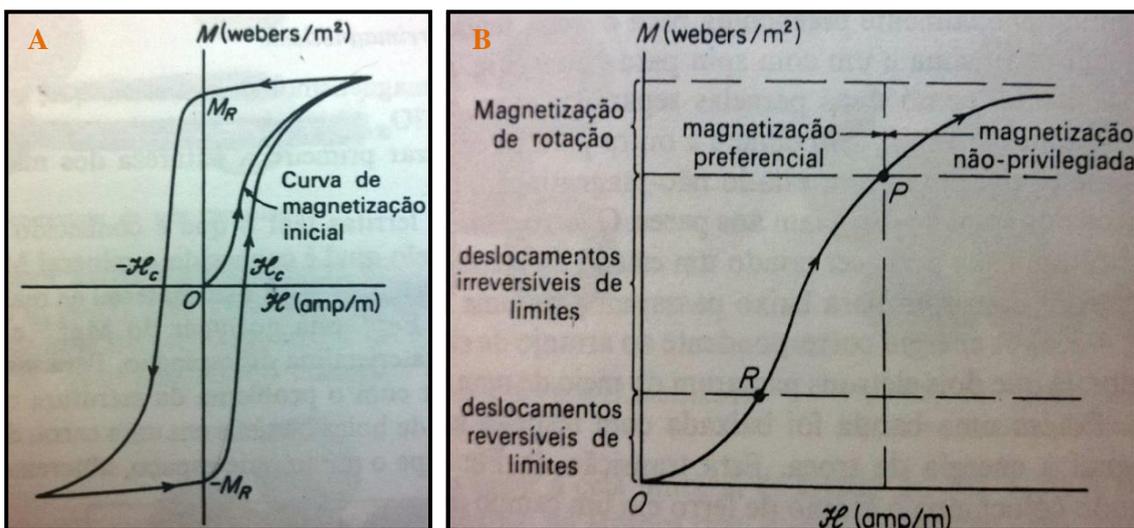


Figura 7: Curva de magnetização dos materiais ferromagnéticos: (A) Força coerciva e magnetização remanente; (B) Parte inicial da magnetização, evidenciando o ponto R e as magnetizações preferencial e não-privilegiada (adaptado de: Nussbaum 1971).

A magnetização em função do campo magnético aplicado representa o comportamento linear, característico das substâncias paramagnéticas, e o comportamento em uma curva de magnetização, típico das substâncias ferromagnéticas (Figura 8).

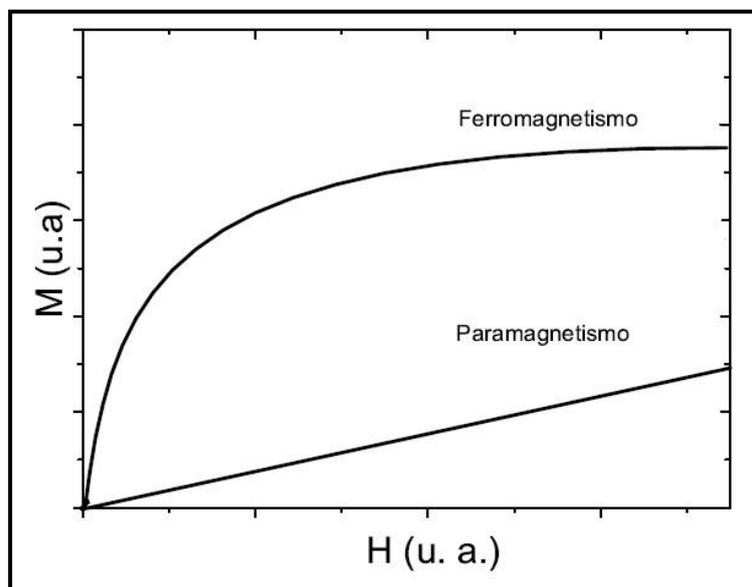


Figura 8: Representação da magnetização (M) em função do campo magnético (H) aplicado, mostrando o comportamento das substâncias ferromagnéticas e paramagnéticas (adaptado de: Aragón 2010).

2.5 ÓXIDOS METÁLICOS SEMICONDUTORES APLICADOS COMO SENSORES DE GÁS

Pela definição da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC)² “um sensor químico é um dispositivo capaz de transformar informações químicas, variando a partir da concentração de um componente específico da amostra em relação ao total composicional analisado desta amostra, em um sinal analítico útil” (Liu *et al.* 2012).

Tecnologias relacionadas a sensores de gás tem despertado, cada vez mais, o interesse da academia e da indústria no mundo todo. Isto se deve a gama de aplicações, em diferentes áreas, que estas tecnologias possuem, como na produção industrial, para detecção de metano em minas, na detecção de gases poluentes oriundos de veículos da indústria automotiva, em aplicações médicas, no controle interno de qualidade do ar e em estudos ambientais (Liu *et al.* 2012; Yamazoe 1991).

Óxidos metálicos semicondutores representam uma atraente classe de materiais para aplicação como sensores de gás devido a enorme quantidade de aplicações como tais desde o monitoramento ambiental, segurança pública e doméstica, aplicações

² União Internacional de Química Pura e Aplicada.

automotivas e em sensores de casas, até aplicações em espaçonaves e aviões (Comini 2005; Muksunov 2015).

São sensores pequenos e baratos de produzir, com longo tempo de vida e alta sensibilidade, apresentam curto tempo de resposta na detecção de gases e são capazes de detectar uma ampla variedade de gases com um alto grau de confiança. É possível, ainda, controlar, com precisão, a sua estrutura e a sua morfologia, e são materiais fisicamente e quimicamente estáveis, cuja condutividade varia fortemente com condições externas, detectando de forma excelente luz, pressão e temperatura (Coles & Williams 1991; Liu *et al.* 2012).

Sendo assim, os sensores de óxidos metálicos semicondutores estão sendo vistos como dispositivos sensores funcionais e modernos na detecção de gases e tem despertado um maior interesse da comunidade acadêmica, tendo as pesquisas acerca deles aumentado consideravelmente nos últimos anos, podendo o seu potencial como sensor ser resumido no melhor desempenho dos conhecidos “3S”: sensibilidade (*sensitivity*, em inglês), seletividade (*selectivity*, em inglês) e estabilidade (*stability*, em inglês) do material sensor (Comini 2005).

A redução do tamanho do cristal pode aumentar significativamente o desempenho do sensor (Yamazoe *et al.* 1983; Yamazoe 1991). A diminuição do tamanho do cristalito, para dimensões nanométricas, expõe ainda mais a sua superfície, aumentando a fração de átomos no limite do grão e fazendo com que os limites dos grãos contenham uma alta densidade de defeitos, como vacâncias, desempenhando um importante papel nas propriedades de transporte dos elétrons (Bakrania & Wooldridge 2009; Basu & Basu 2009).

O dióxido de estanho (SnO_2) é um semicondutor policristalino, intrinsecamente de tipo-n, com uma estrutura cristalina tetragonal tipo rutilo, com uma ampla banda *gap* de energia, em aproximadamente 3,7 eV. Seus parâmetros de rede são $a = b = 4.737$ angstroms (Å) e $c = 3.185$ Å, e raios iônicos do O^{2-} de 1.40 Å e do Sn^{+4} de 0.71 Å. Sua célula unitária é constituída por quatro átomos de oxigênio e dois átomos de estanho, onde cada átomo de oxigênio encontra-se rodeado por três átomos de estanho, dispostos de forma a quase representarem os vértices de um triângulo equilátero, sendo a sua forma mineralógica mais simples, a cassiterita (Aragón 2010).

Tem sido extensivamente aplicado como material para produção de sensores funcionais nanocristalinos de gás, por apresentar ótimas propriedades óticas e elétricas e transparência à luz visível (Basu & Basu 2009; Xingqin 1993), e pode ser fabricado por diversas técnicas de deposição de filmes finos, que requerem altas temperaturas de

tratamento para que se obtenha uma boa qualidade de filmes policristalinos deste material, o que pode acabar por levar a danos na superfície dos filmes, além de um aumento da espessura da interface, gerando um efeito negativo nas propriedades óticas destes materiais (Sberverglieri 1992).

Semicondutores policristalinos tem a estrutura com um grande número de grãos e limites de grãos. Diferentemente de materiais cristalinos simples, materiais policristalinos dão origem a potenciais barreiras entre os grãos, e as propriedades elétricas na superfície de um filme fino e os limites da superfície entre os grãos neste, são afetadas pela adsorção e dessorção de moléculas de gás (Basu & Basu 2009; Xingqin 1993). A adsorção de gás na superfície destes semicondutores provoca uma alteração significativa na sua resistência elétrica, e isso permite a detecção da presença de um gás no material (Wilson *et al.* 2001).

Materiais semicondutores de SnO₂ apresentam, relativamente, poucos locais disponíveis de adsorção do oxigênio, quando comparados aos metais nobres, devido ao desenvolvimento das barreiras de potencial na superfície da partícula e devido ao fato da fração de locais ocupados na superfície, em relação a todos que estão disponíveis, ser baixa, em geral menor que 1% (Miller *et al.* 2006).

A temperatura de trabalho dos sensores de SnO₂ encontram-se entre 25°C e 500°C e a melhor temperatura de sensibilidade deste sensor, ou seja, a temperatura de trabalho ideal, a um determinado gás alvo varia de acordo com o gás que se deseja detectar, o que caracteriza a seletividade do sensor para cada gás alvo (Kumar *et al.* 2014; Liu *et al.* 2012). Se o valor da temperatura de trabalho do sensor para a detecção de um determinado gás for muito desviado do valor ideal, outros componentes do gás podem se mostrar mais reativos a essa temperatura não-ideal, levando a uma pobre seletividade do sensor para o gás em específico (Liu *et al.* 2012).

O mecanismo de operação de filmes finos de SnO₂ está fundamentado nas mudanças de condutividade elétrica experimentadas pelo material semicondutor de SnO₂ quando, o oxigênio, que passou por um processo de quimiossorção na superfície do semicondutor, reage com as moléculas do gás alvo em elevadas temperaturas (Coles & Williams 1991; Huang & Wan 2009). Na presença de gases redutores, como o metano (CH₄), a condutividade do sensor aumenta, mas na presença de gases oxidantes, esta condutividade diminui (Miller *et al.* 2006).

A adsorção de gás na superfície dos semicondutores óxidos metálicos (Figura 8), como o SnO₂, muda a condutividade elétrica dos óxidos (Matsuura & Takahata 1991). As mudanças na resistência do semicondutor de SnO₂ variam de acordo com a

concentração do gás alvo, sendo que esta relação entre a resistência e a concentração do gás alvo é não linear (Miller *et al.* 2006).

A adsorção é um processo físico-químico caracterizado pela acumulação e concentração seletiva de um ou mais componentes das moléculas de uma substância líquida ou gasosa (adsorbatos), na superfície de uma substância sólida (adsorvente). O processo contrário à adsorção, que é a remoção dos componentes adsorvidos, é denominado dessorção (Ruthven 1984).

A adsorção pode ser física ou química. A adsorção física, conhecida por fisissorção, ocorre devido às forças de *van der Waals* entre o adsorvente e o adsorbato em decorrência das interações intermoleculares entre os átomos da superfície do sólido e as moléculas do líquido ou gás. A fisissorção pode formar várias camadas moleculares sobrepostas e não implica em alterações no adsorbato.

A adsorção química, denominada quimiossorção, corresponde a uma interação química entre o adsorbato e os átomos da superfície do adsorvente, que leva a uma transferência e a um rearranjo dos elétrons, semelhantemente a uma ligação química, formando uma única camada molecular adsorvida. A quimiossorção leva à transformação da espécie adsorvida em uma espécie diferente (Guelfi & Scheer 2007).

No caso dos semicondutores óxidos, o aumento da temperatura faz com que haja a quimiossorção da molécula de oxigênio (2O) pelo ganho de mais elétrons (e^-), na superfície do semicondutor, levando à presença de íons de oxigênio (O^-) nos limites dos grãos, o que resulta em um aumento da resistividade deste material (Basu & Basu 2009), segundo as equações (1) e (2). A região de carga, repleta de elétrons, é mais resistiva que o *bulk* ou cristal (Rothschild & Komem 2004).



Na posterior presença das moléculas do gás metano (CH_4), há um desequilíbrio das forças de *van der Waals*, que são as forças que agem na superfície do semicondutor, em decorrência das interações intermoleculares entre os átomos da superfície do semicondutor e as moléculas de gás, criando um campo de forças responsáveis por atrair e aprisionar as moléculas de gás (Figura 9) (Basu & Basu 2009).

Estas moléculas de gás irão reagir com o oxigênio que sofreu a quimiossorção, segundo a equação (3), nos limites dos grãos do semicondutor e, como resultado da

adição de portadores de carga negativa ao *bulk*, tem-se uma redução da resistência, ou aumento da condutividade, do semiconductor (Basu *et al.* 2008).



Onde CO_2 é a molécula de gás carbônico ou dióxido de carbono e H_2O é a molécula de água, geradas no processo.

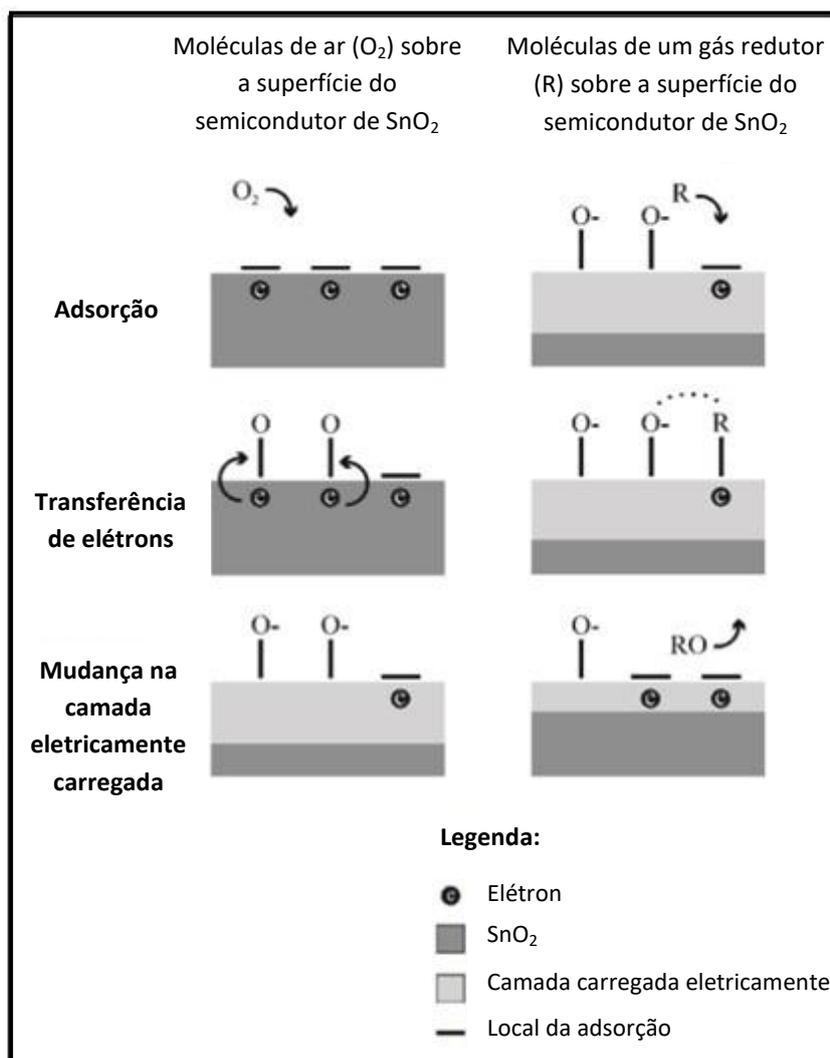


Figura 9: Representação esquemática dos mecanismos de resposta do sensor de SnO_2 na presença de um gás oxidante, o O_2 , e de um gás redutor (R) (adaptado de: Miller *et al.* 2006).

O desempenho como sensor dos óxidos metálicos é controlado por três fatores independentes, que são a função receptora, devido a habilidade da superfície do semiconductor óxido em interagir com o gás; função transdutora, devido a habilidade de conversão do sinal proveniente da interação química, na superfície dos óxidos

semicondutores, em sinal elétrico, e a utilidade dos óxidos semicondutores como sensores funcionais de gases (Basu *et al.* 2008; Basu & Basu 2009).

A porosidade e a espessura dos filmes de óxidos metálicos influenciam no aumento do desempenho do sensor de SnO₂ na detecção de gases, já que, no caso da porosidade, camadas sensitivas compactas destes óxidos metálicos dificulta a entrada do gás no filme, confinando a reação das moléculas de gás nas camadas apenas à superfície. A porosidade nas camadas facilita o acesso do gás a um maior volume das camadas sensitivas do óxido semiconductor (Figura 10), promovendo a reação do gás com os átomos do sólido semiconductor ao longo das camadas sensitivas (Xu *et al.* 1990).

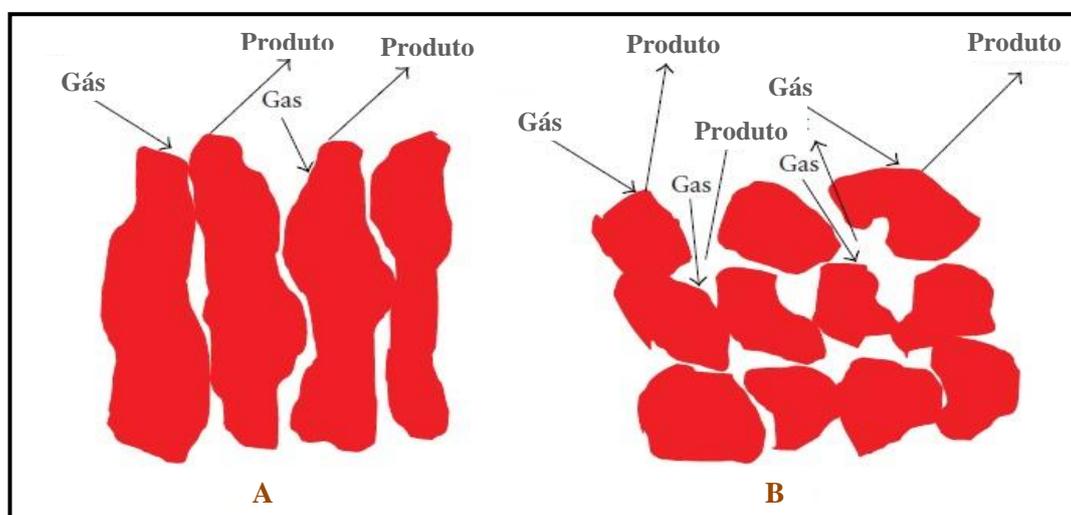


Figura 10: Representação, em desenho, de um óxido semiconductor (produto) em duas situações distintas: (A) Semiconductor com uma camada compacta, mostrando um menor alcance do gás à sua superfície, resultando em uma menor interação entre o gás e o sensor; (B) Semiconductor com uma camada porosa, cuja porosidade aumenta o alcance do gás à sua superfície, promovendo uma maior interação entre o gás e o sensor (adaptado de: Basu & Basu 2009).

A espessura dos filmes tem fundamental importância no que diz respeito à resposta dos sensores, pois para que se tenha uma alta resposta do sensor semiconductor de óxidos metálicos, a região repleta de elétrons, em decorrência da quimiossorção do oxigênio na sua superfície e, conseqüente ganho de elétrons, deve ter a espessura próxima à espessura dos filmes finos de óxidos metálicos (Basu *et al.* 2008).

A resposta do sensor é reportada na literatura como sendo tanto maior quanto for a resistividade do tipo de filme fino sensor de gás (Sakai *et al.* 2001). A condutividade dos sensores de óxidos metálicos aumenta linearmente com o decréscimo de densidade de cargas retidas, sendo a resposta das variações induzidas pelo gás nas

densidades de cargas retidas proporcional a $1/D$, onde D representa o tamanho médio dos grãos (Rothschild & Komem 2004).

Os valores relativos das dimensões características entre a espessura da camada eletricamente carregada do sensor e a largura das conexões entre as partículas adjacentes do sensor, em outras palavras, dos contatos intergranulares entre as partículas de SnO_2 , estão relacionados aos valores de condutância do sensor e a resposta à presença do gás. A espessura da camada eletricamente carregada do sensor é indicada pelo comprimento de Debye (λ_D) dos elétrons no sensor de SnO_2 (Miller *et al.* 2006).

O comprimento de Debye é definido como sendo a distância onde pode ocorrer uma perturbação significativa no interior de um condutor ou plasma devido a influência de um campo elétrico, segundo a equação (4), ou ainda se trata do comprimento sobre o qual cargas elétricas projetam o campo elétrico perturbativo em um condutor (Fernandes & Marques Junior 2001).

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k_B T}{\eta_e e^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Onde ϵ_0 = constante elétrica; k_B = constante de Boltzmann; T = temperatura; η_e = densidade eletrônica; e = carga do elétron.

Na literatura foi proposto um modelo de regimes baseados nos tamanhos dos cristalitos e nas características das partículas ou grãos (Miller *et al.* 2006; Park & Akbar 2003; Yamazoe 1991). Neste modelo as conexões intergranulares das partículas são relacionadas à largura dos contatos intergranulares ou largura do “pescoço” (em inglês, *neck widths*) e ao comprimento de Debye (Figura 11), para explicar os mecanismos de condutância mais importantes dos semicondutores de SnO_2 .

Os valores relativos do comprimento de Debye e das conexões intergranulares das partículas ditam os regimes e modelos específicos de condutância dos sensores de SnO_2 associados a cada tipo de conexão interpartícula (Miller *et al.* 2006). Os contatos intergranulares entre as partículas adjacentes do SnO_2 (em inglês, *neck* ou “pescoço”) podem se classificar em “pescoço” aberto e “pescoço” fechado (Fernandes & Marques Junior 2001).

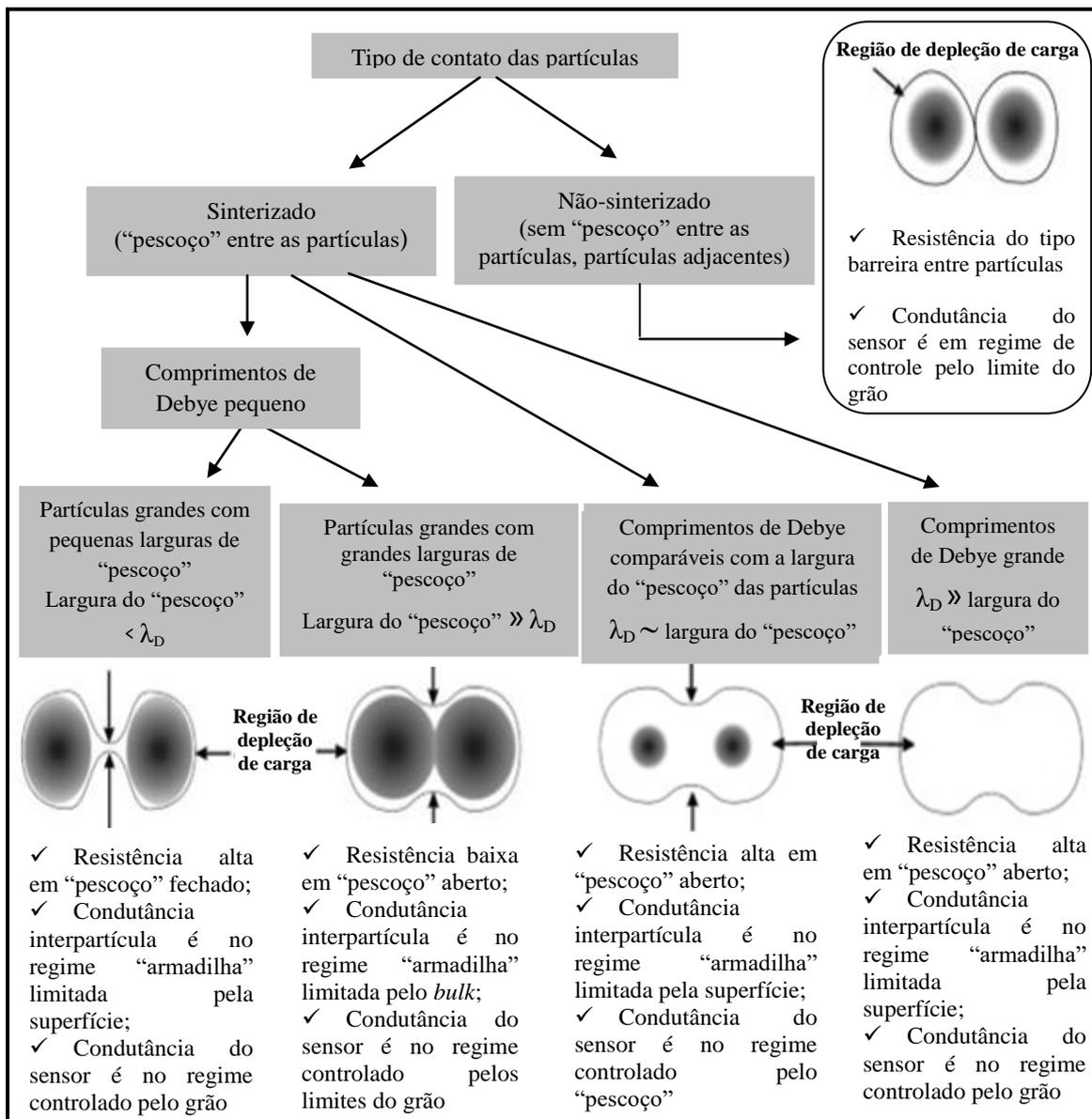


Figura 11: Mecanismos de condutância conforme os vários tamanhos de cristalitos e as características dos grãos de SnO₂, relacionando as conexões intergranulares das partículas (*neck widths* ou largura do "pescoço") e o comprimento de Debye (λ_D), este estimado em aproximadamente 3 nanômetros. Abaixo de cada par de partícula, é listado, primeiramente, o modelo de resistência, abaixo, os mecanismos de condutância interpartículas e por último, regime de condutância do sensor. Onde " \sim " é o mesmo que "aproximadamente", "<" representa "menor que" e " \gg " significa "bem maior que" (adaptado de: Miller *et al.* 2006).

Conforme indicado no esquema dos principais mecanismos de condutância propostos para o SnO₂ (Figura 11), que assume o sensor como constituído por uma única categoria de conexão interpartícula, de acordo com o tipo de contato entre as partículas, baseadas na largura das conexões interpartículas comparada ao comprimento de Debye, no esquema estimado em 3 nanômetros, é possível entender a resistência ao longo das conexões, se alta ou baixa, assim como o regime de condutância interpartícula e o regime de condutância e a sensibilidade do sensor de SnO₂ (Miller *et al.* 2006).

Como pode ser constatado, o tamanho do cristalito, em relação ao comprimento de Debye dos elétrons, dita, de certa forma, o regime de condutância do sensor e as suas resistividade e sensibilidade, de maneira que, se a dimensão média dos cristalitos diminuem em relação ao comprimento de Debye, a resistência nas conexões intergranulares é alta, em “pescoço” aberto, e a sensibilidade do sensor de SnO₂ passa a ser função dos tamanhos dos pescoços interpartículas; e quando a dimensão média dos cristalitos é superior ao comprimento de Debye, tem-se uma baixa resistência nas conexões intergranulares, em “pescoço” aberto e grande, e uma alta resistência nas conexões intergranulares, em “pescoço” fechado e pequeno, onde a sensibilidade do sensor passa a ser função dos tamanhos dos grãos ou partículas (Miller *et al.* 2006).

Entretanto há uma grande dificuldade em propor um único modelo para explicar a condutância do sensor de SnO₂, uma vez que este sensor é composto por vários tipos de contatos interpartículas, e não apenas um tipo exclusivo. Além disso, devem-se considerar outros fatores, como as porosidades nas camadas do filme de sensor, por exemplo, que afetam a sensibilidade do sensor de SnO₂ (Fernandes & Marques Junior 2001; Miller *et al.* 2006; Yamazoe *et al.* 1983).

Já é conhecido que o tamanho do cristalito influencia consideravelmente o desempenho de um sensor de gás, sendo melhor quanto menor o tamanho médio dos cristalitos deste sensor (Miller *et al.* 2006). Contudo, a diminuição das dimensões de um cristalito é algo ainda bem difícil de ser efetuado. Uma solução para melhorar o desempenho dos sensores de gás sem, no entanto, precisar diminuir o tamanho dos cristalitos do sensor, é dopar o mesmo com outro elemento químico, e isto pode ser ainda mais efetivo na melhora do desempenho que a diminuição no tamanho dos cristalitos (Yamazoe 1991).

A utilização de dopantes no sensor de SnO₂ pode melhorar seu desempenho consideravelmente, como sensor de gás, ao modificar o comprimento de Debye do elétron e as interações das moléculas de gás com a superfície do sensor, inibindo o crescimento dos grãos do SnO₂ (Miller *et al.* 2006; Yamazoe *et al.* 1983).

O tratamento térmico requerido para fabricar sensores dopados leva a uma importante reestruturação dos cristalitos do SnO₂ (Miller *et al.* 2006; Yamazoe *et al.* 1983). Os efeitos dos dopantes em sensores semicondutores de gás podem ser descritos em termos da temperatura nos quais a sensibilidade do sensor atingiu o seu valor máximo, e isto está estritamente relacionado ao tipo de gás redutor alvo e o tipo de dopante utilizado (Yamazoe *et al.* 1983).

Para tentar explicar o efeito produzido pela dopagem no sensor foram propostos, na literatura (Miller *et al.* 2006), dois mecanismos diferentes, denominados mecanismo eletrônico e mecanismo catalítico (Figura 12). No mecanismo catalítico, o metal dopante age como um catalisador, transportando o gás redutor para a superfície do SnO₂, e a reação do gás redutor com o oxigênio que encontra-se adsorvido na superfície do SnO₂ libera um elétron diretamente na superfície da camada eletricamente carregada do sensor (Miller *et al.* 2006).

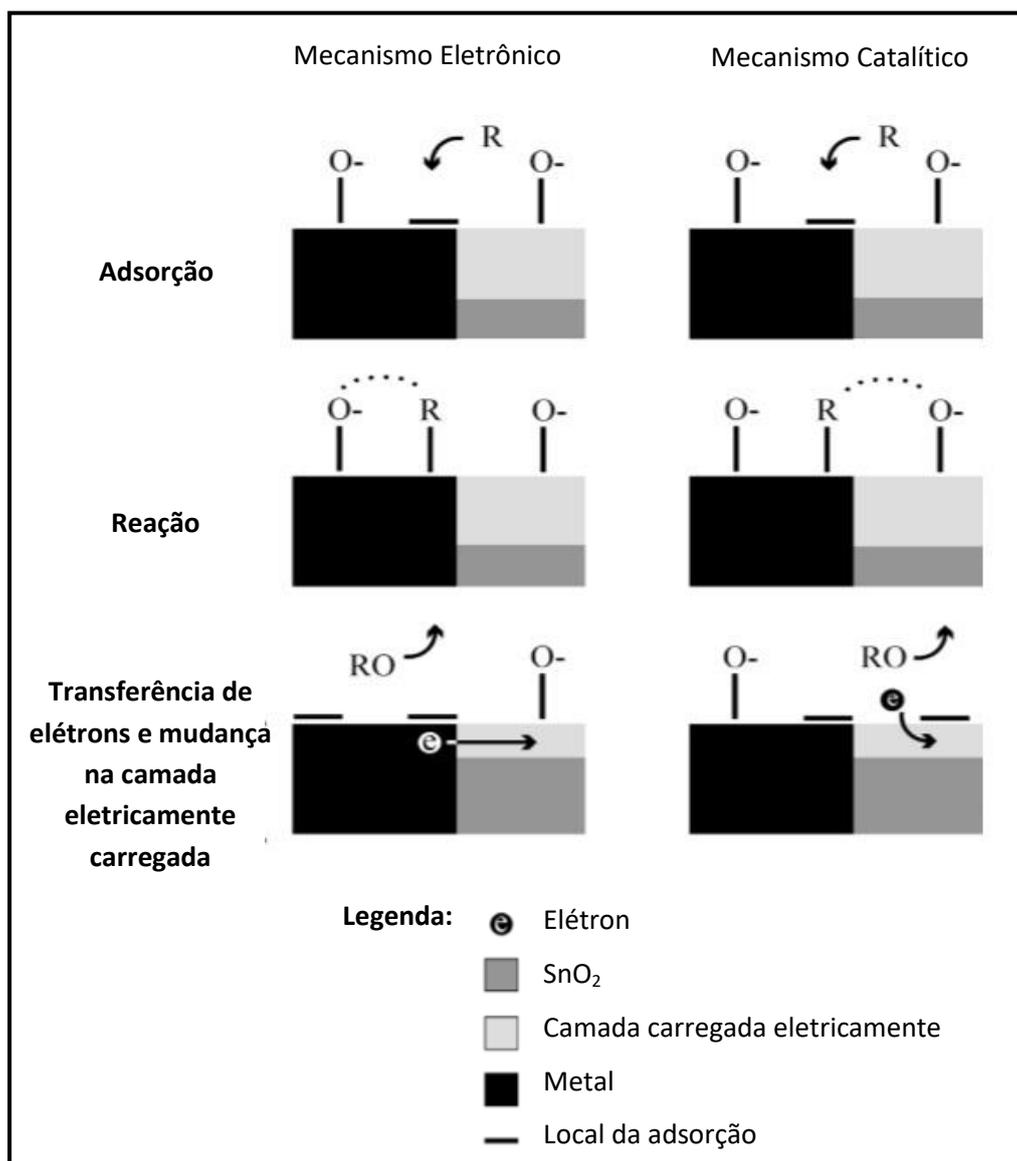


Figura 12: Representação esquemática dos mecanismos de resposta do sensor de SnO₂ dopado com um metal, na presença de um gás redutor (R), segundo os mecanismos eletrônico e catalítico (adaptado de: Miller *et al.* 2006).

Já no mecanismo eletrônico ou mecanismo de controle da energia de Fermi (a energia do nível ocupado mais energético à temperatura de zero kelvin pelos elétrons)

(Gallas 2002), a reação do gás redutor ocorre na superfície do dopante metálico, diferentemente do mecanismo catalítico, e esta reação libera um elétron que será transportado para a superfície do SnO₂, o que acarreta em uma mudança na densidade eletrônica próxima ao SnO₂ e uma consequente diminuição da resistência. A diferença principal entre os dois mecanismos reside no fato de que a transferência, no mecanismo eletrônico, é de elétron, e no mecanismo catalítico, é de átomo (Miller *et al.* 2006; Yamazoe *et al.* 1983).

É importante ressaltar que, embora estes dois mecanismos propostos na literatura fundamentem hipóteses consistentes para tentar compreender a influência do dopante no sensor, ainda se tem grandes dificuldades em explicar com total clareza o mecanismo de ação de um dopante no sensor de SnO₂, o que limita os dois mecanismos propostos, já tendo sido encontrados, na literatura, experimentos com sensores de gás de SnO₂ dopados que não podem ter os seus resultados puramente explicados por um dos dois mecanismos (Miller *et al.* 2006; Yamazoe *et al.* 1983).

Um terceiro mecanismo proposto para explicar a resposta de um sensor de SnO₂ que, no trabalho de Montmeat *et al.* (2003), foi dopado com o elemento ouro, leva em consideração a formação de uma nova espécie de oxigênio adsorvido altamente ionizado, nos limites entre as moléculas de gás, as partículas do sensor de SnO₂ e as partículas de ouro (Montmeat *et al.* 2003)

Os dopantes influenciam de diversas formas o desempenho do sensor, tais como mudanças no comprimento de Debye dos elétrons, na morfologia das partículas do sensor, nas propriedades de interação gás-superfície do sensor, entre outros; o que torna o entendimento da ação do dopante no desempenho do sensor, assim como a escolha do melhor dopante e do melhor método de dopagem, um desafio ainda aos pesquisadores (Miller *et al.* 2006; Montmeat *et al.* 2003).

2.5.1. Parâmetros de desempenho característicos para sensores de gás

Os parâmetros utilizados para caracterizar o desempenho de um sensor de gás são a sensibilidade, seletividade, estabilidade, limite de detecção, intervalo dinâmico, linearidade, resolução, tempo de resposta, tempo de recuperação, temperatura de trabalho, histerese e ciclo de vida; além da energia de consumo para funcionamento e o custo de fabricação. Um sensor ideal é um sensor que atenda, da melhor maneira possível, a todos estes parâmetros (Liu *et al.* 2012).

O tempo de recuperação diz respeito ao tempo necessário para que o sensor retorne ao seu valor inicial, após a concentração do gás alvo mudar, de um valor determinado, para o valor zero. Já a resolução é a menor concentração de um gás alvo que pode ser distinguida pelo sensor, e o intervalo dinâmico é o intervalo de concentração analítico entre o limite de detecção e o limite da maior concentração medida (Bochenkov & Sergeev 2010).

Ciclo de vida refere-se ao período de tempo em que o sensor consegue operar normalmente, temperatura de trabalho é a temperatura onde se tem a maior sensibilidade do sensor e histerese está relacionada à máxima diferença dos valores de saída de um intervalo de maior e menor concentração de um gás (Bochenkov & Sergeev 2010).

Linearidade é um desvio experimental calculado com base na curva de calibração do sensor a partir de uma linha reta ideal, e limite de detecção é a menor concentração que pode ser detectada pelo sensor, dadas certas condições de trabalho. A estabilidade é a habilidade do sensor em fornecer bons resultados por certo período de tempo e está, dessa forma, relacionada a outros parâmetros de caracterização do sensor (Bochenkov & Sergeev 2010; Liu *et al.* 2012).

Dentre os parâmetros citados, os mais importantes na avaliação do desempenho do sensor são a sensibilidade, seletividade e o tempo de resposta do sensor (Liu *et al.* 2012). A seletividade está relacionada à capacidade do sensor em responder à presença de um gás alvo, presente em uma mistura de gases, ou, em outras palavras, a seletividade diz respeito à quão seletivo é o sensor para detectar a presença de um determinado gás em separado ou presente em uma mistura gasosa (Bochenkov & Sergeev 2010).

A sensibilidade do sensor (S) é alteração do sinal medido, por unidade de concentração do gás alvo (Bochenkov & Sergeev 2010; Bose *et al.* 2004). Pode ser definida, tanto para gases oxidantes quanto para gases redutores, pela razão entre a resistência do sensor na presença de um gás de referência (R_a), e a resistência do sensor na presença do gás alvo (R_g), podendo este estar contido em uma mistura gasosa, conforme a equação (5), ambos os gases na mesma temperatura (Kumar *et al.* 2014; Liu *et al.* 2012):

$$S = \left(\frac{R_a}{R_g} \right) \quad (5)$$

Pode ainda ser definida como o valor mínimo de volume de concentração de um gás alvo, em uma mistura gasosa, onde o sensor tem a capacidade de detectar a presença deste gás alvo, sendo, dessa forma, melhor a sensibilidade do sensor quanto menor foi este valor mínimo (Bose *et al.* 2004; Liu *et al.* 2012).

O tempo de resposta de um sensor de gás é o tempo necessário para o sensor responder à mudança de um valor zero, para um determinado valor de concentração de um gás alvo (Bochenkov & Sergeev 2010). Em outras palavras, tempo de resposta é o período de tempo a partir do qual a concentração de gás, ao atingir um valor específico, pode ser identificada, através da emissão de um sinal, pelo sensor de gás (Liu *et al.* 2012).

Metodologia

3.1 ETAPAS E MATERIAIS

O presente trabalho foi realizado a partir de diversas etapas complementares, laboratorial, de aquisição e interpretação dos dados (Figura 13). A pesquisa bibliográfica foi realizada intermitentemente ao longo de todo o trabalho, com o intuito de compreender e contextualizar o foco do trabalho, e atualizar sobre todos os estudos já realizados e/ou em andamento sobre o mesmo.

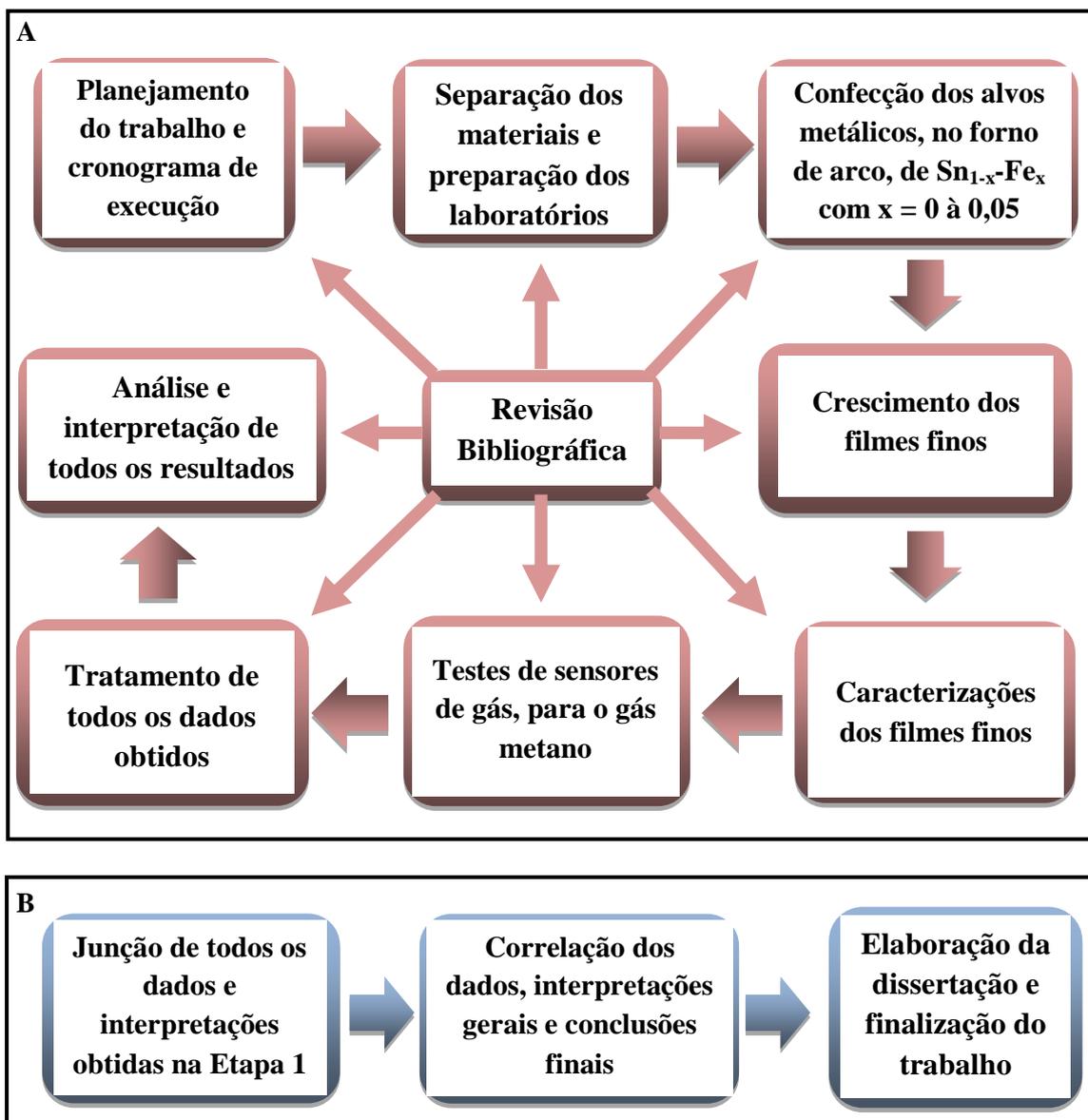


Figura 13: Organograma das principais etapas realizadas no trabalho: (A) Etapa 1; (B) Etapa 2.

A parte laboratorial do trabalho consistiu em etapas específicas (Figura 14) de crescimento dos filmes finos a partir de alvos de $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x$, com $x = 0$ à 0.05 .

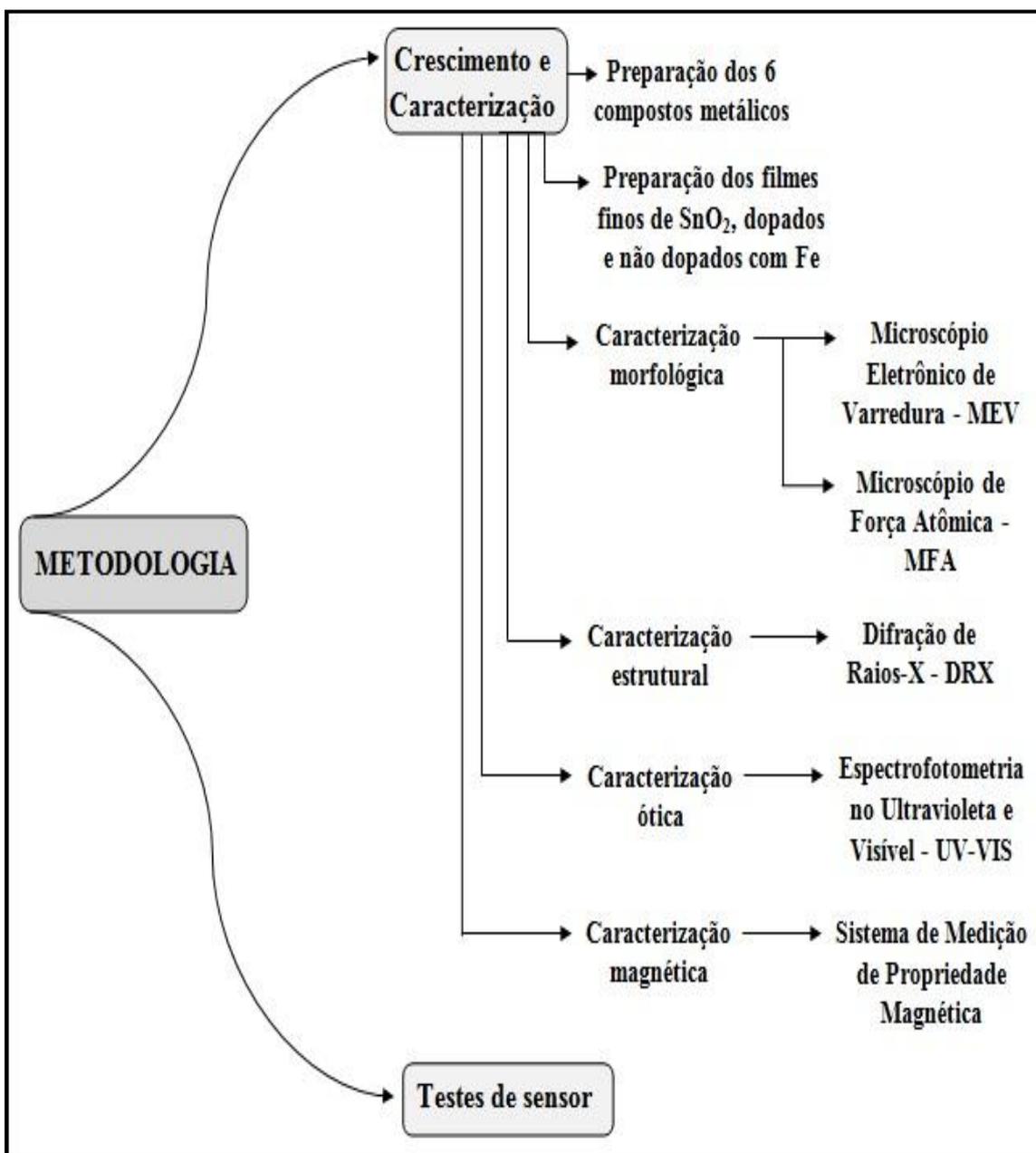


Figura 14: Desenho esquemático das etapas específicas realizadas no trabalho.

O crescimento, caracterização e testes do desempenho dos filmes finos como sensores de gases foram realizados nos laboratórios da Universidade de Brasília (UnB). Especificamente, o crescimento dos filmes finos (Figura 15), caracterização morfológica por Microscopia de Força Atômica (MFA), caracterização ótica pela Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível (UV-VIS), medida magnética e testes de sensibilidade como sensor ao gás metano foram realizados no Núcleo de Física Aplicada do Instituto de Física (Figura 16).



Figura 15: Laboratórios para preparação: (A) Do alvo metálico; (B) Dos filmes finos.

A caracterização morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no Instituto de Ciências Biológicas da UnB e, por fim, a caracterização estrutural por Difractometria de Raios-X (DRX), foi realizada no Instituto de Geociências da UnB (Figura 16).



Figura 16: Laboratórios para a caracterização estrutural e magnética dos filmes finos: (A) Espectrofotômetro no Ultravioleta-Visível; (B) Microscópio de Força Atômica (foto comercial disponível no site da empresa responsável); (C) Sistema de Medição de Propriedades Magnéticas; (D) Microscópio Eletrônico de Varredura; (E) Sistema de Difração de Raios-X.

Os materiais, equipamentos e reagentes químicos utilizados neste trabalho encontram-se listados nas Tabelas 1, 2 e 3, em ordem alfabética.

Tabela 1: Listagem dos materiais utilizados no trabalho.

Materiais	Especificações	Marca	Modelo
Ácido nítrico (HNO ₃)	PA: 70%, 1000ml	Dinâmica	não há
Álcool isopropílico (C ₃ H ₈ O)	PA: ACS, 1000ml	Dinâmica	não há
Balança analítica	não há	Shimadzu	AUW220D
Béqueres pequenos	de vidro, 25ml	Phox	não há
Bomba de vácuo mecânica	de 24 quilos	Edwards	RV5
Bomba turbo	não há	Edwards	WRG
Cabos de alta corrente	plugue banana, de 50cm	não há	não há
Cadinhos	não refratário, de cerâmica	não há	não há
Caixa com algodão	hidrófilo	Apolo	não há
Calculadora científica	não há	Casio	fx-82MS
Câmara de vácuo	montada no laboratório do trabalho	não há	não há
Câmara para teste de gás (Calibrador portátil de calor)	fechada, com entrada e saída de gás, calibra a temperatura.	Hart Scientific	9140 HDRC
Caneta de corte de vidro	corte de lâminas em linha reta, ponta de diamante	Toyo®	não há
Caneta marcadora	preta, resistente a solvente	Bel-pen	não há
Cotonetes	não há	Johnson & Johnson	não há
Espectrofotômetro no Ultravioleta-Visível	não há	Shimadzu	UV-2600
Estação de Solda	analógica profissional, ajustável, 450°C	Toyo®	Ts900
Fio de cobre encapado	0.2mm de espessura	não há	não há

Tabela 2: Continuação da listagem dos materiais utilizados no trabalho.

Material	Especificações	Marca	Modelo
Fio de solda de estanho	resinoso, 1.0mm de espessura	Cast	não há
Fita adesiva isolante	transparente e amarronzada	não há	não há
Fita dupla face	não há	Adelbras	não há
Forno de arco	não há	Centorr Vacuum Industries	não há
Forno de tratamento térmico	não há	Carbolite	CWF 1300
Frascos recipientes	confeccionados em plástico transparente, com tampa, de 3ml	não há	não há
Garrafa pet	garrafa de plástico transparente de 2 litros, vazia	não há	não há
Lâminas para microscopia	de vidro, lisa e com a ponta fosca, de dimensões 26mm x 76mm e espessura de 1.2mm	Bioslide	não há
Luvas de látex	descartável	Descarpack	não há
Microscópio de Força Atômica	com controlador Nanosurf® Easy Scan 2 e ponteira Budget Sensors Tap150Al-G com recobrimento de alumínio	Nanosurf®	Flex-Axiom AFM
Microscópio Eletrônico de Varredura	não há	Jeol	JSM-7001F
Mistura de gás comprimido	96.0% mol/mol de argônio e 4.0% mol/mol de hidrogênio, volume de 0.4m ³ e pressão de 168kgf/cm ²	White Martins	não há
Mistura gasosa sob pressão	4% de metano e hélio (balanço), volume de 7.1m ³ e pressão de 168kgf/cm ²	White Martins	não há
Multímetro Digital	não há	Keithley	196 System
Palito roliço de madeira	não há	Gina	não há

Tabela 3: Término da listagem dos materiais utilizados no trabalho.

Material	Especificações	Marca	Modelo
Papel toalha	interfolha	Kleenex	não há
Pinça de dissecação anatômica	não há	Caal	não há
Pinça metálica para laboratório	não há	Caal	não há
Pinça tenaz para cadinhos	não há	Caal	não há
Prensa hidráulica	para 15 toneladas	Til Marcon	MPH-15
Recipiente com fragmentos de estanho	99.999% do metal principal	Alfa Aesar	não há
Recipiente com fragmentos de ferro	99.99% do metal principal	Alfa Aesar	não há
Sistema de Difração de Raios-X	não há	Ultima IV	Rigaku
Sistema de Medição de Propriedade Magnética	Com magnetômetro SQUID	Quantum Design	MPMS 3
Sonicador	não há	Ultrasonic Cleaner	8845-5
Tesoura	escolar	Tramontina	não há
Tinta condutiva de prata	cola de prata ou tinta condutora, própria para eletrônica	não há	não há
Toalha de papel para vidros de laboratórios	especial, extra-macia	não há	não há
Tubo pequeno de metal	com rosca interna, de 1cm de comprimento, feito sob medida no laboratório do trabalho, para enroscamento no eletrodo	não há	não há

3.2 CONFECÇÃO DOS ALVOS METÁLICOS, DE $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x$, COM $x = 0$ À 0.05

3.2.1. Cálculo estequiométrico para a preparação dos alvos metálicos

Para a preparação dos seis alvos metálicos de Sn/Fe utilizados neste trabalho em concentrações de Fe, de 0 a 5%, foi realizado um cálculo estequiométrico para definir a quantidade, em massa, de cada elemento em cada alvo metálico.

Sendo a massa total de cada alvo metálico confeccionado igual a 1.0 grama, o alvo de Sn foi feito apenas com o elemento Sn, em 1.0 grama de massa. Dessa forma, os fragmentos de Sn foram pesados, na balança analítica, até a mesma constatar 1.0 grama de material pesado, para posteriormente serem prensados.

Já para os alvos de Sn com Fe, o seguinte cálculo estequiométrico foi feito para definir quantos gramas de Sn e Fe seriam pesados, na balança analítica, para confeccionar cada alvo:

Considerando a massa total de cada alvo metálico como 1.0 grama, e transformando esta massa para um cálculo em percentual, tem-se que a massa total (soma das massas individuais de Sn e Fe) equivale à 100%, conforme apresentado pela equação (6). Como as concentrações de Fe variam de alvo para alvo, de 1 a 5% de Fe, pode-se calcular que, em $x\%$ de Fe, $(100\% - x\%)$ será o percentual de Sn em cada alvo.

$$x\% \text{ de Fe} + (100\% \text{ de Sn} - x\% \text{ de Fe}) = 100\% \text{ de SnFe} \quad (6)$$

Chamando por n o número de mols de cada elemento e M a massa molar (g/mol) deste elemento, e sendo a massa (m), em gramas, de um elemento, igual à massa molar multiplicada pelo número de mols deste elemento, pela equação (7) tem-se:

$$m \text{ (gramas)} = M \text{ (grama/mol)} \times n \text{ (mols)} \quad (7)$$

Como, neste trabalho, o percentual de Sn e Fe variam de liga para liga, o cálculo da massa, em gramas, dos elementos, está diretamente relacionado não apenas à massa molar e ao número de mols, como também à concentração percentual de cada elemento, como pode ser demonstrado pelas equações (8) e (9) :

$$m \text{ (gramas/elemento)} = M \text{ (grama/mol)} \times n \text{ (mols)} \times \text{concentração (\%)} \quad (8)$$

$$m_{\text{SnFe}} = [(x\%) (\mathbf{n}_{\text{Fe}}) (\mathbf{M}_{\text{Fe}})] + [(100\% - x\%) (\mathbf{n}_{\text{Sn}}) (\mathbf{M}_{\text{Sn}})] \quad (9)$$

Então, em 1g do alvo metálico de SnFe, calcula-se, conforme a equação (10), que:

$$1\text{g} = [(x\%) (\mathbf{n}_{\text{Fe}}) (\mathbf{M}_{\text{Fe}})] + [(100\% - x\%) (\mathbf{n}_{\text{Sn}}) (\mathbf{M}_{\text{Sn}})] \quad (10)$$

Definindo, pela regra de três, a relação entre \mathbf{n}_{Sn} e \mathbf{n}_{Fe} de acordo com a equação (11):

$$\begin{array}{l} \mathbf{n}_{\text{Sn}} \text{-----} (100\% - x\%) \\ \mathbf{n}_{\text{Fe}} \text{-----} x\% \end{array}$$

$$\mathbf{n}_{\text{Sn}} = \frac{(100\% - x\%) \mathbf{n}_{\text{Fe}}}{x\%} \quad (11)$$

Substituindo \mathbf{n}_{Sn} na equação (10), acima, e dados que, a massa molar do elemento Sn (\mathbf{M}_{Sn}) é igual a 118,7g/mol e a massa molar do elemento Fe (\mathbf{M}_{Fe}) igual a 55,8 g/mol; é possível calcular, assim, os números de mols do elemento Fe (\mathbf{n}_{Fe}) e, posteriormente, do elemento Sn (\mathbf{n}_{Sn}).

Para finalizar o cálculo estequiométrico de cada alvo metálico, substitui-se os valores encontrados para o número de mols de cada elemento na equação (8), tendo assim, em 1 grama de cada alvo metálico de SnFe com x% de concentração de Fe, as massas a serem pesadas, na balança analítica, do elemento Sn e do elemento Fe.

A Tabela 4 mostra os valores calculados, em grama, das massas de Fe e Sn para cada alvo metálico produzido neste trabalho.

Tabela 4: Massas calculadas, dos elementos Sn e Fe, para cada $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x$.

Alvo metálico	Sn (gramas)	Fe (gramas)
Sn-Fe 1%	0,9952	0,0048
Sn-Fe 2%	0,9904	0,0096
Sn-Fe 3%	0,9856	0,0144
Sn-Fe 4%	0,9805	0,0195
Sn-Fe 5%	0,9750	0,0250

3.2.2. Etapas e equipamentos de preparação dos alvos metálicos

Após a pesagem de cada elemento na balança analítica, para cada alvo metálico, os mesmos foram transferidos para o equipamento Forno de Arco (Figura 17A), para fundir os elementos, em atmosfera de argônio puro, formando assim um alvo metálico de $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x$, com $x = 0$ até 0.05 . Posteriormente, todos os alvos foram prensados por cinco toneladas, na prensa hidráulica (Figura 17B), assumindo uma superfície plana e de formato circular.



Figura 17: Equipamentos para fazer o alvo metálico: (A) Forno de arco; (B) Prensa hidráulica.

A preparação dos alvos metálicos seguiu etapas consecutivas (Figura 18) e relacionadas, desde os cálculos estequiométricos ao tratamento térmico dos alvos.

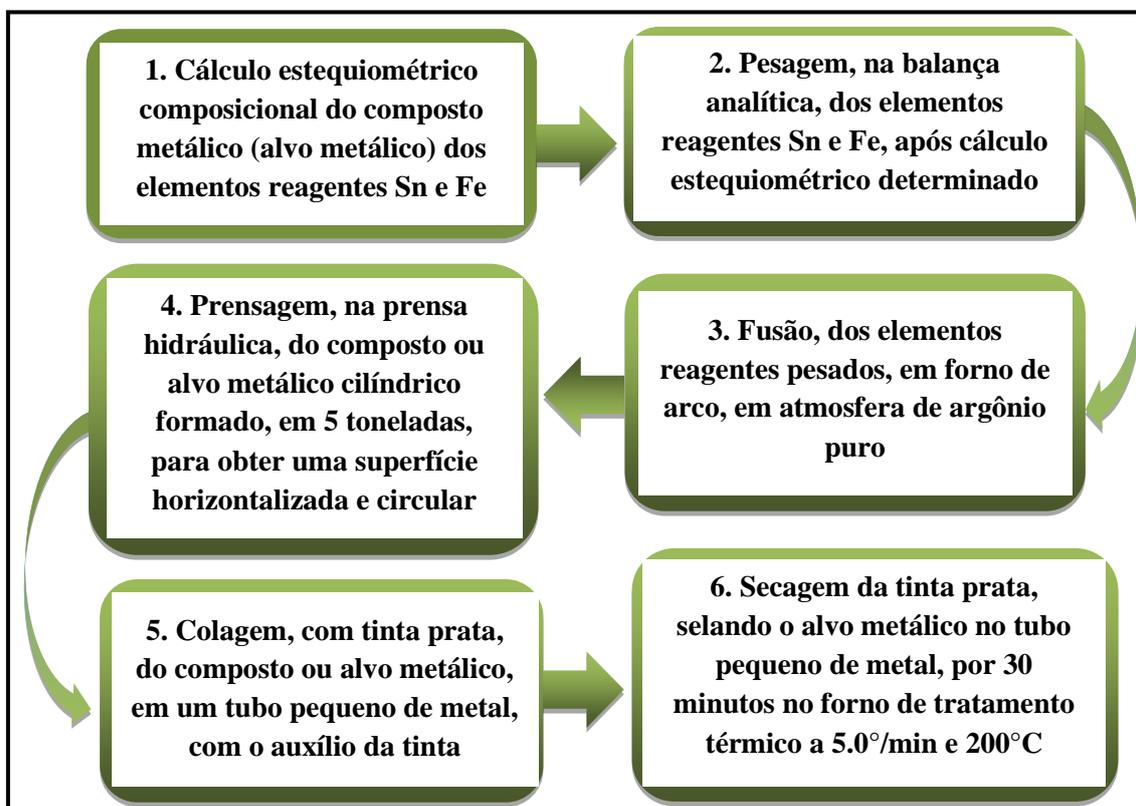


Figura 18: Organograma das etapas realizadas para confeccionar os alvos metálicos.

Os alvos metálicos preparados (Figura 19) foram utilizados na fabricação dos filmes de SnO₂, dopados ou não dopados com o elemento Fe, de acordo com o alvo metálico selecionado, sendo os filmes finos os principais materiais deste trabalho.

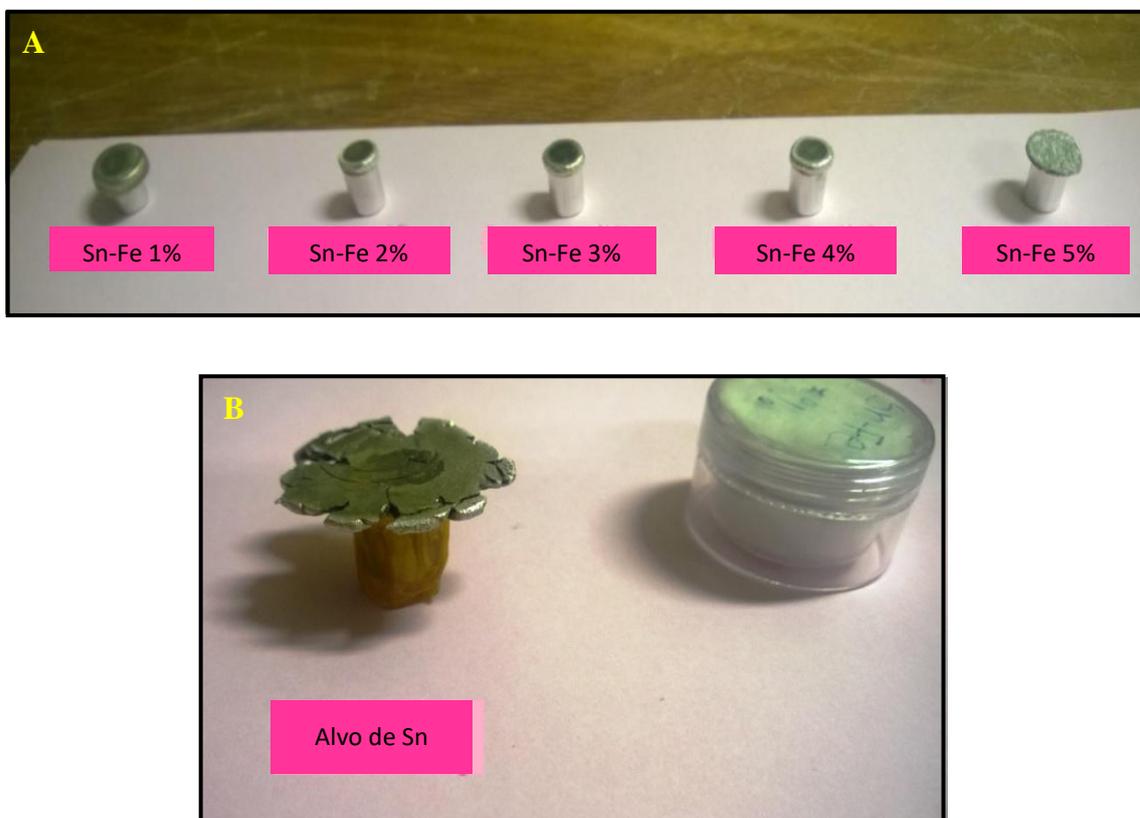


Figura 19: Compostos ou alvos metálicos preparados: (A) Alvo metálico de Sn e Fe, em ordem crescente de concentrações de Fe, da esquerda para a direita, indicadas abaixo de cada alvo; (B) Alvo metálico de Sn.

3.3 CRESCIMENTO DOS FILMES FINOS PELA TÉCNICA DE PULVERIZAÇÃO CATÓDICA

A preparação dos filmes finos também seguiu etapas consecutivas (Figuras 20, 21, 22 e 23) e relacionadas, ocorrendo posteriormente à etapa de preparação dos alvos metálicos, por meio da técnica de Pulverização Catódica com corrente contínua, em atmosfera de argônio/oxigênio, onde, numa câmara de vácuo montada no laboratório do Instituto de Física (Figuras 24 e 25), foram crescidos os filmes finos.

Os filmes finos foram depositados em substratos de vidro (lâminas para microscopia), duas por vez, sendo uma para as caracterizações e outra para os testes como sensor (Figuras 26, 27, 28 e 29).

O alvo metálico, colocado no cátodo da câmara, teve a sua superfície bombardeada pelo gás argônio ionizado, sendo que, os átomos do alvo foram ejetados e depositados no substrato de vidro, colocado no ânodo, em temperatura ambiente e em atmosfera oxidante, formando uma estrutura cristalina tipo rutilo de $(\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{O}_2$, nos filmes com $x = 0$ até 5% de Fe.

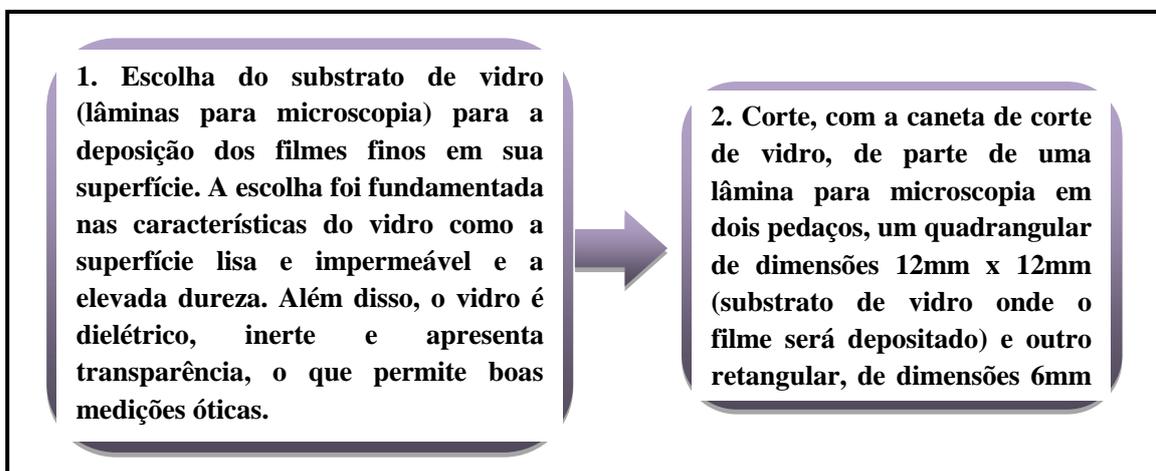


Figura 20: Organograma com as etapas de escolha e corte do substrato de vidro para a deposição do filme fino em sua superfície.

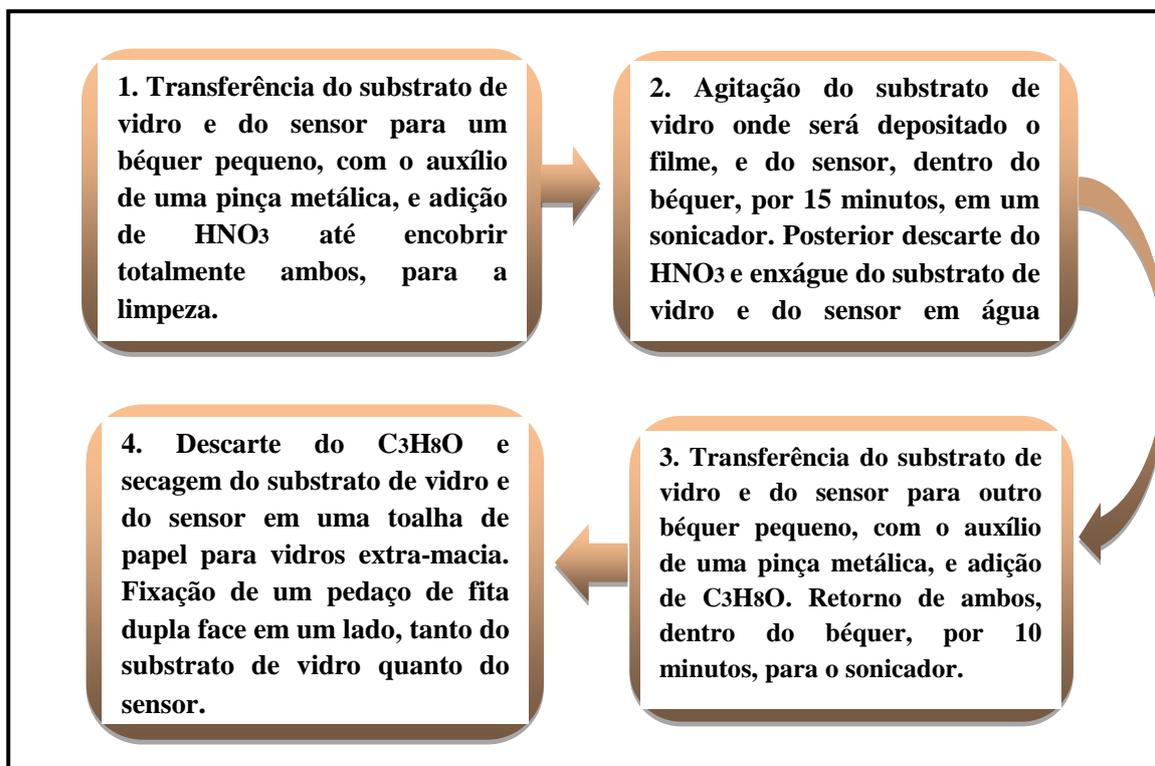


Figura 21: Organograma com as etapas de preparo do substrato de vidro para a deposição do filme fino em sua superfície.

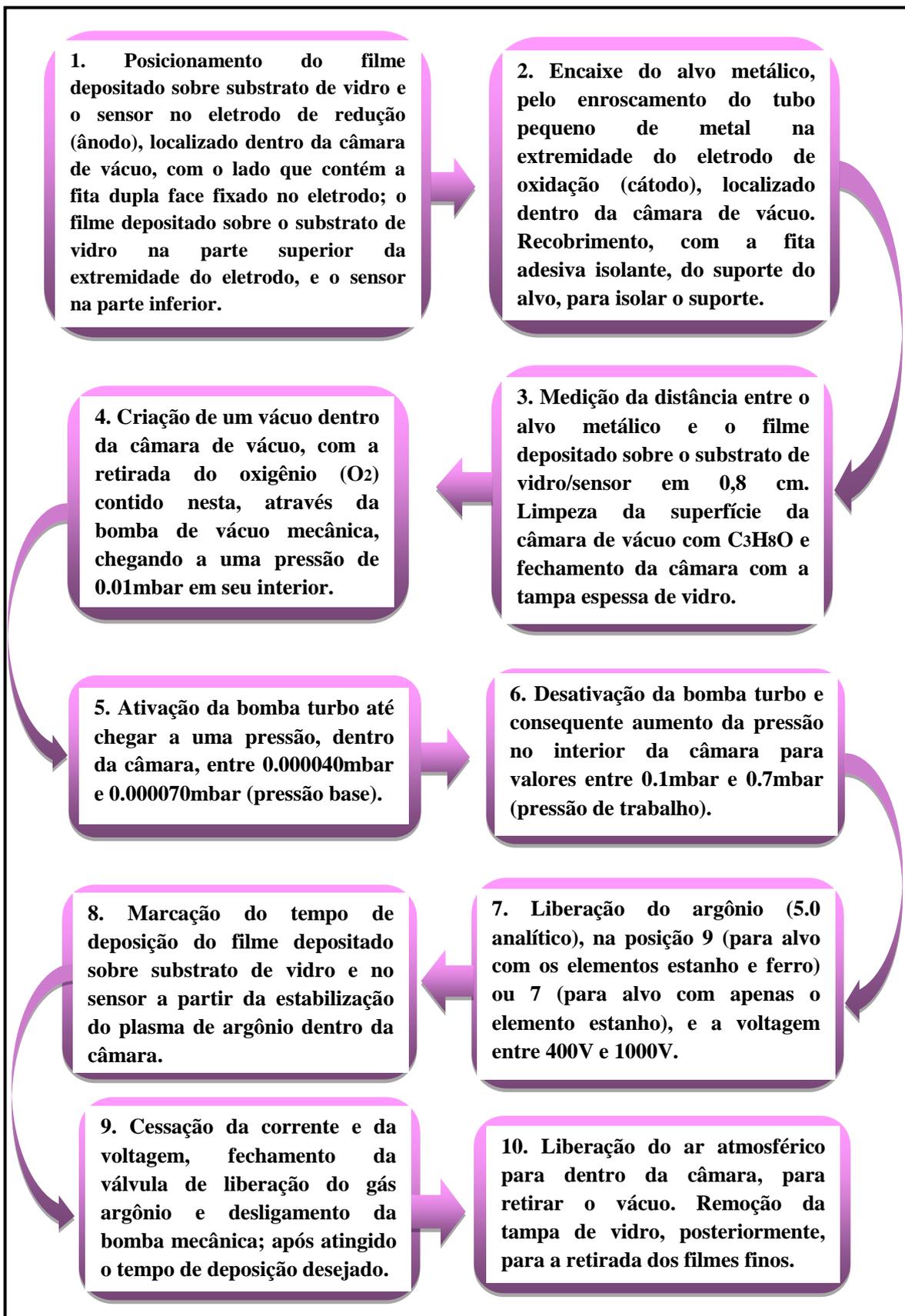


Figura 22: Organograma com as etapas de deposição do filme fino no substrato de vidro.

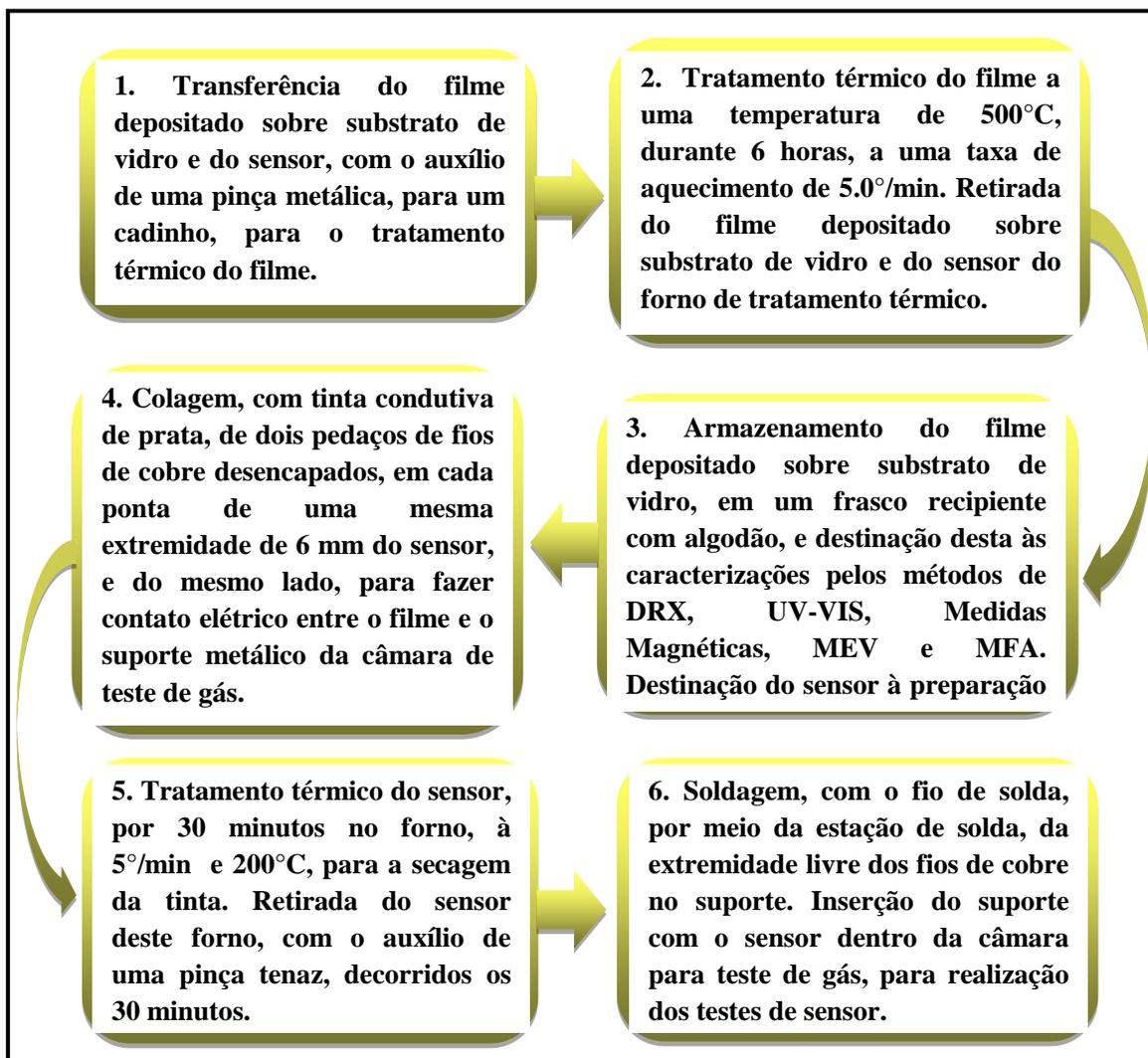


Figura 23: Organograma com as etapas de tratamento térmico e cristalinização dos filmes finos.

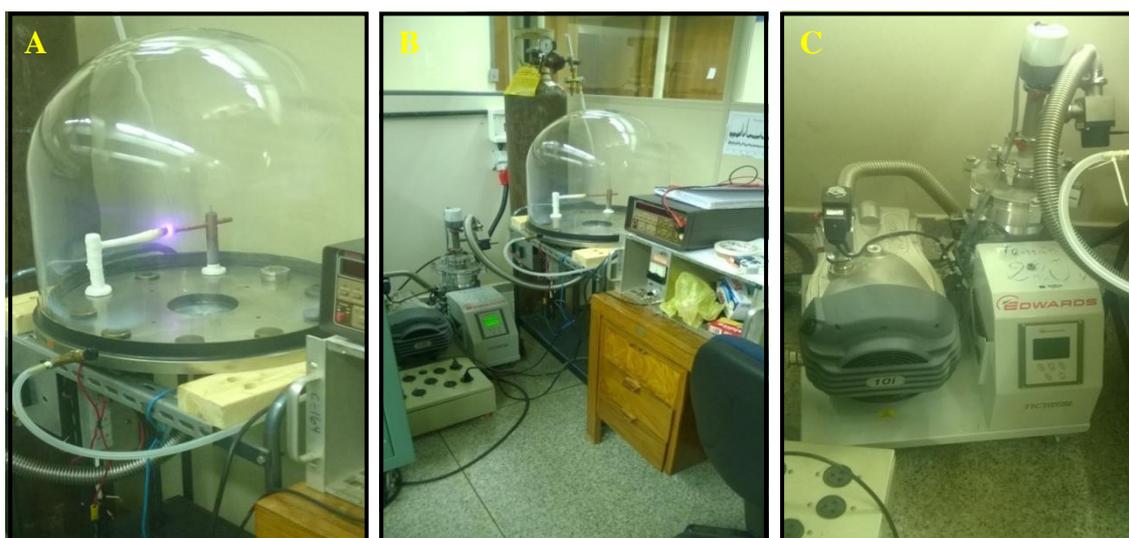


Figura 24: Equipamento montado no laboratório do trabalho, para a preparação dos filmes finos: (A) Câmara fechada de vácuo, evidenciando a presença do plasma em seu interior, no momento de deposição de um filme fino; (B) Equipamento completo de preparação de filmes finos; (C) Bombas, mecânica e turbo, respectivamente, da esquerda para a direita, utilizadas para fazer o vácuo dentro da câmara.

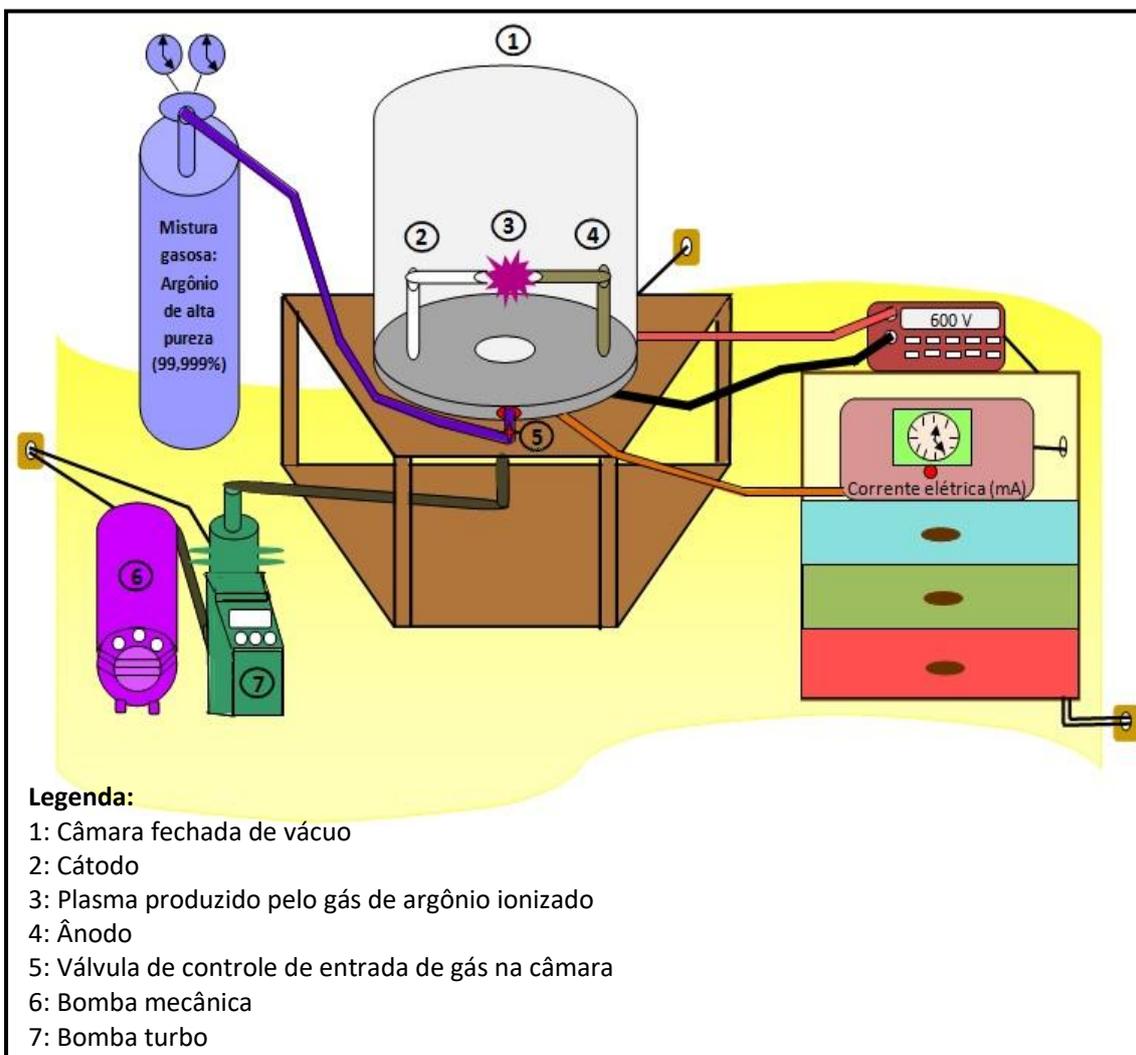


Figura 25: Desenho do equipamento montado no laboratório do trabalho, para a preparação dos filmes finos, especificando as principais partes deste equipamento.

Para cada alvo metálico houveram condições particulares de deposição dos dois filmes finos (Tabelas 5, 6 e 7). A distância alvo-substrato, que é a distância, em centímetros, entre o alvo metálico e a lâmina para microscopia onde o filme fino foi depositado, foi padronizada em 0.8cm para todos os alvos. O mesmo ocorreu para as condições de potência em que o filme foi depositado, em 4W.

Uma vez que a variação do tempo de deposição está diretamente relacionada à espessura do filme fino, influenciará consideravelmente na resposta de cada sensor à presença do gás metano (Rothschild & Komem 2004).

Primeiramente, quatro filmes finos de SnO_2 dopados apenas com a concentração de 5% do elemento Fe, foram crescidos em quatro diferentes tempos de deposição, entre 1 e 4 horas. Este estudo teve por objetivo a escolha do melhor tempo de deposição (espessura), considerando, para isso, o tempo gasto na preparação do filme e o parâmetro sensibilidade, como sensor.

Com base nas respostas dos testes de sensor obtidas por estes quatro filmes finos de SnO₂ dopados com 5% de Fe, ficou estabelecido, para este trabalho, que o melhor tempo de deposição para os filmes finos, para atingir o objetivo, foi o tempo de 2 horas. A partir desta determinação os demais alvos metálicos, com dopagens de 1, 2, 3 e 4% de Fe, foram confeccionados no tempo padrão de deposição de 2 horas, e também o filme sem dopagem de Fe.

Em relação às condições de preparação dos filmes (pressão de trabalho, distância alvo-substrato e potência), procurou-se mantê-las constantes em todos os filmes finos, entretanto, foi observada uma ligeira variação no que diz respeito aos filmes com e sem Fe, atribuída à densidade do material. Para controlar esta variação procurou-se mudar ligeiramente a entrada de gás argônio, mantendo sempre uma potência de 4W, que estaria correlacionada com a taxa de crescimento dos filmes finos.

Tabela 5: Condições de deposição de filmes finos de SnO₂ intrínsecos.

Alvo metálico	Distância alvo-substrato (cm)	Pressão base (mbar)	Pressão de trabalho (mbar)	Posição	Potência (W)	Tempo de deposição
Sn	0,8	0,000064	0,11	7	4	1 hora
Sn	0,8	0,000062	0,13	7	4	2 horas
Sn	0,8	0,000065	0,12	7	4	3 horas
Sn	0,8	0,000067	0,21	7	4	4 horas

Tabela 6: Condições de deposição dos filmes finos de SnO₂ dopados com 5% de Fe.

Alvo metálico	Distância alvo-substrato (cm)	Pressão base (mbar)	Pressão de trabalho (mbar)	Posição	Potência (W)	Tempo de deposição
Sn-Fe 5%	0,8	0,000062	0,11	9	4	1 hora
Sn-Fe 5%	0,8	0,000061	0,12	9	4	2 horas
Sn-Fe 5%	0,8	0,000064	0,12	9	4	3 horas
Sn-Fe 5%	0,8	0,000061	0,12	9	4	4 horas

Tabela 7: Condições de deposição dos filmes finos de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe.

Alvo metálico	Distância alvo-substrato (cm)	Pressão base (mbar)	Pressão de trabalho (mbar)	Posição	Potência (W)	Tempo de deposição
Sn-Fe 1%	0,8	0,000063	0,25	9	4	2 horas
Sn-Fe 2%	0,8	0,000067	0,12	9	4	2 horas
Sn-Fe 3%	0,8	0,000066	0,11	9	4	2 horas
Sn-Fe 4%	0,8	0,000065	0,18	9	4	2 horas
Sn-Fe 5%	0,8	0,000061	0,12	9	4	2 horas

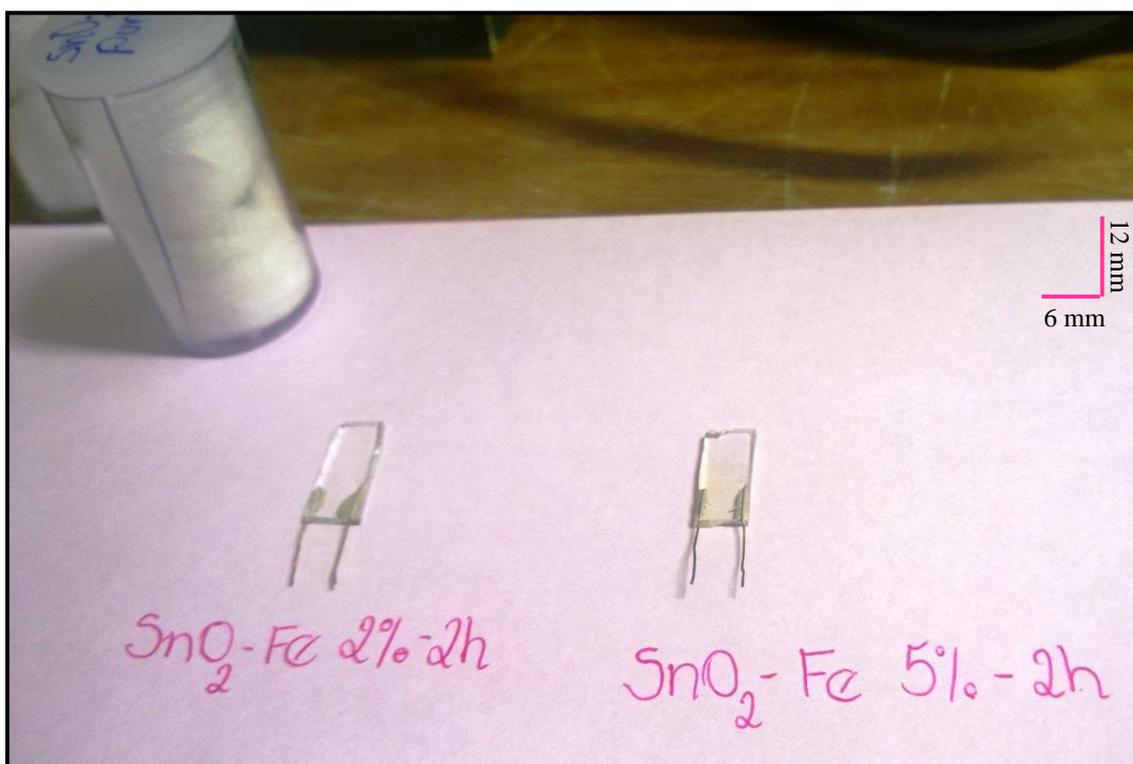


Figura 26: Filmes finos transparentes de SnO₂, dopados com 2% e 5% de ferro, utilizados para os testes como sensores do gás metano, preparados em um tempo de deposição de 2 horas.

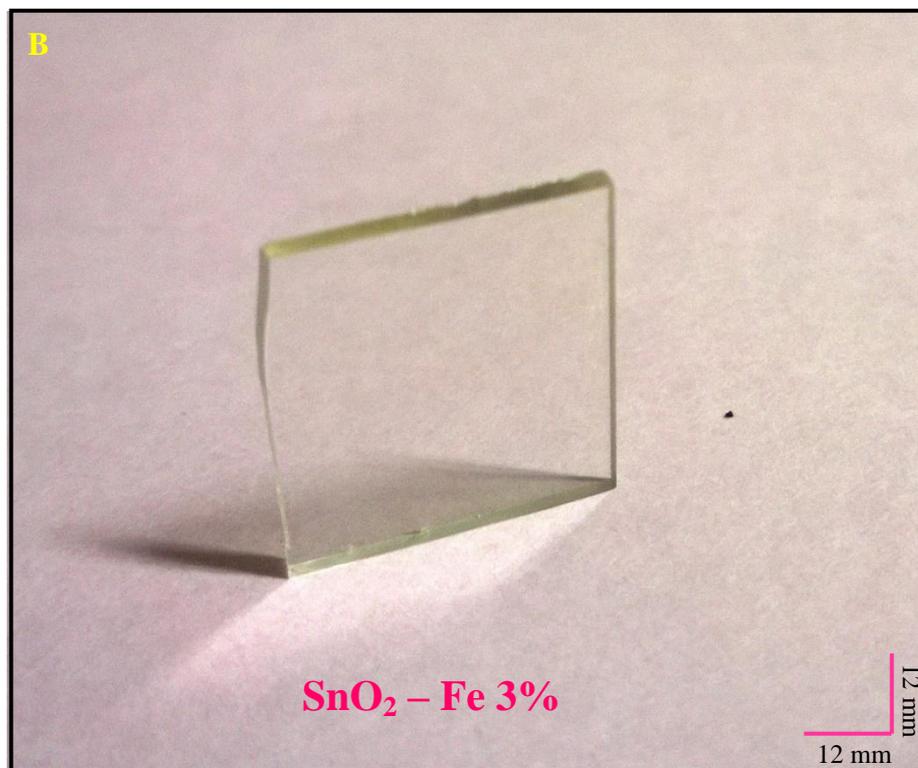
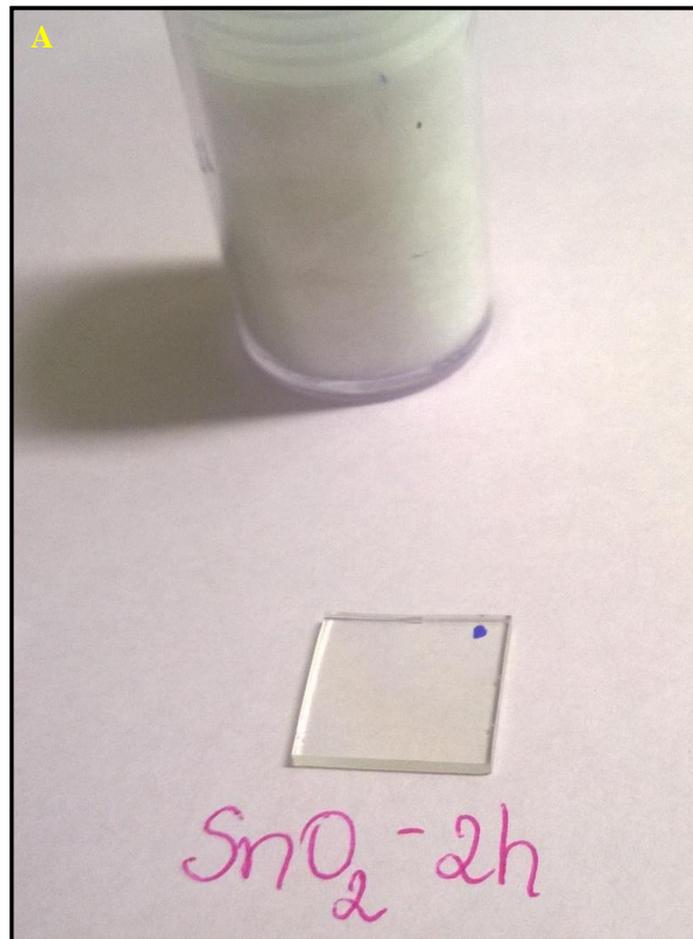


Figura 27: Filmes finos transparentes de SnO_2 intrínseco e dopado com Fe, depositados em 2 horas, utilizados para caracterizações estruturais, óticas, microscópicas e magnéticas: (A) SnO_2 ; (B) SnO_2 dopado com 3% de Fe.

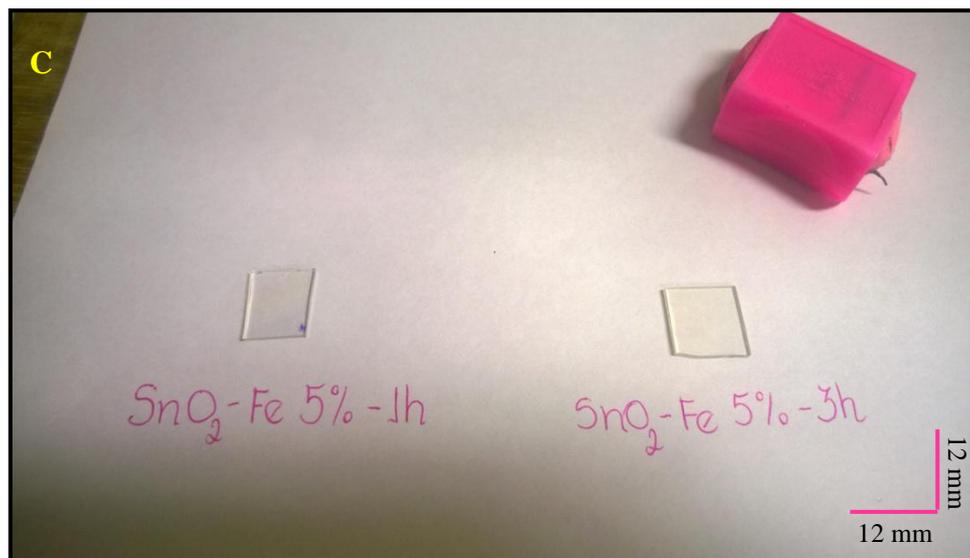
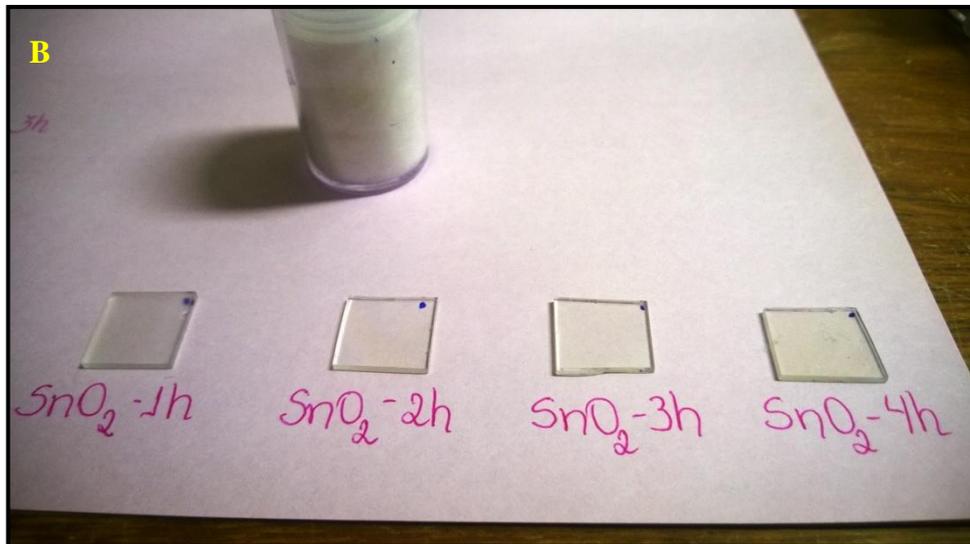
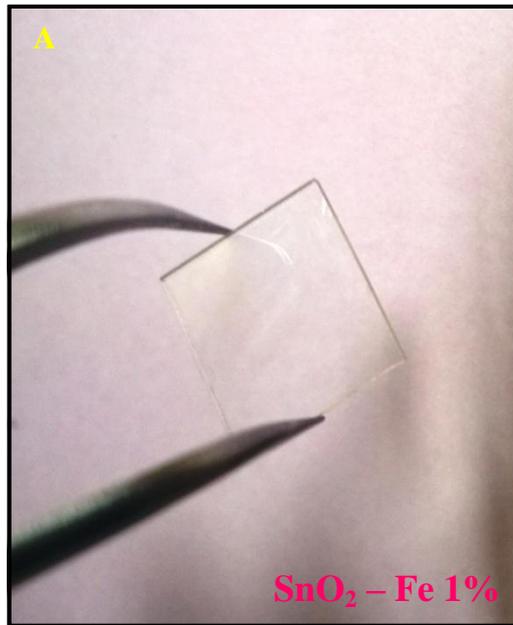


Figura 28: Filmes finos transparentes de SnO_2 dopados e não dopados com Fe, depositados em diferentes tempos, utilizados para caracterizações estruturais, óticas, microscópicas e magnéticas: (A) SnO_2 dopado com 1% de Fe e depositado por 2 horas; (B) SnO_2 depositados no tempo de 1 a 4 horas; (C) SnO_2 dopados com 5% de Fe, depositados por 1 hora e 3 horas.



Figura 29: Substrato de vidro transparente, evidenciando, discretamente, cores sobre a sua superfície que representam o filme fino de SnO₂, depositado pelo tempo de 3 horas.

3.4 PREPARAÇÕES DOS TESTES PARA SENSORES DO GÁS METANO

Com o término da etapa de preparação dos filmes finos, prosseguiu-se com a etapa dos testes de sensores para o gás metano, utilizando-se o sensor de filme fino produzido de cada alvo, conforme explicitado na etapa anterior.

Para a realização dos testes de sensores foi montada uma estrutura adequada (Figuras 30 e 31) que consistiu em um computador, onde se tem instalados programas de computador adequados para o controle programado da temperatura no interior de uma câmara fechada para teste de gás (calibrador portátil de temperatura), e um programa para a medição da variação da resistência, em função do tempo, de cada sensor inserido dentro da câmara fechada, em três situações distintas e sucessivas, sem interrupções, que são com vácuo no interior da câmara, na presença do gás metano em quantidade controlada, e na presença de ar atmosférico.

A câmara fechada continha duas saídas com mangueiras encaixadas, sendo que uma das mangueiras foi inserida em uma garrafa pet com água em seu interior, e a outra mangueira foi ligada ao recipiente de mistura gasosa com 4% de metano/hélio.

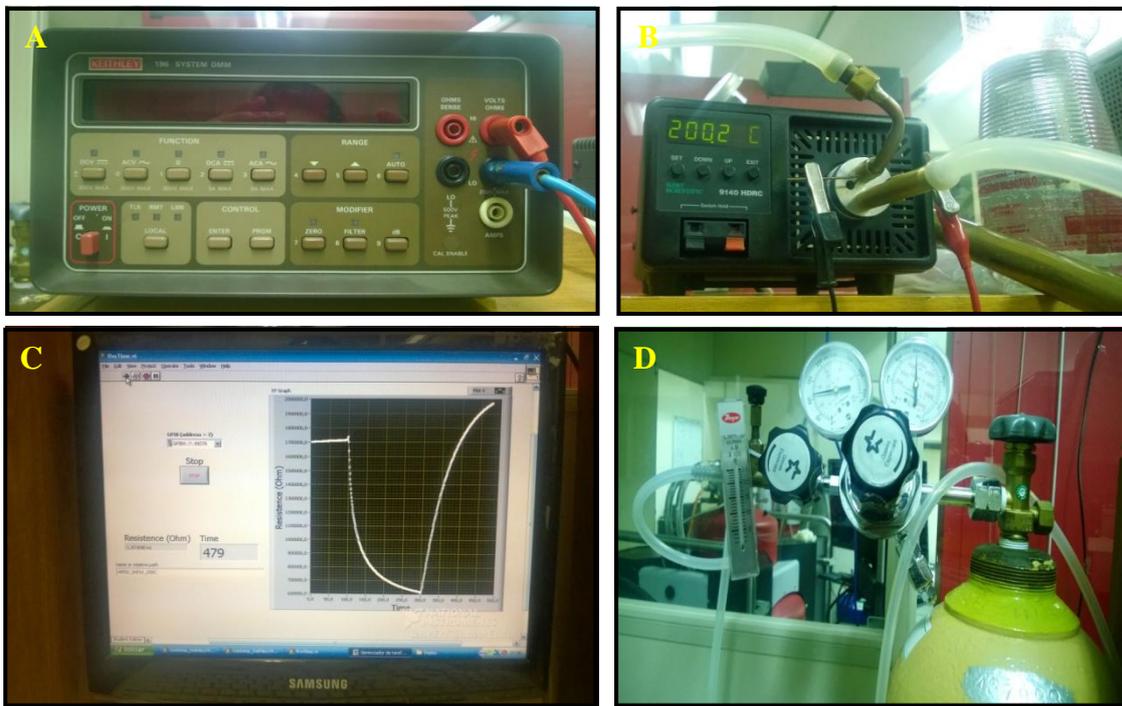


Figura 30: Equipamentos utilizados para o teste de sensor: (A) Multímetro digital; (B) Câmara fechada para teste de gás ou calibrador portátil de calor, fios do multímetro e mangueiras de entrada de ar e de gás, e a garrafa pet, contendo água em seu interior; (C) Computador com os programas do teste instalados; (D) Mistura de gás comprimido contendo 4% de gás metano.

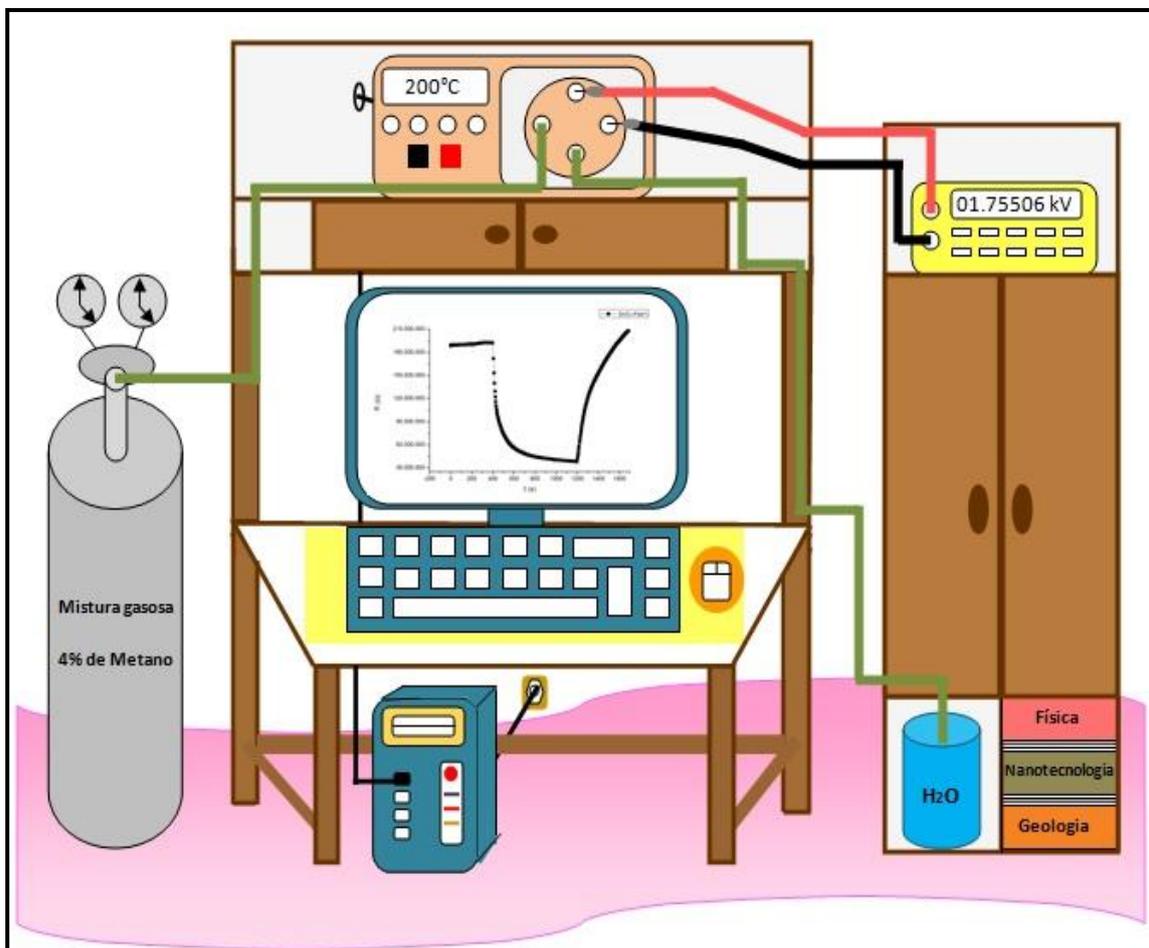


Figura 31: Desenho, representativo, dos equipamentos utilizados para o teste de sensor.

A etapa de testes de sensor, semelhantemente às etapas anteriores, seguiu uma sequência determinada de sub-etapas, relacionadas e consecutivas (Figura 32).

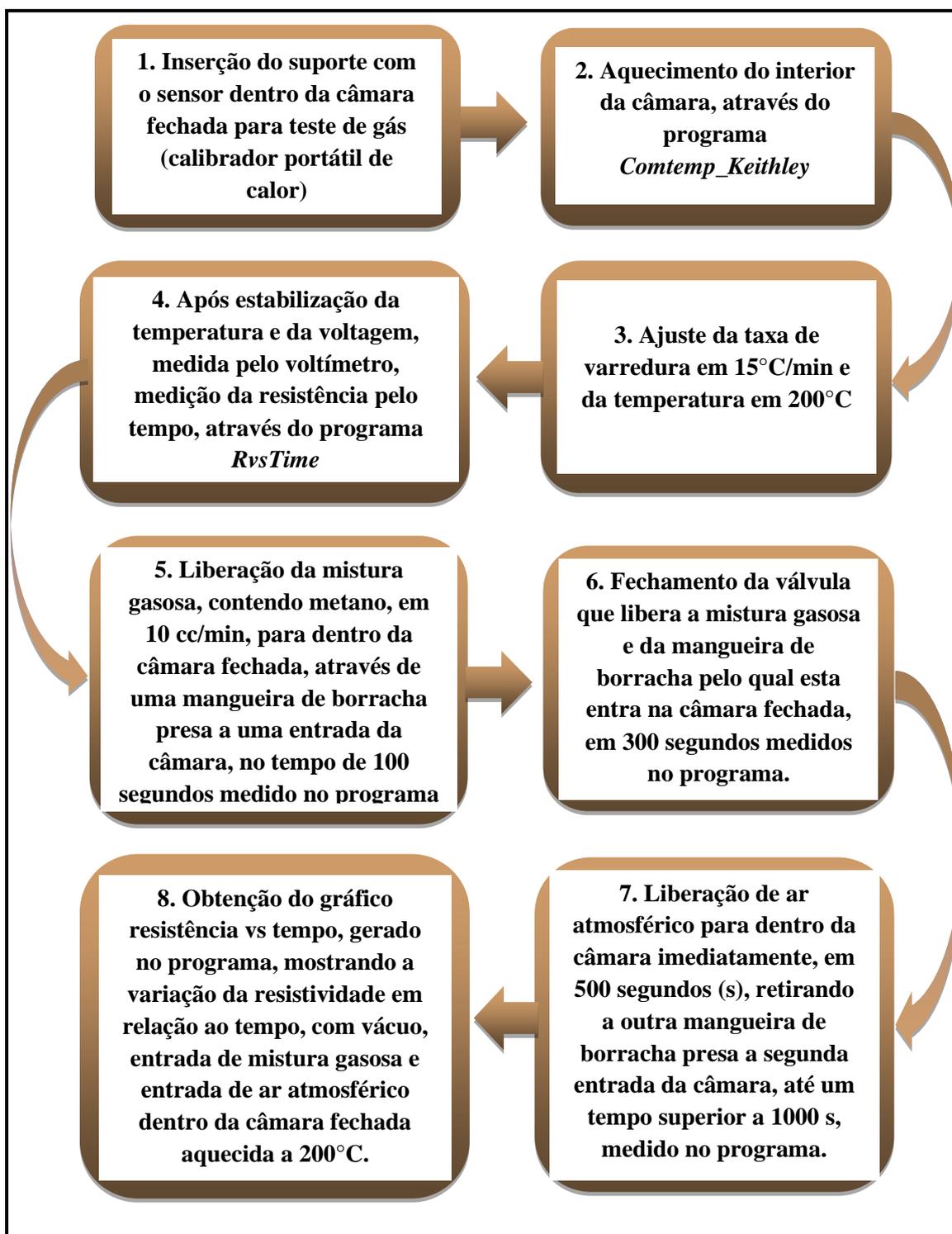


Figura 32: Etapas, esquematizadas, do teste de sensor com o gás metano.

Para obtenção dos dados sobre resistência, em função do tempo, bem como para o controle da temperatura dentro da câmara fechada de gás, foram utilizados os programas *RvsTime* e *Comtemp_Keithley* (Aragón *et al.* 2017), ambos desenvolvidos no

ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas *LabView*[®] (*LabView*[®] 2012). O programa *Comtemp_Keithley* controla a temperatura, em °C, no interior da câmara fechada, e o programa *RvsTime* fornece um gráfico da resistividade em relação ao tempo, da resposta do sensor, nas três situações de testes mencionadas anteriormente.

Após atingida a temperatura de 200°C no interior da câmara fechada, controlada pelo programa *Comtemp_Keithley*, nos primeiros 100 segundos cronometrados no programa *RvsTime*, fez-se uma condição de vácuo no interior da câmara de teste de gás, onde o programa mostrou a resistência de cada sensor em relação à condição de vácuo. Posteriormente, sem interrupção no programa, foi liberada a mistura gasosa contendo 4% de gás metano, determinado como o gás alvo do trabalho, para o interior da câmara fechada de gás, através da mangueira ligada à mistura gasosa, em um fluxo volumétrico constante de saída de gás de 10 centímetros cúbicos por minuto (10 cc/min), onde, novamente pelo programa, verificou-se a variação da resistência em relação ao tempo, em segundos, na presença do gás metano.

Ao chegar em 300 segundos, a válvula de saída da mistura gasosa foi imediatamente fechada, e a segunda mangueira, que estava inserida na garrafa pet, contendo água em seu interior, e encaixada à outra saída da câmara fechada, foi retirada simultaneamente da garrafa, permitindo que o ar atmosférico, tido como o gás de referência do trabalho, entrasse para o interior da câmara e fosse possível medir a variação da resistência do sensor em relação à presença do ar atmosférico, até completar um tempo total de 500 segundos estipulados.

Ao final das medições de resistência em relação ao tempo, das três situações, em sequência e sem interrupções, foi gerado, no programa citado, um gráfico de resistência por tempo para cada sensor testado, individualmente e nas mesmas condições de teste, que foi a base das discussões e estudo do potencial de cada filme fino produzido como sensor para o gás metano.

Para os filmes finos de SnO₂ sem dopagem de Fe e nos tempos de deposição de 2, 3 e 4 horas, foram realizados ainda testes de sensor, nas condições explicitadas, em temperatura ambiente, variando entre 35° e 60°C, o que não foi possível fazer para o sensor de SnO₂ sem dopagem de Fe no tempo de deposição de 1 hora, por não obter resposta de sensor satisfatória a esta temperatura, e nos sensores de SnO₂ dopados com Fe, em concentrações de 1 a 5% no tempo de deposição de 2 horas, e no tempo de deposição de 2, 3 e 4 horas em concentrações apenas de 5% de Fe, por também não fornecer resposta como sensores para o gás metano a esta temperatura ambiente; apenas à 200°C.

A grande maioria dos óxidos metálicos semicondutores, aplicados como sensores de gás, requerem uma alta temperatura para operarem, e isso ocorre devido a temperatura de reação do O^- . O aquecimento, a alta temperatura, da camada sensível do sensor aumenta a probabilidade de adsorção das moléculas de gás em sua superfície, levando ao consumo dos íons de oxigênio na superfície da camada sensível, e consequente aumento da condutividade do filme (Liu *et al.* 2012).

Conforme o objetivo principal deste trabalho, embora tenham sido feitos testes à temperatura ambiente dos sensores que responderam à presença do gás metano nesta temperatura, a discussão dos resultados e entendimento dos mesmos foi focada nas respostas de testes de sensores à temperatura de 200°C, na qual todos os sensores produzidos responderam à presença do gás.

Os demais testes realizados estão demonstrados no capítulo Resultados e Discussão deste trabalho, para efeitos de informações adicionais, importantes para a continuidade do trabalho por outros pesquisadores no futuro. Constam, ainda, sob a justificativa de comprovação do tempo de deposição escolhido como o melhor tempo para a produção dos sensores principais de gás metano deste trabalho, conforme a resposta ao teste de sensor, os testes realizados à temperatura de 200°C dos quatro filmes finos de SnO₂ dopados com a concentração de 5% de Fe, nos tempos de deposição de 1 a 4 horas.

É importante ressaltar, e que será melhor discutido no próximo capítulo deste trabalho, que para a escolha do melhor tempo de deposição entre 1 e 4 horas, utilizou-se do conceito de sensibilidade para sensores de gás. Logo, o parâmetro sensibilidade de cada sensor de SnO₂ dopado com 5% de Fe foi calculado, através dos gráficos de resistência por tempo, fornecido pelo programa *RvsTime*, na etapa de teste de sensor.

3.5 CARACTERIZAÇÕES MORFOLÓGICAS, ESTRUTURAIS, ÓTICAS E MAGNÉTICAS DOS FILMES

Para as caracterizações estruturais, óticas, morfológicas e magnéticas dos filmes finos, o substrato de vidro com o filme depositado em sua superfície, produzido para cada alvo metálico, foi destinado aos laboratórios de Raios-X, Medidas Magnéticas, Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível e às Microscopias, Eletrônica de Varredura e de Força Atômica, para medições.

Os resultados dos métodos de caracterizações Difração de Raios-X, Medidas Magnéticas, Espectrofotometria de Ultravioleta e Visível e testes de sensores para o gás

metano, de cada filme fino, foram tratados no programa *OriginLab*[®] (*OriginLab*[®] 2007), através do qual também foram confeccionados gráficos das medições realizadas nestes métodos.

Para a simulação e a melhor visualização das interpretações teóricas propostas, conforme todos os resultados obtidos, das caracterizações estruturais, óticas, microscópicas e magnéticas, além dos testes de sensor, foram confeccionados, com o auxílio dos programas *CrystalMaker*[®] (*CrystalMaker*[®] 2010) e *Materials Studio*[®] (*Materials Studio*[®] 2000), imagens representativas em três dimensões ou simulações do arranjo cristalino de SnO₂ e de SnO₂-Fe_{x%}, apresentadas no próximo capítulo.

3.5.1. Microscopia de Força Atômica

O Microscópio de Força Atômica (AFM) ou *Scanning Force Microscope* (SFM) gera imagens de diferentes tipos de amostras a partir das deflexões de uma sonda, denominada ponteira, localizada em sua extremidade livre ou cantiléver, sendo estas deflexões decorrentes das forças de interação entre os átomos da ponta da ponteira e os átomos da superfície da amostra, no momento em que a ponteira varre a amostra, ou seja, se movimenta sobre a superfície da amostra, aproximando-se ou afastando-se desta, conforme as forças de interações repulsivas e atrativas. Os modos de operações podem ser por contato entre ponteira e amostra, por contato intermitente ou dinâmico, ou, ainda, por não-contato (Cohen & Lightbody 2002).

O modo por contato intermitente, no qual a ponteira recebe uma frequência para entrar em ressonância, tocando ligeiramente a amostra, ou seja, uma frequência de ressonância livre, foi o modo de operação escolhido para gerar as imagens de MFA deste trabalho. Além de gerar imagens de alta resolução da topografia e das deflexões da ponteira na varredura da superfície da amostra, sem causar danos, possui uma variação, que é o modo viscoelástico ou contraste de fases, que grava no computador ligado ao microscópio, onde as imagens são processadas, o atraso ou adiantamento da fase, sendo estes decorrentes da viscosidade e elasticidade da amostra, respectivamente. Assim, a partir da imagem de contraste de fase, é possível detectar variações na composição da amostra bem como observar estruturas em detalhes, aspecto da superfície, e outros (Cohen & Lightbody 2002).

A visualização da topografia de alguns filmes finos, assim como a obtenção de imagens microscópicas das superfícies destes filmes, foram possibilitadas pela Microscopia de Força Atômica (MFA). O microscópio de força atômica utilizado foi

um modelo Flex-Axion AFM, com controlador *Nanosurf*[®] *Easy Scan 2* e com uma ponteira *Budget Sensors Tap150Al-G* com recobrimento de Alumínio, pertencente ao Laboratório de Nanoestruturas Magnéticas do Departamento de Física, da Universidade de Brasília. O modo de operação foi por contato intermitente ou dinâmico, a uma frequência de ressonância de aproximadamente 150 quilohertz (kHz) e com uma constante de força ou constante de mola de aproximadamente 5 Newton-metro (N/m).

A velocidade de varredura foi uma linha por segundo, com 512 pontos por linha, a uma amplitude de oscilação livre de 150 milivolts (mV). Foram obtidas imagens da amplitude, contraste de fases e topografia de alguns filmes finos, em ambos os lados do substrato de vidro, tanto o lado que contém o filme depositado quanto o lado que não contém o filme fino depositado, ou seja, que é apenas o vidro da lâmina de microscopia.

3.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) ou *Scanning Electron Microscope* (SEM) capta e mede as diferentes radiações que são provenientes das interações, elásticas e inelásticas, entre os átomos da superfície da amostra e os elétrons de um feixe eletrônico que atinge a superfície desta amostra, e que irão modificar a velocidade e a trajetória do elétron incidente, no caso das interações elásticas, e, além da velocidade e da trajetória, a energia cinética, com a transferência de energia do elétron incidente para os átomos da amostra, nas interações inelásticas. O processo de espalhamento, elástico e inelástico, controla as informações obtidas da amostra (Maliska 2003).

A composição da amostra influencia tanto o tipo de interação elétron-amostra, decorrente da incidência do feixe eletrônico na sua superfície, quanto a profundidade de penetração deste feixe na amostra. Materiais semicondutores são materiais que apresentam boa luminescência, devido a sua capacidade em emitir luz, denominada catodo luminescência, como consequência de um bombardeamento eletrônico. Estes materiais liberam a energia, que é entregue pelo feixe eletrônico, na forma de luz ou fótons, e esta capacidade em emitir luz está relacionada à estrutura interna e a transparência dos materiais em comparação ao comprimento de onda, do feixe, envolvido. O tipo e a concentração de dopante(s) influenciam a intensidade desta luminescência (Maliska 2003).

O microscópio eletrônico de varredura utilizado para a obtenção de imagens dos filmes finos do trabalho foi um modelo JSM-7001F, pertencente ao Laboratório de

Microscopias do Departamento de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, operando a uma tensão elétrica de 10kV. As resoluções das micrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura foram de 14.4 e 14.5 nanômetros (nm) e as ampliações das imagens foram de 1500, 5000 e 25000 vezes.

3.5.3. Difratomia de Raios-X

Um feixe de radiação (fótons, nêutrons e elétrons), que incide sobre o cristal, sendo o comprimento de onda da radiação da mesma ordem de grandeza que a constante ou parâmetro de rede do cristal, será difratado pelos átomos deste cristal, o que permite determinar a posição dos átomos no interior do cristal e, com isso, a composição e as dimensões da célula unitária do mesmo (Mello & Biasi 1975). A Difração de Raios-X (DRX) é uma técnica onde se incide um feixe de Raios-X, que possuem um comprimento de onda entre 0.01 e 10 nanômetros, em uma amostra cristalina, para a determinação das características do cristal (Speakman 2011).

O padrão de difração ou interferência é gerado ao fazer o feixe de Raios-X atravessar a amostra, e este feixe será espalhado pelos átomos da mesma, pois os átomos funcionam como obstáculos à propagação livre dos Raios-X. O fenômeno de difração ocorre quando há interferência construtiva, ou seja, quando os feixes refletidos por dois planos subsequentes do cristal apresentam a diferença entre os seus caminhos óticos como um número inteiro de comprimento de onda, indicando que estes feixes estão em fase, sendo os máximos e mínimos de um feixe coincidentes com os do outro feixe (Speakman 2011).

Em um espectro de Raios-X, as larguras dos picos são influenciadas pela tensão nos componentes da célula unitária, assim como pelo tamanho das mesmas. Já a intensidade de cada pico do espectro é definida pela localização dos átomos no interior da célula unitária do cristal. A célula unitária, por sua vez, determina as posições dos picos conforme suas características de simetria, forma e tamanho (Aragón 2010).

As caracterizações estruturais relacionadas ao espectro de Difração de Raios-x dos compostos de SnO₂ e SnO₂-Fe_x% foram feitas utilizando um sistema de Difração de Raios-X (DRX), sendo o difratômetro utilizado da marca *Rigaku*, pertencente ao Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Geologia, da Universidade de Brasília.

Os valores de intensidade ou contagens foram obtidas, por meio de um computador ligado ao sistema de Difração de Raios-X, em função do ângulo teta (2θ),

de 10° e com passos de $0,05^\circ$ em 2θ , e com o difratômetro operando a uma velocidade de 1 grau por minuto ($1^\circ/\text{min}$). Os espectros gerados, de intensidade em função do ângulo, para cada filme fino, foram, posteriormente, refinados ou tratados, pelo Método de Refinamento de Rietveld (Young 1995), no programa *General Structure Analysis System* (GSAS)³ (Gsas & Expgui[®] 2004), interface gráfica EXPGUI, obtendo, assim, os espectros de Difração de Raios-X, medidos e calculados, de cada filme fino.

3.5.3. Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível

A Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível (UV-VIS) é um método analítico baseado na absorção de radiação ou ondas eletromagnéticas, proveniente da incidência de um feixe de luz monocromática na amostra, pelos átomos da superfície da amostra, na região do ultravioleta (UV), cujo comprimento de onda (λ) é entre 100 e 400 nanômetros (nm), e na região do visível (VIS), entre 400 e 800 nm (Faust 1997).

A luz é composta por partículas elementares, denominadas fótons, que transportam energia, e esta energia é absorvida pela amostra, quando o feixe de luz a atinge, tendo, como consequência, uma diminuição da energia radiante do feixe que sai da amostra. Dessa forma, o que ocorre é uma interação, a nível atômico, entre a radiação eletromagnética e a superfície da amostra, onde a composição, a concentração e o coeficiente de absorção molar da amostra são fatores determinantes na quantidade de radiação que será absorvida por esta amostra, na técnica de UV-VIS (Faust 1997).

Para a obtenção das propriedades óticas dos filmes finos, foi utilizado um Espectrofotômetro no Ultravioleta e Visível (UV-VIS), modelo UV-2600, pertencente ao Laboratório de Caracterização Ótica do Núcleo de Física Aplicada, do Departamento de Física da Universidade de Brasília, sendo estas medições realizadas na região entre 200 e 1300 cm^{-1} . O método de Tauc (Tauc 1974) foi utilizado para determinar o *gap* da banda ótica dos filmes finos semicondutores confeccionados, através dos resultados obtidos

3.5.4. Medições magnéticas

O magnetômetro SQUID⁴, um dispositivo supercondutor de interferência quântica, faz parte do sistema de medições magnéticas e é o responsável, neste sistema, pela detecção de campos magnéticos, por se tratar de um sensor com alta sensibilidade

³ Sistema de análise geral da estrutura.

⁴ Superconductor Quantum Interference Device.

para detecção de campos magnéticos, em outras palavras, é um sensor capaz de detectar campos magnéticos muito baixos (Araújo 2002).

Por ser constituído de uma espira de material supercondutor, uma das suas propriedades fundamentais, que permite a obtenção de medidas magnéticas das amostras, é o chamado Efeito Josephson, que se trata da quantização do fluxo magnético através da espira e a interferência quântica. A espira supercondutora tem uma região interrompida por uma camada de óxido, sendo o SQUID constituído pela junção supercondutor-óxido-supercondutor (Araújo 2002).

No sistema de medições magnéticas existe, ainda, um controlador de temperatura, que permite que as medições magnéticas das amostras sejam feitas a temperaturas desejadas, em uma determinada faixa de temperatura controlada e permitida (Araújo 2002).

Neste trabalho foram feitas medições das magnetizações dos filmes finos que contêm a dopagem do elemento ferro, em concentrações de 1 a 5%, submetidos, em uma temperatura de 300K, a um campo magnético \vec{H} , ajustável, variando entre -70 a +70 kOe, e em uma frequência de oscilação definida, proporcional ao sinal magnético dos filmes, com o intuito de constatar a presença do ferro na estrutura cristalina do SnO₂. Os valores de magnetização (M) obtidos para cada filme foram divididos pelas suas respectivas áreas, medidas em centímetros ao quadrado (cm²).

A dopagem com o elemento ferro (Fe) em alguns filmes finos produzidos foi constatada por um sistema de medição de propriedade magnética, modelo MPMS3, com magnetômetro SQUID, pertencente ao Laboratório de Física Aplicada e Nanoestruturas do Departamento de Física, da Universidade de Brasília, operando a uma temperatura de 300K, a um campo magnético \vec{H} , ajustável, variando entre -70 a +70 quilo-oersted (kOe), em uma frequência de oscilação definida, proporcional ao sinal magnético dos filmes, mostrando o comportamento magnético de cada filme a esta temperatura e, portanto, indicando a presença do Fe nestes filmes finos.

Outras medições magnéticas também foram feitas, a uma variação de temperatura entre 5K e 300K, aplicado o mesmo campo magnético \vec{H} (± 70 kOe) com os filmes dopados em 1%, 4% e 5% de Fe. Também foram feitas medições, neste sistema, de uma lâmina de microscopia limpa, sem a presença de um filme fino, para retirar a diferença do vidro nas análises de propriedades magnéticas, uma vez que o vidro é o substrato no qual o filme encontra-se depositado sobre a sua superfície e influência o resultado magnético obtido para cada filme. Logo, para todas as respostas magnéticas

obtidas dos filmes, foi retirada, para efeitos de correção, a resposta do vidro da lâmina nas mesmas temperaturas de medições.

Resultados e Discussão

4.1 RESULTADOS

Os resultados das caracterizações morfológicas, pelos métodos de Microscopia de Força Atômica e Microscopia Eletrônica de Varredura são apresentados neste capítulo. Seguidamente tem-se os resultados das caracterizações estruturais, pela Difractometria de Raios-X, das caracterizações óticas, pelo método de Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível, e as caracterizações magnéticas. São também apresentados neste capítulo do trabalho os resultados dos testes de sensores para o gás metano de cada filme fino de SnO₂ dopado e não dopado com ferro em diferentes concentrações.

4.1.1 Microscopia de Força Atômica

Primeiramente foi feita a varredura do filme fino de SnO₂ com 3% de Fe, em ambos os lados do substrato de vidro, o lado que contém o filme fino depositado, e o lado que é apenas o substrato de vidro. A imagem topográfica do lado do substrato de vidro que contém o filme (Figura 33A) mostra a variação da topografia na superfície do filme fino, em uma área de varredura de 15 micrômetros (μm) por 15 micrômetros (μm).

Um perfil topográfico (Figura 33B) foi traçado, a partir desta imagem da topografia do filme, e está representado pela linha reta azul. Neste perfil observa-se, para este filme, que, na distância de varredura de 15μm (eixo x), tem-se uma altura máxima da topografia de aproximadamente 60 nanômetros (nm) e uma altura mínima de aproximadamente 25nm (eixo z), sendo, dessa forma, a variação da topografia do lado que contém o filme fino de SnO₂ - Fe 3% depositado, entre 25nm e 60nm.

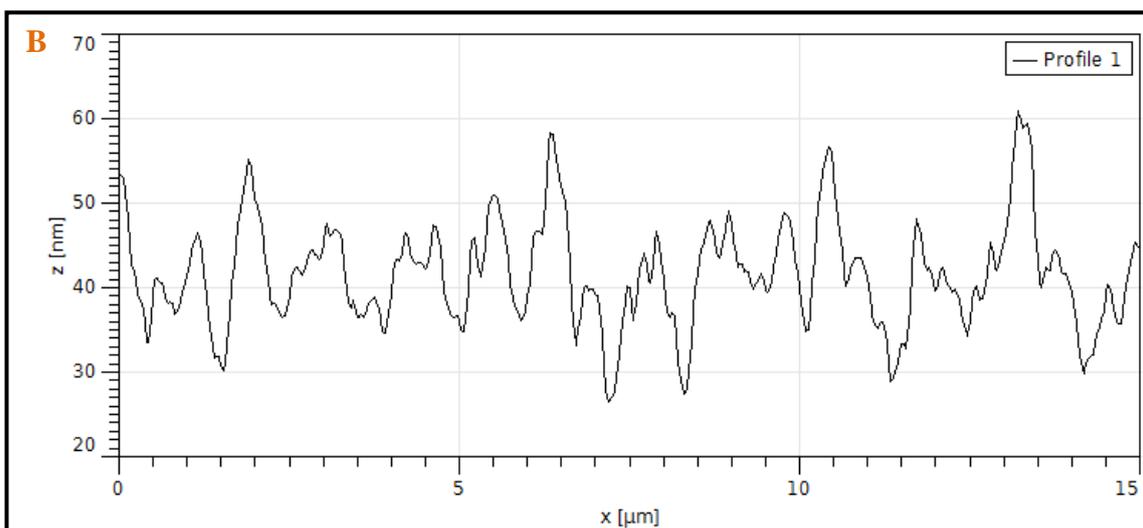
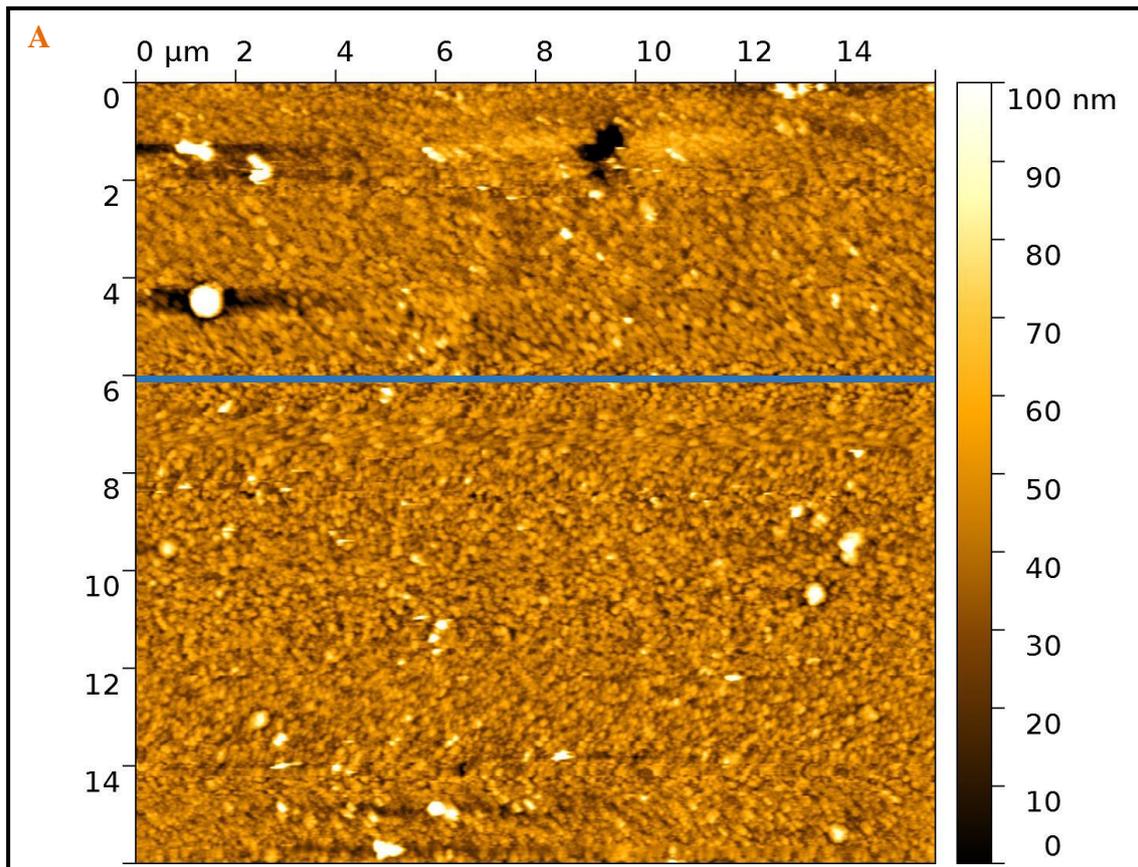


Figura 33: Imagem da topografia e perfil topográfico da superfície do filme fino de SnO₂ dopado com 3% de Fe: (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de 15µm por 15µm, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de 15µm (eixo x), a variação da topografia do filme (eixo z), em nanômetros.

Outra imagem da topografia da superfície do filme fino de SnO₂ com 3% de Fe foi obtida porém, em uma área de varredura maior que a anterior, de 30µm por 30µm (Figura 34), traçando uma linha na superfície para a visualização da espessura do filme fino, onde foi possível observar uma grande mudança na topografia da superfície varrida, em uma parte desta área que encontra-se bem mais elevada, indicando a

presença do filme fino. Um perfil topográfico, de aproximadamente $3\mu\text{m}$ de distância, desta parte em que houve a mudança brusca na topografia, foi traçado na imagem, representado pela linha azul, sendo a altura máxima obtida, desta elevação, de aproximadamente $0.6\mu\text{m}$.

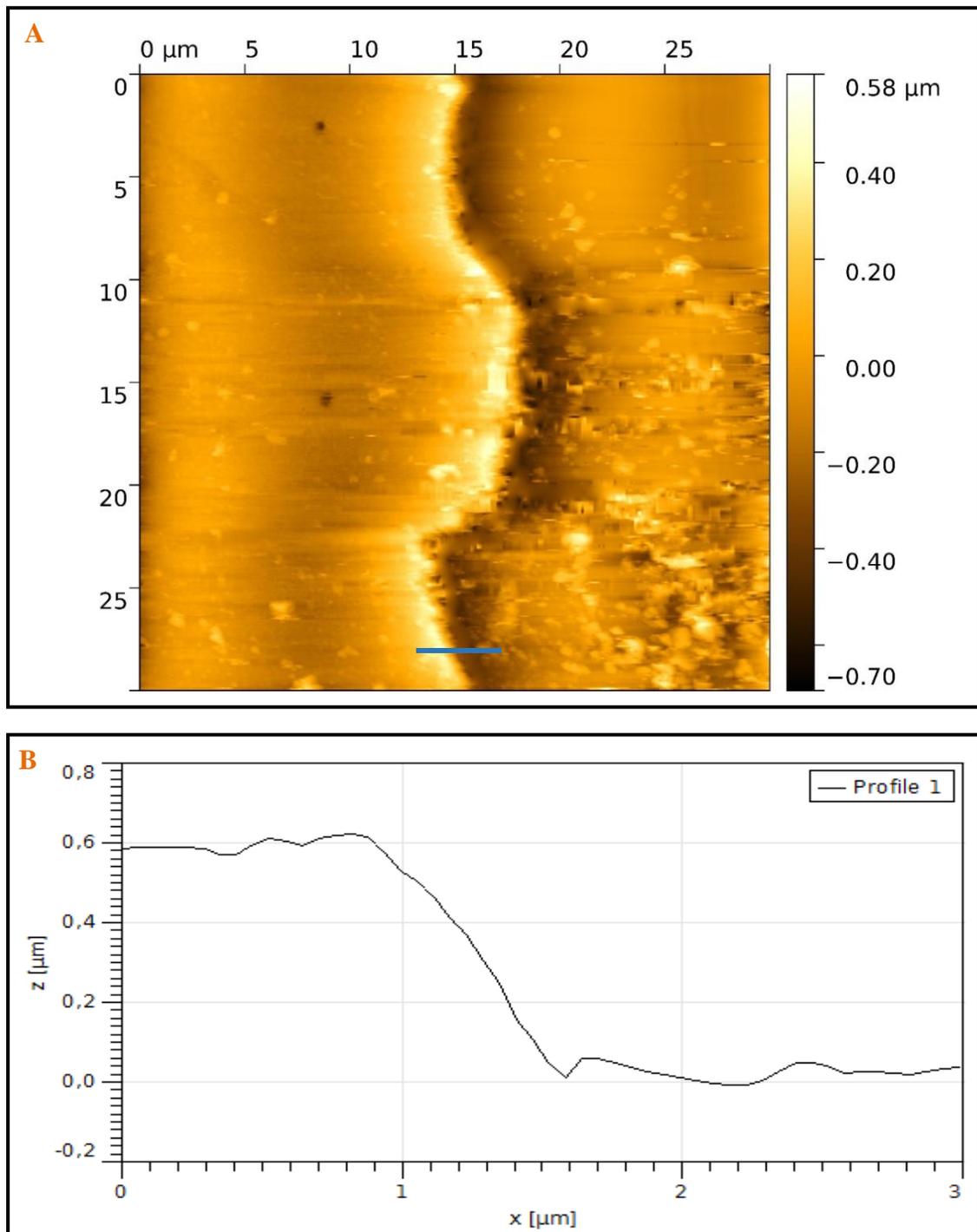


Figura 34: Imagem da topografia, para visualização da espessura, e perfil topográfico da superfície do filme fino de $\text{SnO}_2 - \text{Fe } 3\%$: (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de $30\mu\text{m}$ por $30\mu\text{m}$, com grande destaque para a elevação da topografia em uma parte desta área, mais ao centro, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de aproximadamente $3\mu\text{m}$ (eixo x), uma elevação importante da topografia, no substrato de vidro (eixo y), indicando a presença do filme.

Também foram obtidas imagens de amplitude e contraste de fase (Figura 35), do filme fino de SnO₂ - Fe 3%, na mesma área de varredura, de 15μm por 15μm, usada para a obtenção da primeira imagem topográfica, pelo Microscópio de Força Atômica.

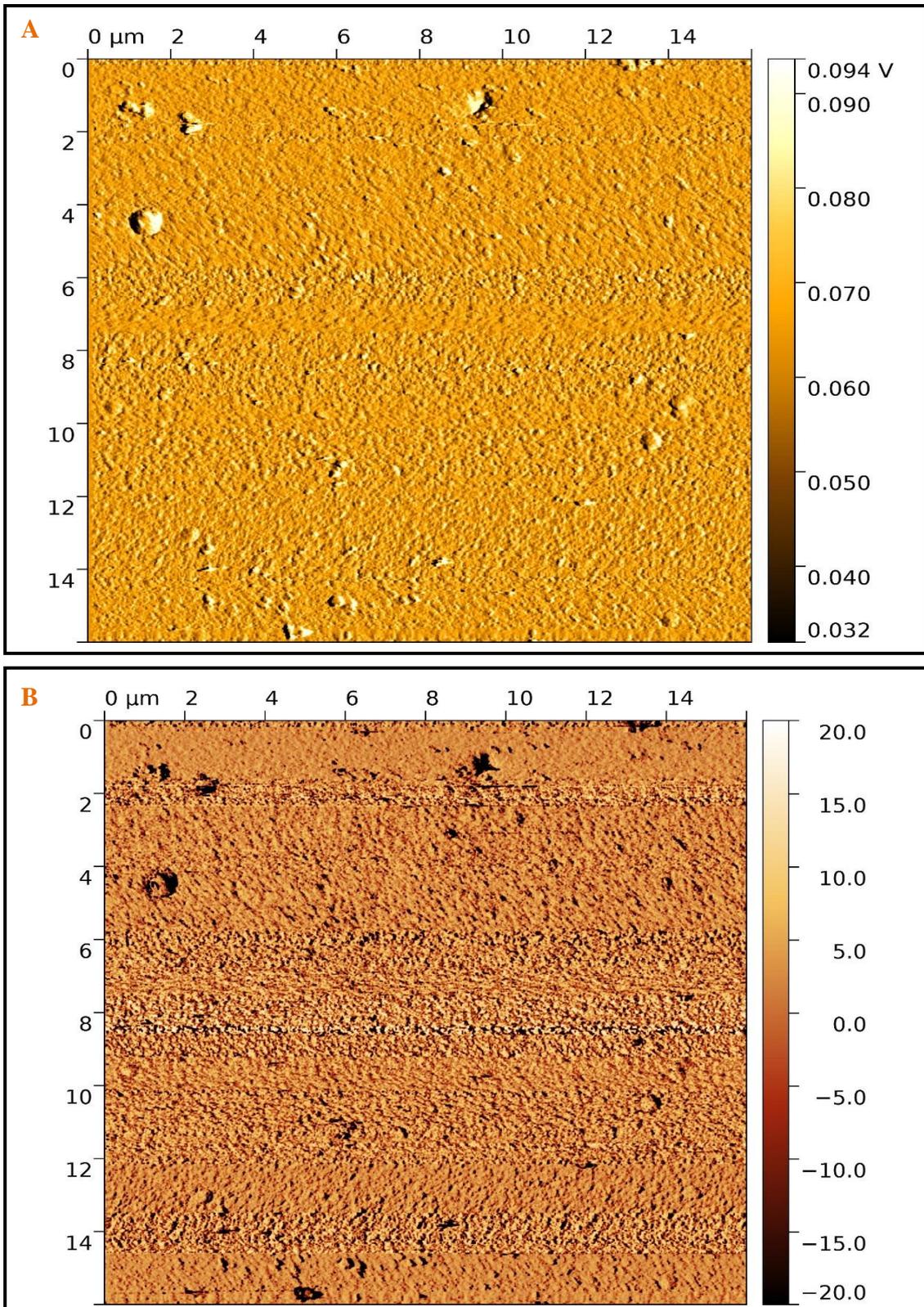


Figura 35: Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do filme fino de SnO₂ - Fe 3%, na mesma área de varredura, 15μm por 15μm, da primeira imagem topográfica obtida para este filme: (A) Imagem da amplitude; (B) Imagem de contraste de fase.

A amplitude, que é a medida escalar da magnitude de oscilação, valor máximo de deslocamento vertical a partir da superfície da amostra ou posição de equilíbrio, mostra a deflexão da ponteira ao varrer o filme e variou de 0.032V a 0.094V. Na imagem de contraste de fase é possível observar uma pequena variação na cor, sendo esta, bem uniforme, e no aspecto da superfície do filme, entre mais rugoso, em algumas partes, e mais liso em outras, sendo a superfície predominantemente mais rugosa.

As mesmas imagens, topografia, amplitude e contraste de fases, além do perfil topográfico, foram obtidas para o outro lado do substrato de vidro (Figuras 36 e 37) do filme de SnO₂ dopado com 3% de Fe, na mesma área de varredura, de 15μm por 15μm, conforme mencionado anteriormente, que não contém o filme fino depositado, ou seja, onde é apenas o substrato de vidro.

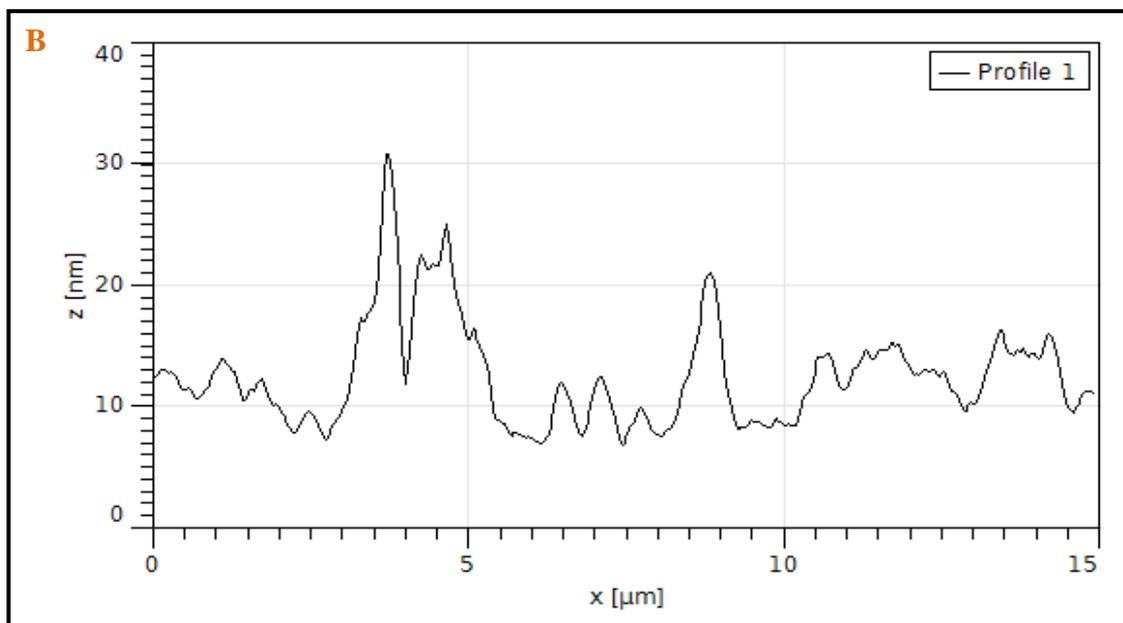
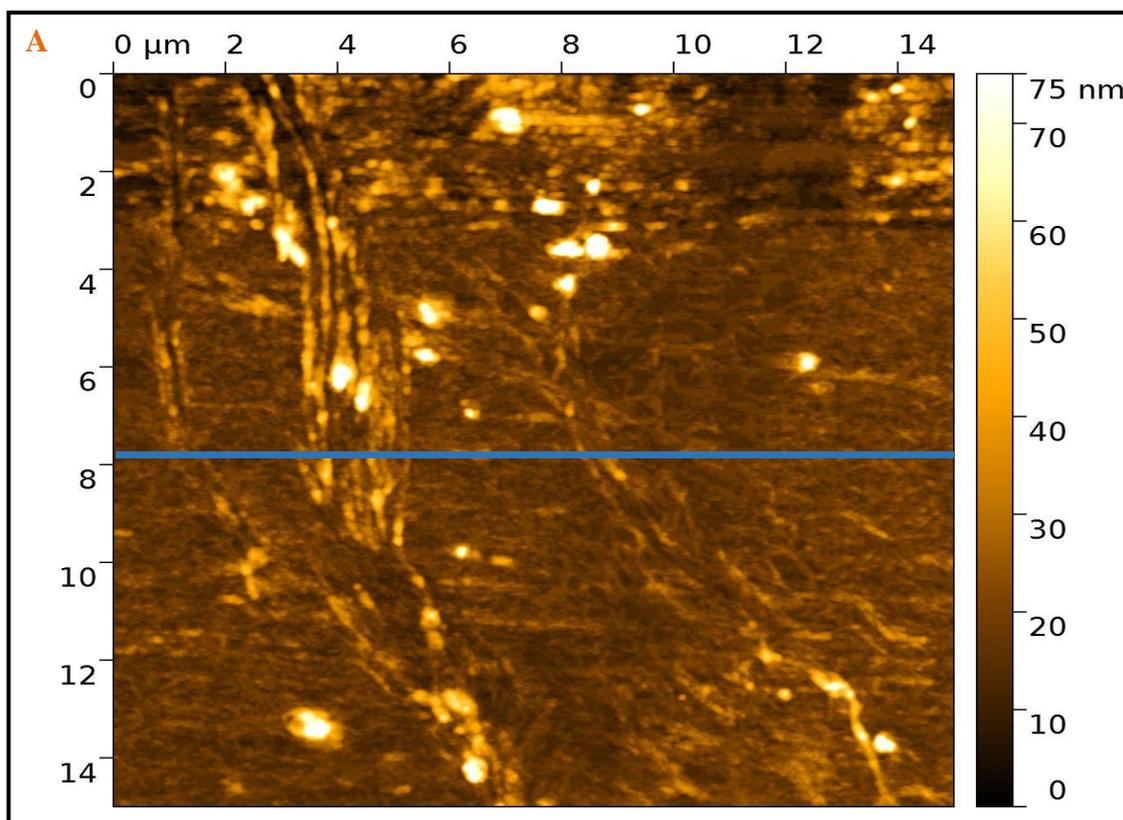


Figura 36: Imagem da topografia e o perfil topográfico, da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO_2 dopado com 3% de Fe, e na mesma área de varredura, de $15\mu\text{m}$ por $15\mu\text{m}$: (A) Imagem da topografia, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico.

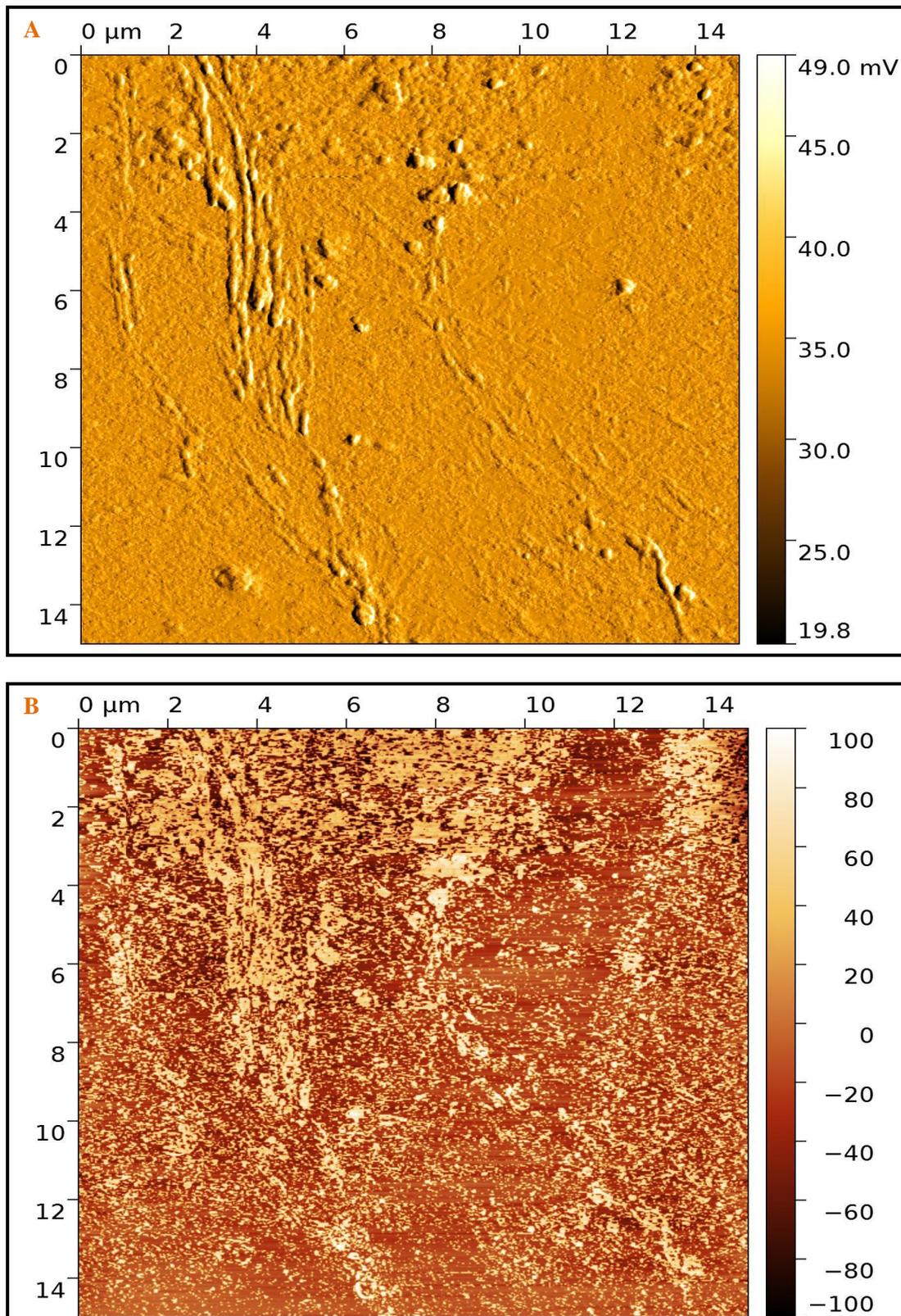


Figura 37: Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO₂ dopado com 3% de Fe, e na mesma área de varredura, de 15μm por 15μm: (A) Imagem da amplitude; (B) Imagem de contraste de fase.

A rugosidade de um filme fino é uma propriedade que está relacionada à forma da sua superfície, ou seja, é o desvio padrão da altura, fornecendo um valor quantitativo da aspereza de uma superfície, decorrente da formação da mesma. A altura da superfície

pode ser descrita como a medida das elevações ou da profundidade dos sulcos. A morfologia da interface ou fronteira entre a superfície de um filme fino e o sistema físico em que ele encontra-se depositado é alterada em função do crescimento do filme (Salvador 2009).

Para o lado do substrato de vidro que não contém o filme fino de $\text{SnO}_2 - \text{Fe } 3\%$, a topografia teve uma variação entre 7nm e 31nm, aproximadamente, e a imagem da amplitude mostrou variações entre 19.8mV e 49.0mV. A topografia do lado do substrato de vidro que contém o filme depositado apresentou uma variação maior que o lado que não contém o filme fino, entre 25 e 60nm, o que evidencia a presença do filme, uma vez que ambos os lados do substrato de vidro consistem no vidro da lâmina para microscopia, que é o substrato para a deposição de todos os filmes finos do trabalho. A diferença entre as duas variações topográficas representa a topografia somente do filme.

A imagem de amplitude também apresentou valores bem menores para o lado do substrato que não contém o filme fino, medidos em milivolts, comparados a variação, obtida em volts, da imagem de amplitude do lado do substrato que contém o filme. A imagem de contraste de fase do lado que não contém o filme depositado mostrou uma superfície predominantemente mais lisa que rugosa, e uma variação de cores, o que corrobora com a imagem de contraste de fase do lado do substrato que contém o filme, uma vez que esta se mostrou mais rugosa e com cores mais uniformes, constatações, em ambas as imagens obtidas, amplitude e contraste de fase, da presença do filme fino.

É importante ressaltar que ambos os lados do substrato de vidro apresentam pequenos artefatos devido ao manuseio contínuo e necessário do substrato, mesmo que cuidadoso, assim como da armazenagem do substrato no local apropriado, ainda que adequada, à realização de diversos métodos de caracterizações do mesmo substrato, para o trabalho, ao fato do filme fino ser um material muito sensível e, ainda, por poder ocorrer defeitos na fabricação da própria lâmina de vidro para microscopia, utilizada como substrato para os filmes. Todos estes fatores podem provocar pequenos arranhões no vidro, levar à presença de pequenas impurezas externas no substrato, entre outros.

Além da varredura, por Microscopia de Força Atômica, do filme fino de SnO_2 com 3% de Fe, em ambos os lados do substrato, foram realizadas varreduras para o filme fino de SnO_2 intrínseco e depositado no tempo de 2 horas. Dessa forma, foram obtidas imagens de topografia, amplitude e contraste de fase, além do perfil topográfico, tanto do lado que contém o filme fino depositado, quanto do lado que é apenas o vidro da lâmina de microscopia.

As imagens topográficas do lado do substrato que contém o filme de SnO_2 mostra a variação da topografia na superfície do filme fino, em duas áreas, uma de $15\mu\text{m}$ por $15\mu\text{m}$ (Figura 38A) e outra de $30\mu\text{m}$ por $30\mu\text{m}$ (Figura 39A). Também para este filme fino a imagem topográfica na área de $30\mu\text{m}$ por $30\mu\text{m}$ foi obtida traçando-se uma linha reta na superfície para visualização da espessura do filme. Os perfis topográficos foram traçados, a partir das respectivas imagens da topografia do filme, e estão representados pela linha reta azul em cada imagem (Figuras 38B e 39B).

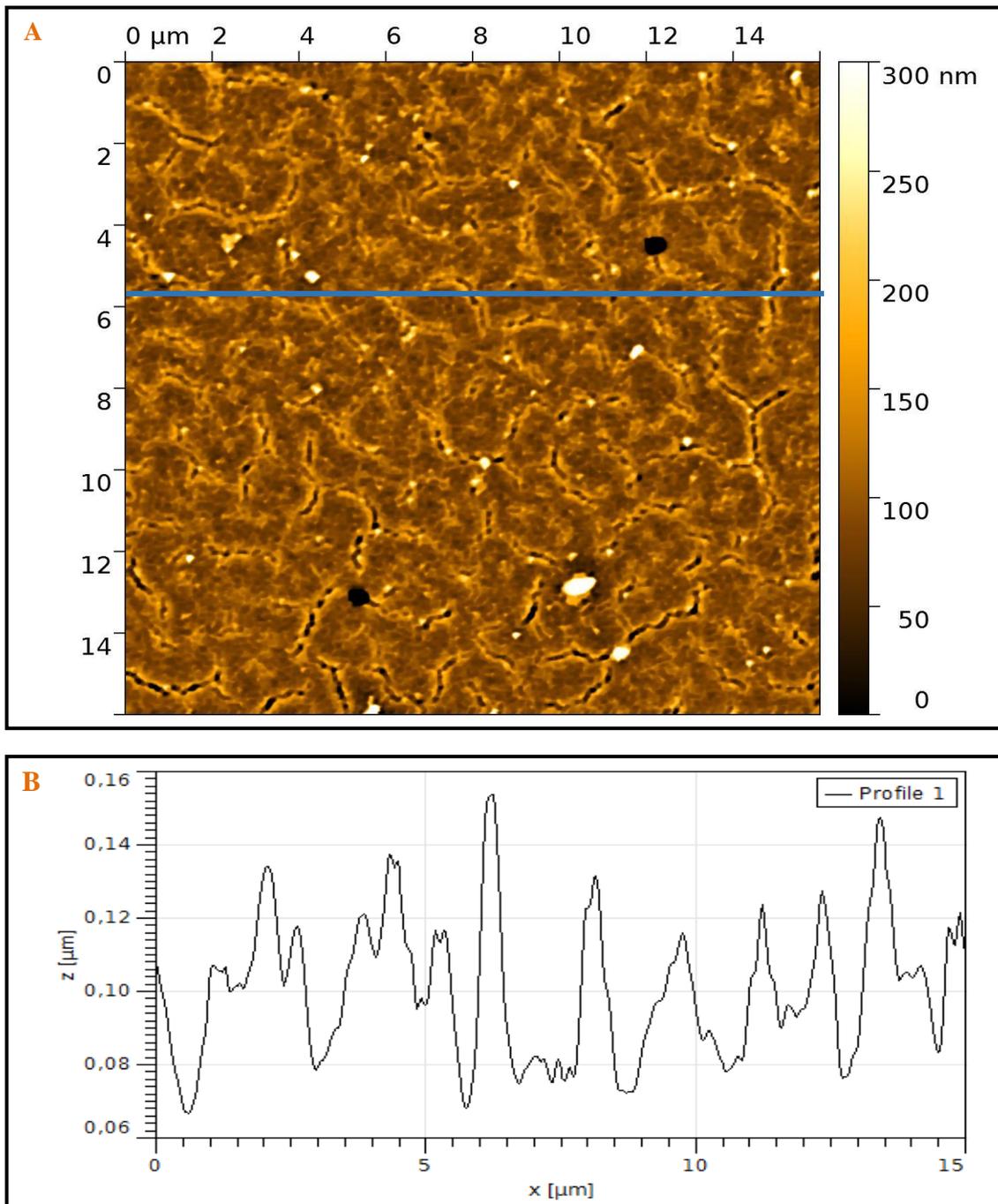


Figura 38: Imagem da topografia e perfil topográfico da superfície do filme fino de SnO_2 : (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de $15\mu\text{m}$ por $15\mu\text{m}$, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de $15\mu\text{m}$ (eixo x), a variação da topografia (eixo z), medida em micrômetros.

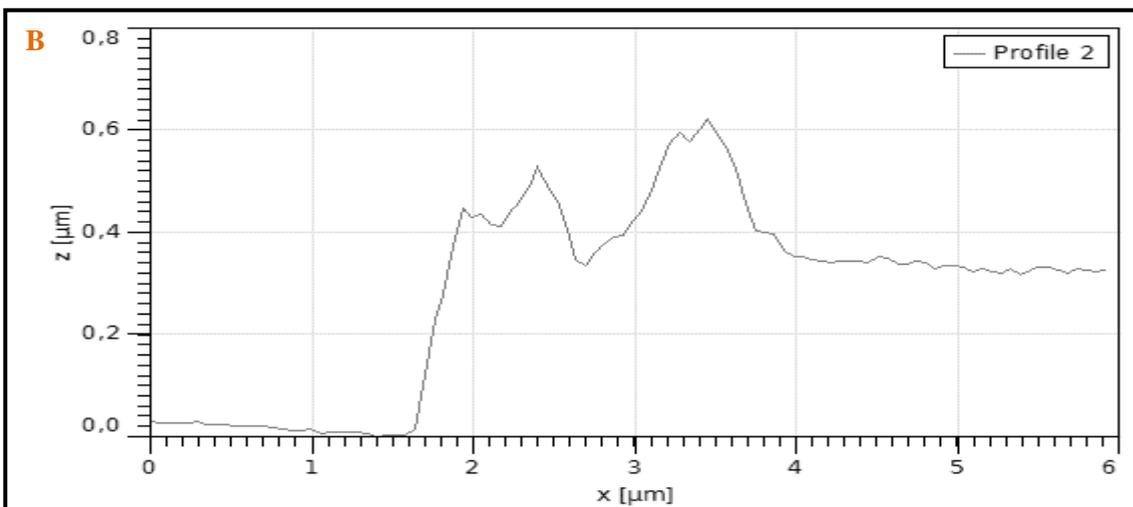
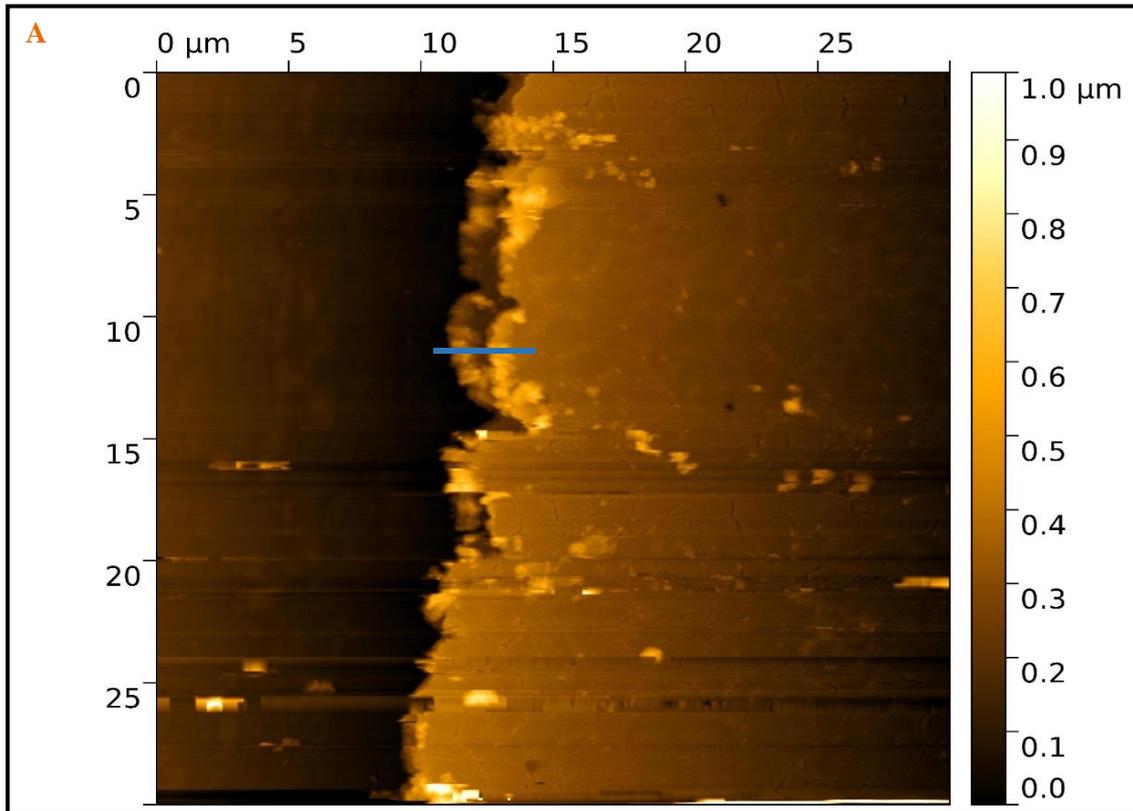


Figura 39: Imagem da topografia, para visualização da espessura, e perfil topográfico da superfície do filme fino de SnO₂: (A) Imagem da topografia da superfície do filme em uma área de 30µm por 30µm, onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico; (B) Perfil topográfico do filme, mostrando, em uma distância de aproximadamente 6µm (eixo x), uma elevação máxima da topografia, no substrato de vidro, indicando o filme, de aproximadamente 0.6 µm (eixo z).

No primeiro perfil observa-se, para o filme de SnO₂, que, na distância de varredura de 15µm (eixo x), tem-se uma altura máxima da topografia de aproximadamente 0.15µm e uma altura mínima de aproximadamente 0.07µm (eixo z), sendo, dessa forma, a variação da topografia deste lado do substrato entre 0.07µm a 0.15µm. Já no segundo perfil topográfico observa-se, em uma distância de varredura de 6µm do filme, uma elevação máxima em torno de 0.6µm, representando a espessura do filme. A imagem da amplitude, obtida para o filme fino de SnO₂, mostrou variações

entre 0.0551V e 0.0973V e a imagem de contraste de fases (Figura 40) evidenciou uma cor mais uniforme, uma pequena rugosidade da superfície e a presença de pequenos sulcos, em função do crescimento das superfícies do filme fino, estruturas com cores escuras e evidentes nesta imagem.

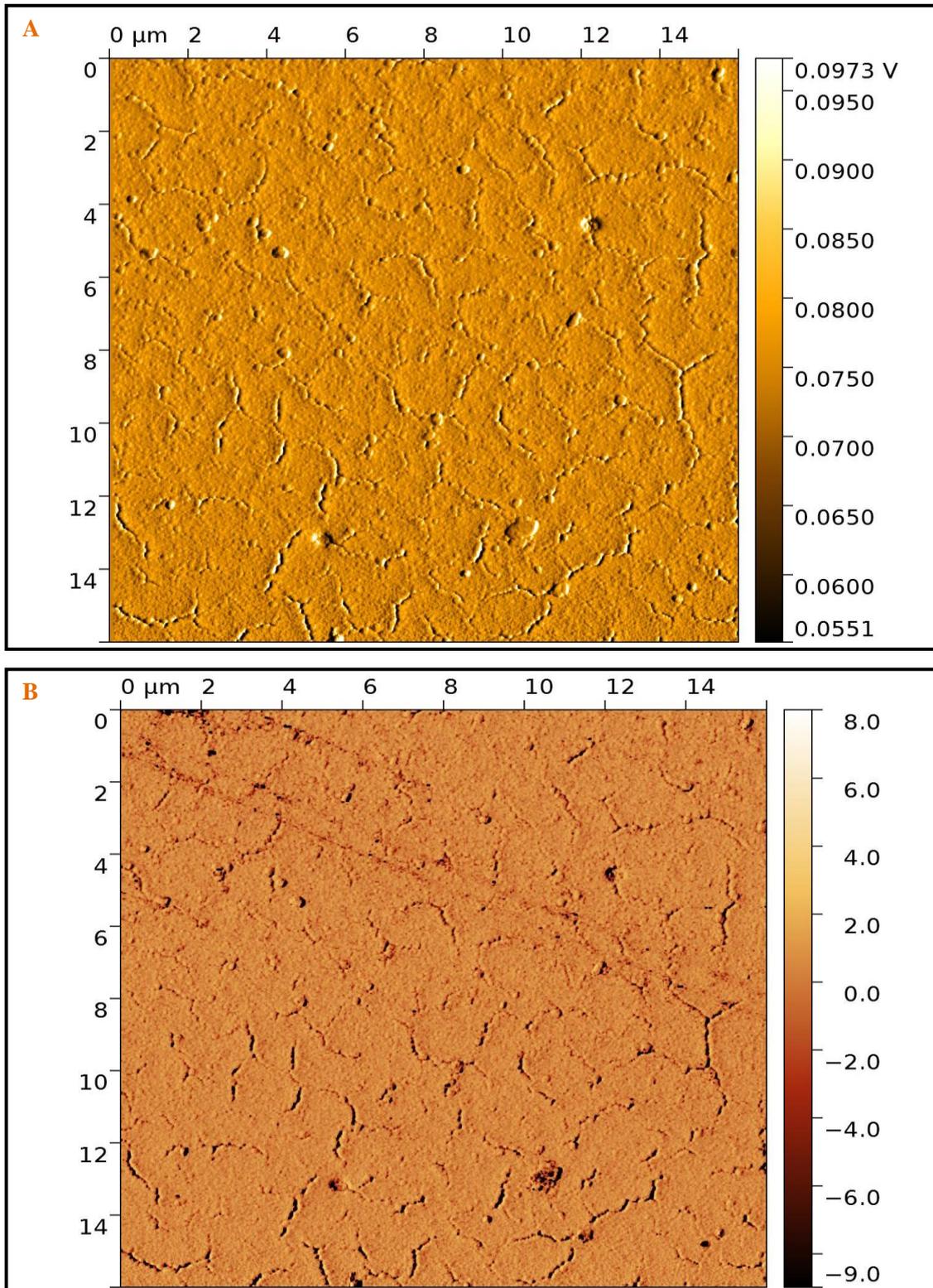


Figura 40: Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do substrato de vidro, do lado que contém o filme fino de SnO_2 , na área de varredura de $15\mu\text{m}$ por $15\mu\text{m}$: (A) Imagem da amplitude; (B) Imagem de contraste de fase.

Da mesma forma, imagens da topografia, amplitude e contraste de fases, e o perfil topográfico, foram obtidas para o outro lado do substrato (Figura 41 e 42), que não contém o filme fino de SnO₂, na mesma área de varredura. As variações da topografia foram entre 4nm a 28nm, aproximadamente, e da amplitude foram entre 56.1mV e 83,7mV. Também foi visualizada a presença de pequenos artefatos neste substrato.

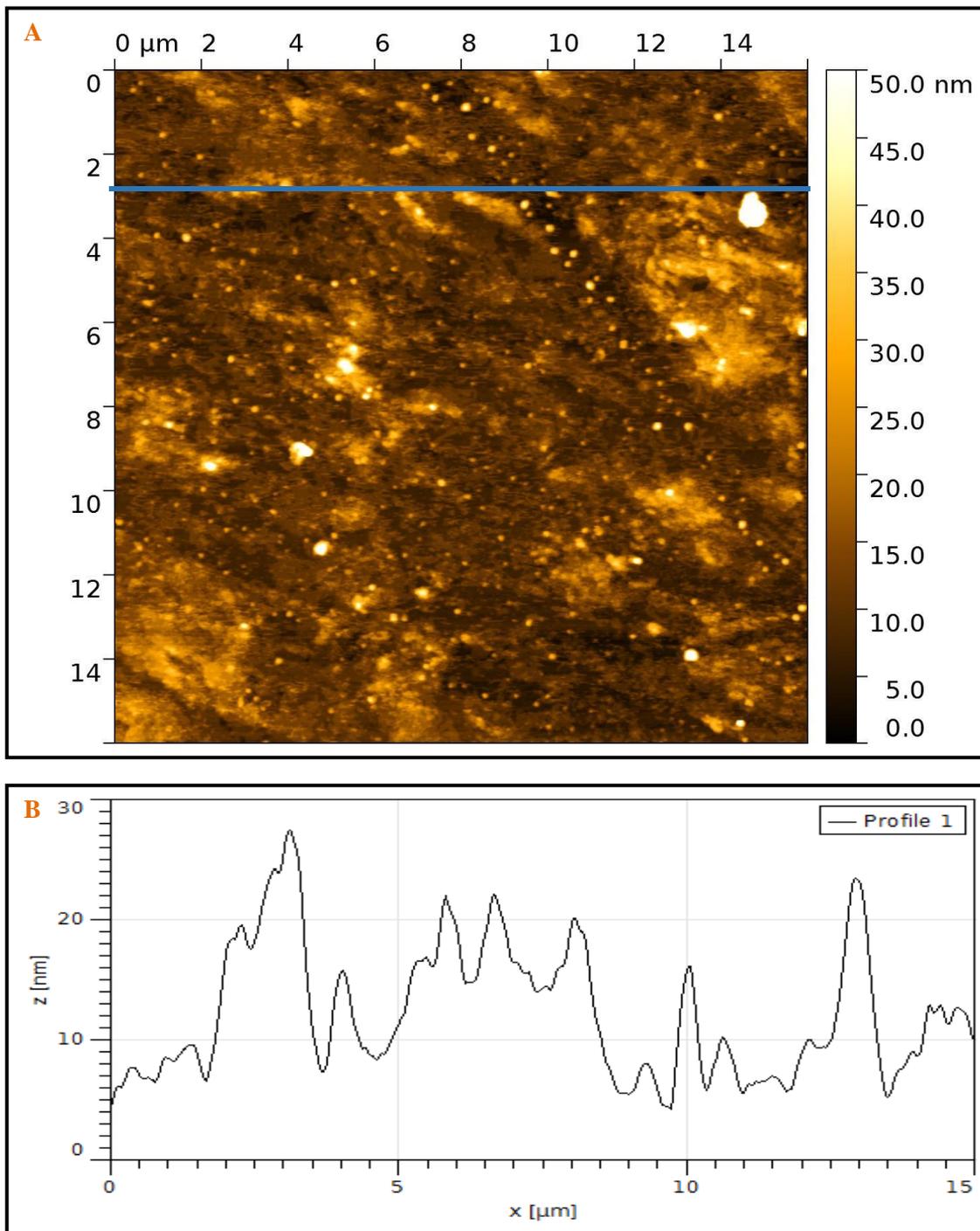


Figura 41: Imagem da topografia e perfil topográfico da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO₂, e na mesma área de varredura de 15µm por 15µm: (A) Imagem da topografia; onde a linha azul, na imagem, representa o traço do perfil topográfico (B) Perfil topográfico.

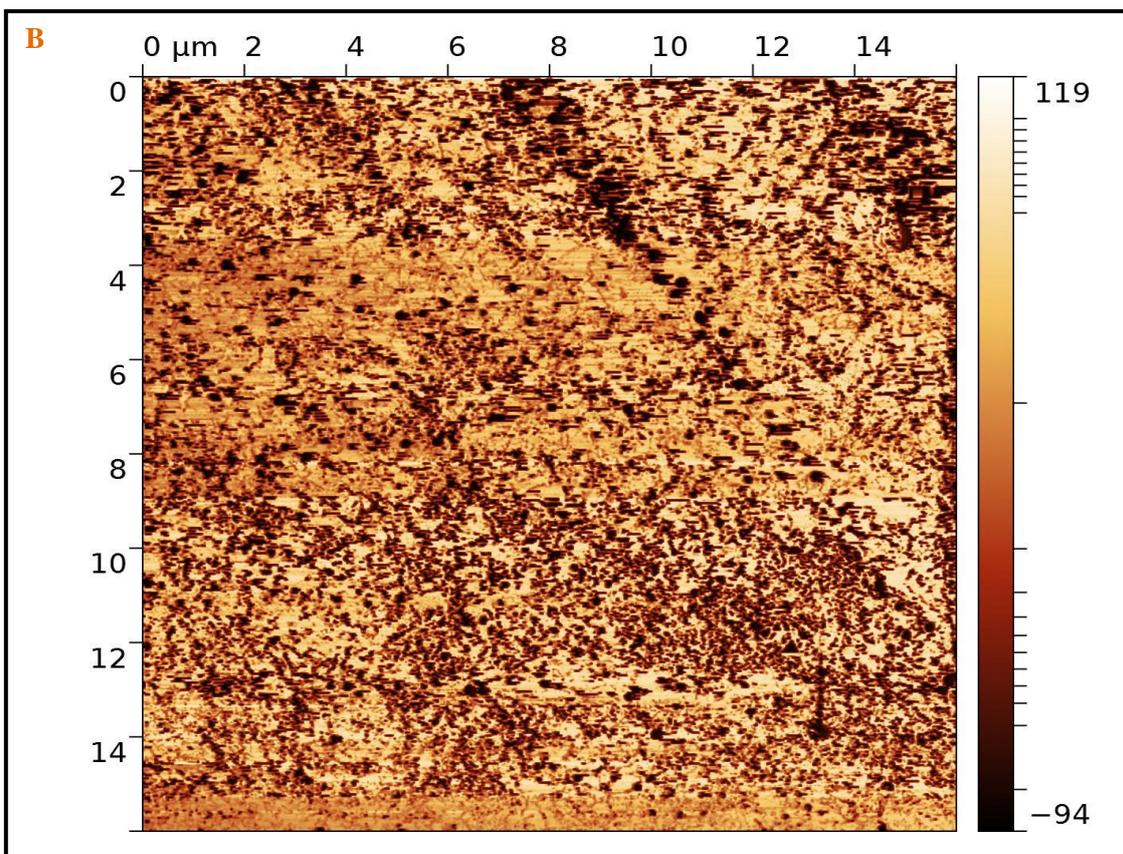
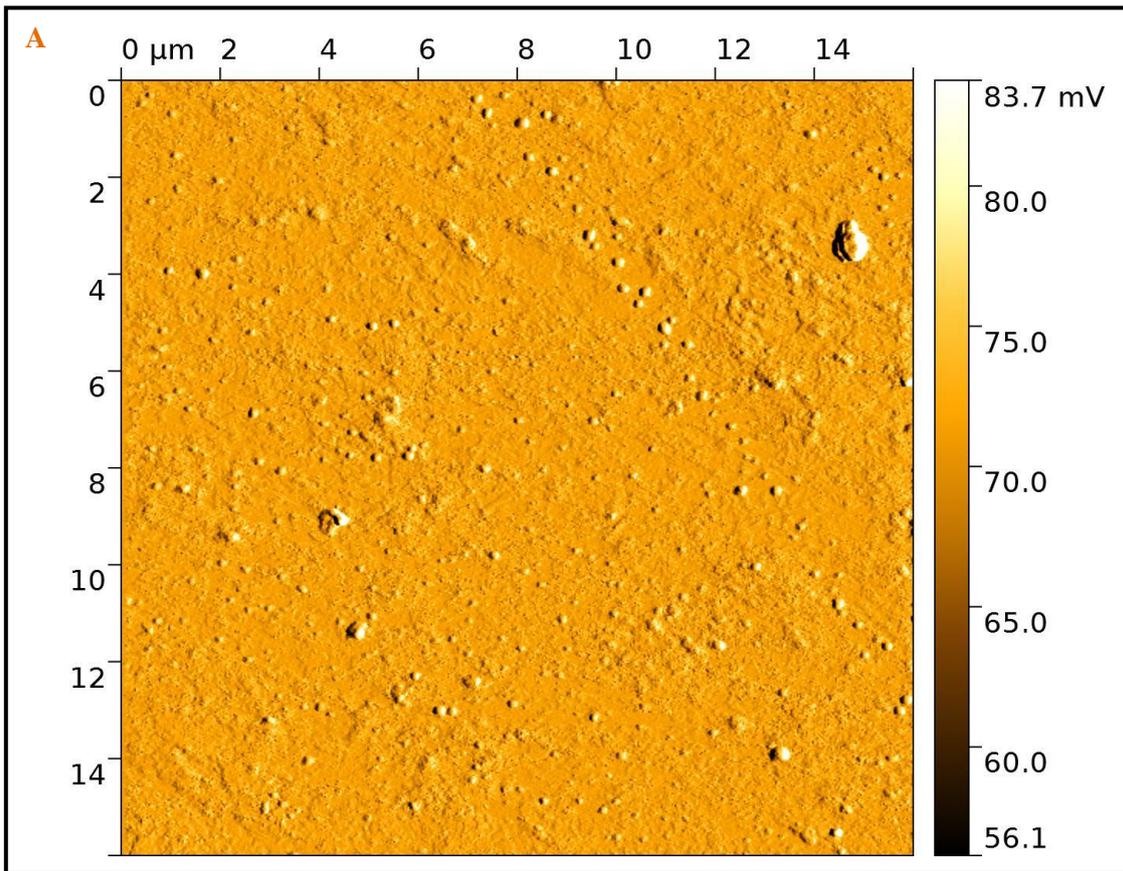


Figura 42: Imagens da amplitude e de contraste de fase da superfície do substrato de vidro, do lado oposto ao que contém o filme fino de SnO_2 , e na mesma área de varredura de $15\mu\text{m}$ por $15\mu\text{m}$: (A) Imagem da amplitude; (B) Imagem de contraste de fase.

Conforme as imagens obtidas pela Microscopia de Força Atômica, tanto o filme fino de SnO₂ - Fe 3% quanto o filme fino de SnO₂ apresentaram importantes variações na topografia, amplitude e contraste de fase, quando comparados o lado de cada substrato que contém o filme fino depositado com o lado do substrato que é apenas o vidro, ou seja, sem filme fino, o que evidencia a presença dos respectivos filmes finos depositados em cada substrato. As diferenças de valores de topografia, amplitude e contraste de fase encontradas, de um filme fino para outro, embora o tempo de deposição dos filmes seja o mesmo, podem ser explicadas pela presença do elemento ferro em um dos dois filmes, que tem importantes contribuições neste sentido.

4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Os filmes finos de SnO₂ e de SnO₂ com dopagem de 5% de Fe, ambos depositados no tempo de 2 horas, foram caracterizados pela Microscopia Eletrônica de Varredura (Figuras 43, 44 e 45), com o intuito de obter imagens das superfícies destes filmes finos, sendo escolhidos, semelhantemente à caracterização pela Microscopia de Força Atômica, um filme com dopagem de Fe e outro sem dopagem, ambos depositados em 2 horas, para entender a influência da dopagem. Como, neste tempo escolhido para a deposição dos seis principais filmes finos do trabalho, tem-se apenas um filme fino de SnO₂ intrínseco, o filme intrínseco utilizado no MEV foi o mesmo para o MFA.

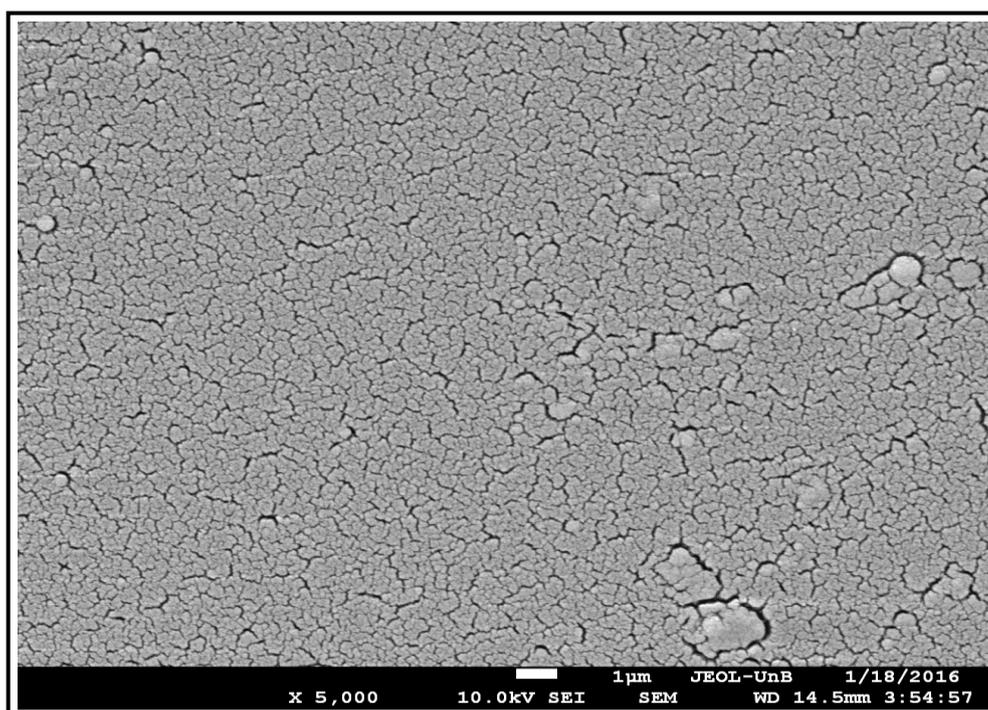


Figura 43: Imagem da superfície do filme fino de SnO₂ com dopagem de 5% de Fe, em uma magnificação (aumento) de 5000 vezes.

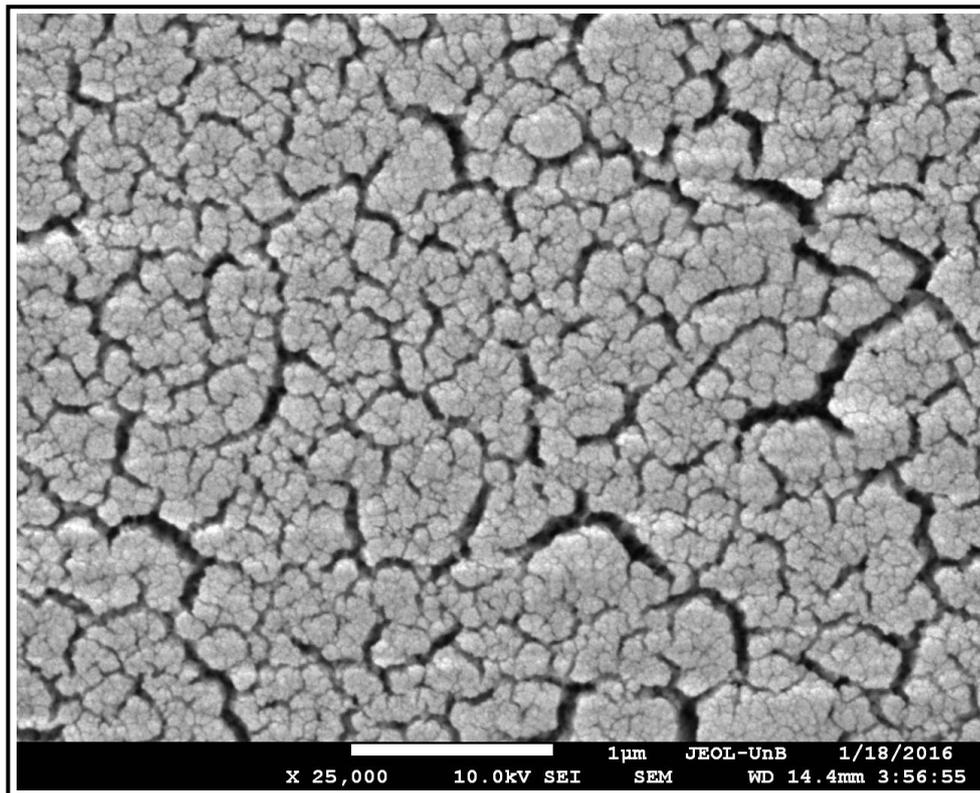


Figura 44: Imagem da superfície do filme fino de SnO₂ com dopagem de 5% de Fe, em uma magnificação de 25000 vezes.

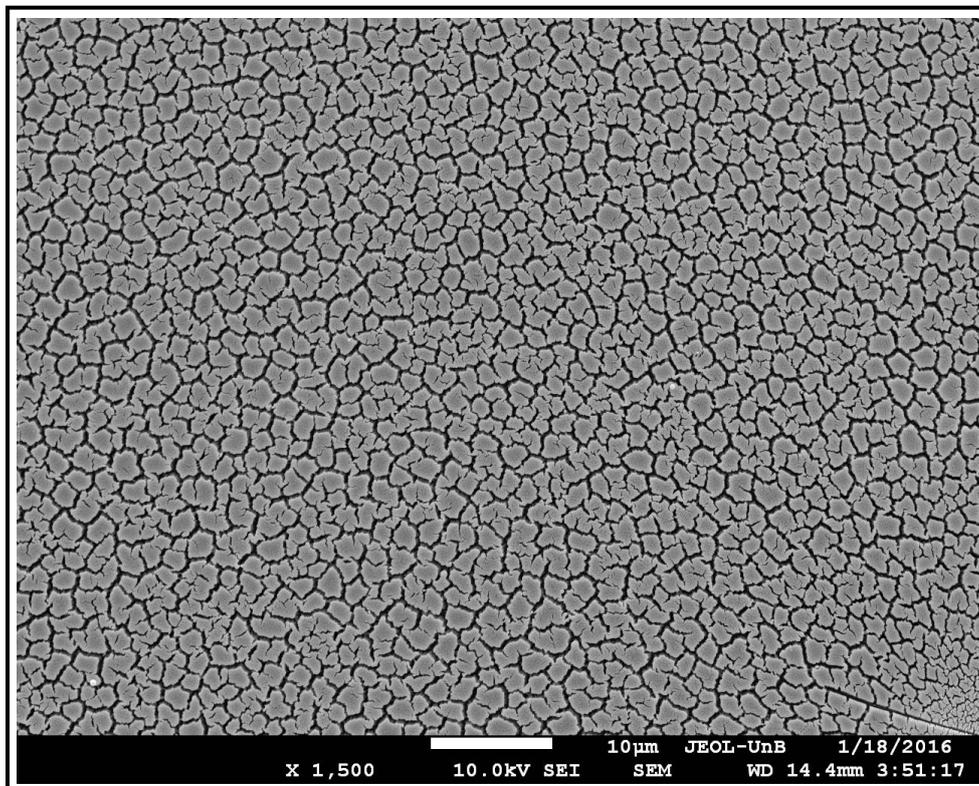


Figura 45: Imagem da superfície do filme fino de SnO₂ em uma magnificação de 1500 vezes.

Em ambos os filmes, a Microscopia Eletrônica de Varredura mostra um crescimento em colunas das superfícies dos filmes (Aragón 2017; Mori 2011), evidenciando os sulcos, em tons mais escuros, das paredes ou interfaces de crescimento das superfícies dos filmes, em tons mais claros.

O filme de SnO₂ está bastante homogêneo, bem mais homogêneo que o filme de SnO₂ - Fe 5%, pois este último apresenta algumas partes da superfície, na imagem, de dimensões diferentes, embora a maior parte da sua superfície esteja aparentemente homogênea. Isto pode ser explicado pela presença do elemento ferro, que é o dopante presente neste filme, e que está ausente no outro filme.

Comparando as imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura do filme de SnO₂ intrínseco com as imagens da topografia, amplitude e contraste de fase deste mesmo filme, processadas pelo Microscópio de Força Atômica⁵, é possível observar a formação destes sulcos de crescimento em colunas da superfície do filme nas três imagens, assim como a sua aparente homogeneidade.

4.1.3 Difratometria de Raios-X

O filme fino de SnO₂ e os filmes finos de SnO₂ dopadas com 1 a 5% de Fe, foram caracterizadas pela técnica de difração de Raios-X. Posteriormente, os resultados obtidos para cada filme fino foram refinados, pelo Método de Rietveld (Young 1995), gerando os espectros característicos do cristal de SnO₂ (Figuras 46 e 47).

Os padrões de difrações obtidos para cada filme fino mostraram a formação de uma única fase para todos os filmes, cuja estrutura cristalina corresponde à fase tetragonal do cristal de SnO₂ (Kumar *et al.* 2014; Yamazoe *et al.* 1991).

Assim, não foi possível observar, pela técnica de Difração de Raios-X, a formação de outras fases que não a fase tetragonal do SnO₂, para o filme fino intrínseco e os filmes com dopagem de ferro, em concentrações variando de 1 a 5% deste elemento. As intensidades e as larguras dos picos variaram, de um espectro para outro, o que, conforme já mencionado, está relacionado à localização dos átomos na célula unitária do cristal de SnO₂ e ao tamanho das partículas em seu interior.

⁵ Encontram-se nas páginas 95, 97 e 101 do trabalho.

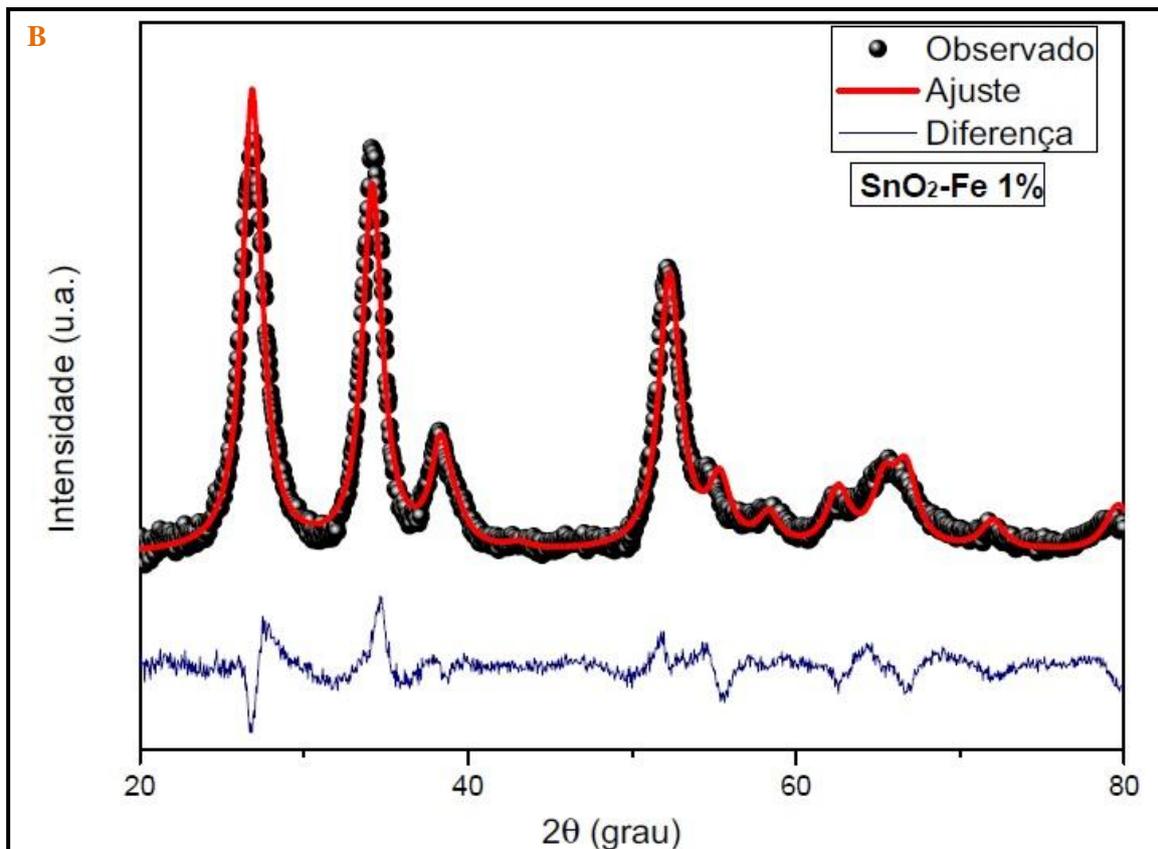
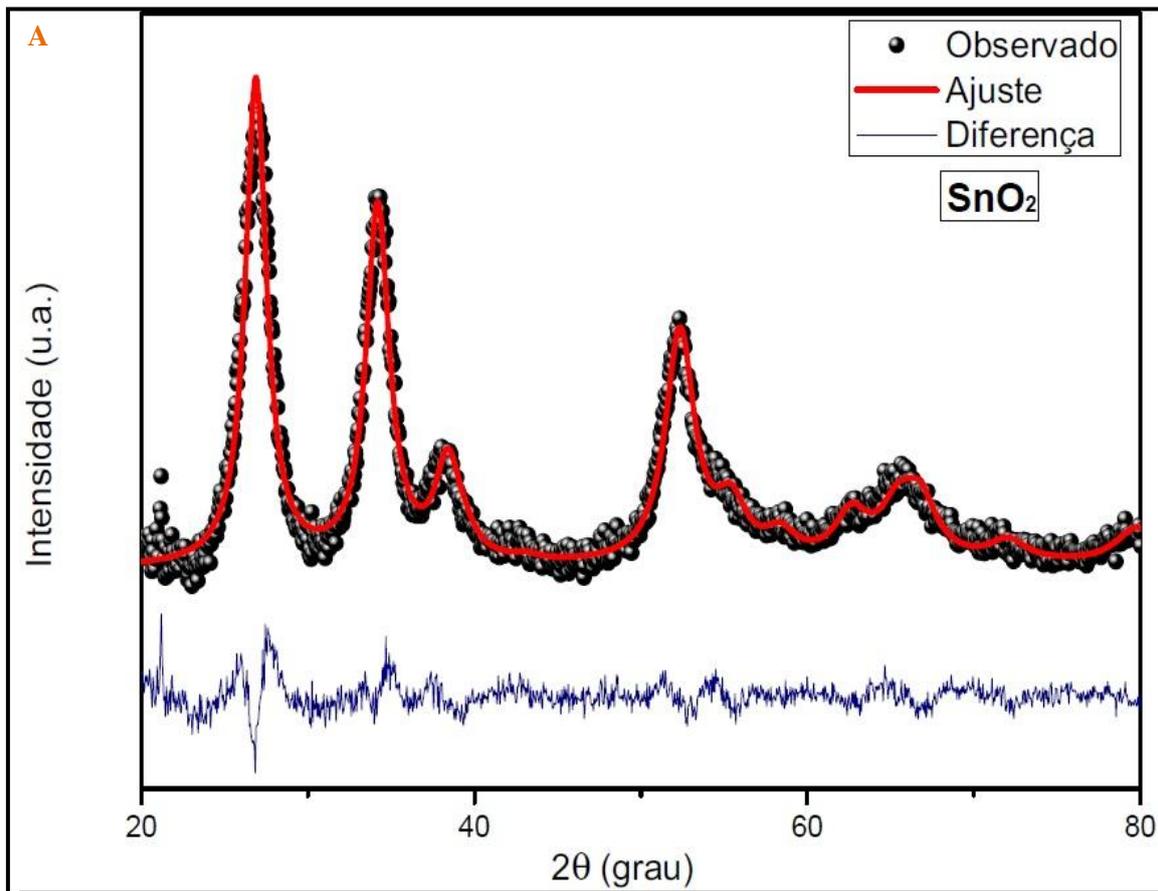


Figura 46: Padrão de Difração de Raios-X dos filmes finos de SnO₂ e SnO₂ - Fe 1%, mostrando o padrão observado ou medido, o refinamento ou ajuste pelo Método de Rietveld, e a diferença entre ambos: (A) Filme fino de SnO₂; (B) Filme fino de SnO₂ - Fe 1%.

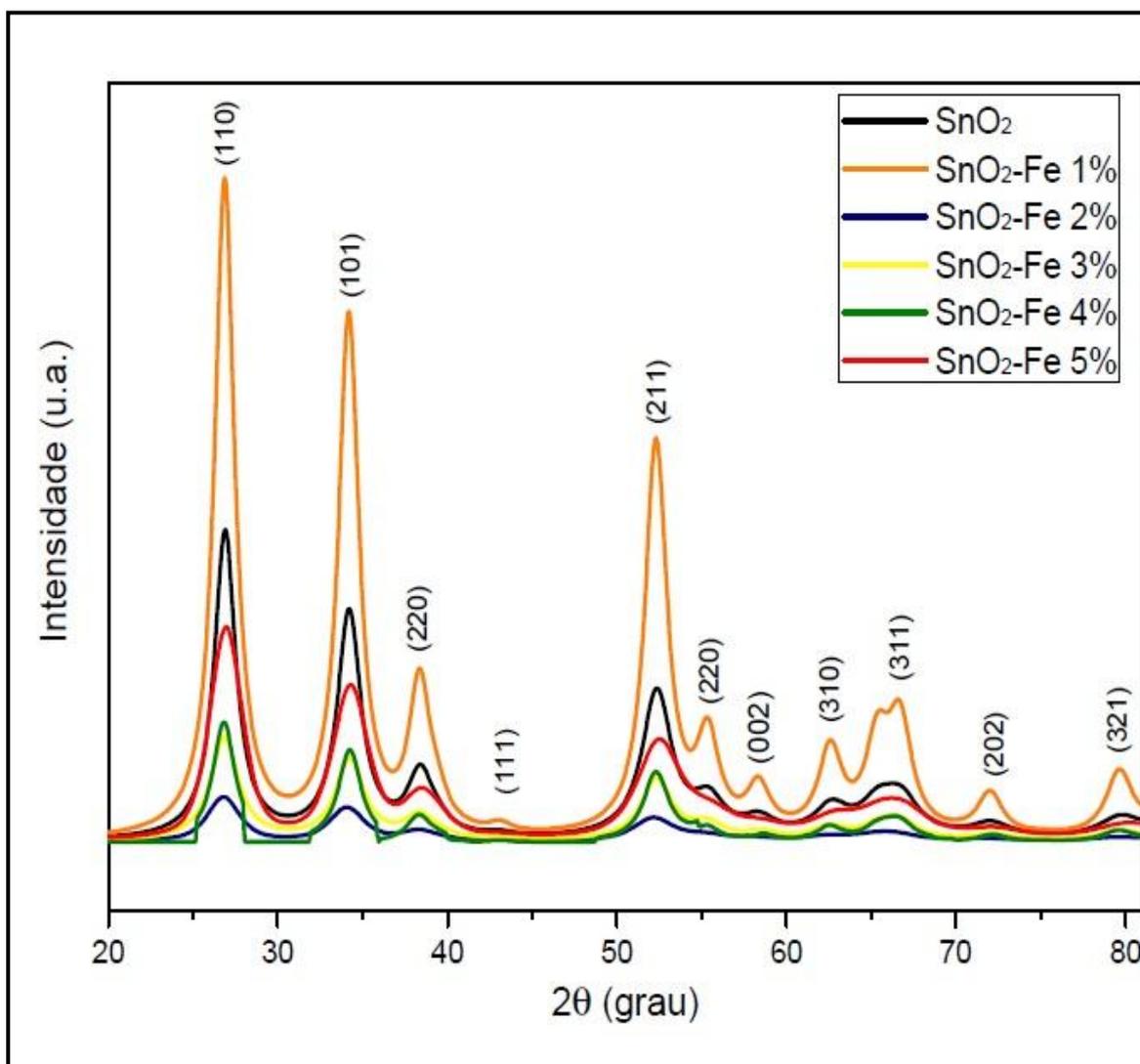


Figura 47: Padrão de Difração de Raios-X dos filmes finos de SnO₂ e SnO₂ com dopagem de 1 a 5% de Fe, refinados ou ajustados pelo Método de Rietveld, indicando os índices de Miller (h,k,l) referente a cada pico do padrão de difração.

Foram obtidos, do refinamento de Rietveld, valores dos parâmetros de rede, a , b e c , volume da célula unitária e densidade de cada filme fino (Tabela 8).

Tabela 8: Parâmetros de rede a , b e c , volume da célula unitária e densidade dos filmes finos.

Filme Fino	a (Å)	b (Å)	c (Å)	Volume (Å ³)	Densidade (g/cm ³)
SnO ₂	4,689	4,689	3,161	69,515	7,199
SnO ₂ -Fe 1%	4,694	4,694	3,163	69,686	7,152
SnO ₂ -Fe 2%	4,707	4,707	3,173	70,321	7,097
SnO ₂ -Fe 3%	4,695	4,695	3,155	69,561	7,103
SnO ₂ -Fe 4%	4,701	4,701	3,152	69,663	7,064
SnO ₂ -Fe 5%	4,679	4,679	3,154	69,050	7,058

Os dados apresentados para volume, densidade e parâmetros de rede dos filmes finos mostraram pequenas variações nos valores obtidos, de um filme para outro. O parâmetro de rede a ($a=b$) é menor no filme fino de SnO₂ dopado com 5% de Fe e maior no filme de SnO₂ dopado com 2% de Fe. Já o parâmetro de rede c é também maior no filme de SnO₂ - Fe 2% e menor no filme de SnO₂ - Fe 4%.

Entretanto a razão dos parâmetros c e a , c/a , de cada filme fino não varia, sendo igual a 0.7 em todos os filmes. No que diz respeito ao volume, este foi maior no filme de SnO₂ - Fe 2% e menor no filme de SnO₂ - Fe 5%. E, por fim, a densidade apresentou o maior valor no filme de SnO₂ e o menor valor no filme de SnO₂ com dopagem de 5% de Fe. Todos os valores dos dados apresentados, de parâmetros de rede, volume e de densidade, do filme fino de SnO₂ - Fe 5% são menores que os do filme de SnO₂ intrínseco. Estes resultados indicam que o volume da célula unitária não mostra uma dependência evidente com a concentração de dopagem de Fe no cristal de SnO₂.

4.1.4 Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível

Os filmes finos de SnO₂ e de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe foram analisados pela técnica de Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível. O espectro de absorção, definido pela razão da absorbância (A) em função do comprimento de onda (λ) do feixe de luz monocromático incidente, são apresentados para cada filme fino (Figura 48), na região do ultravioleta e do visível.

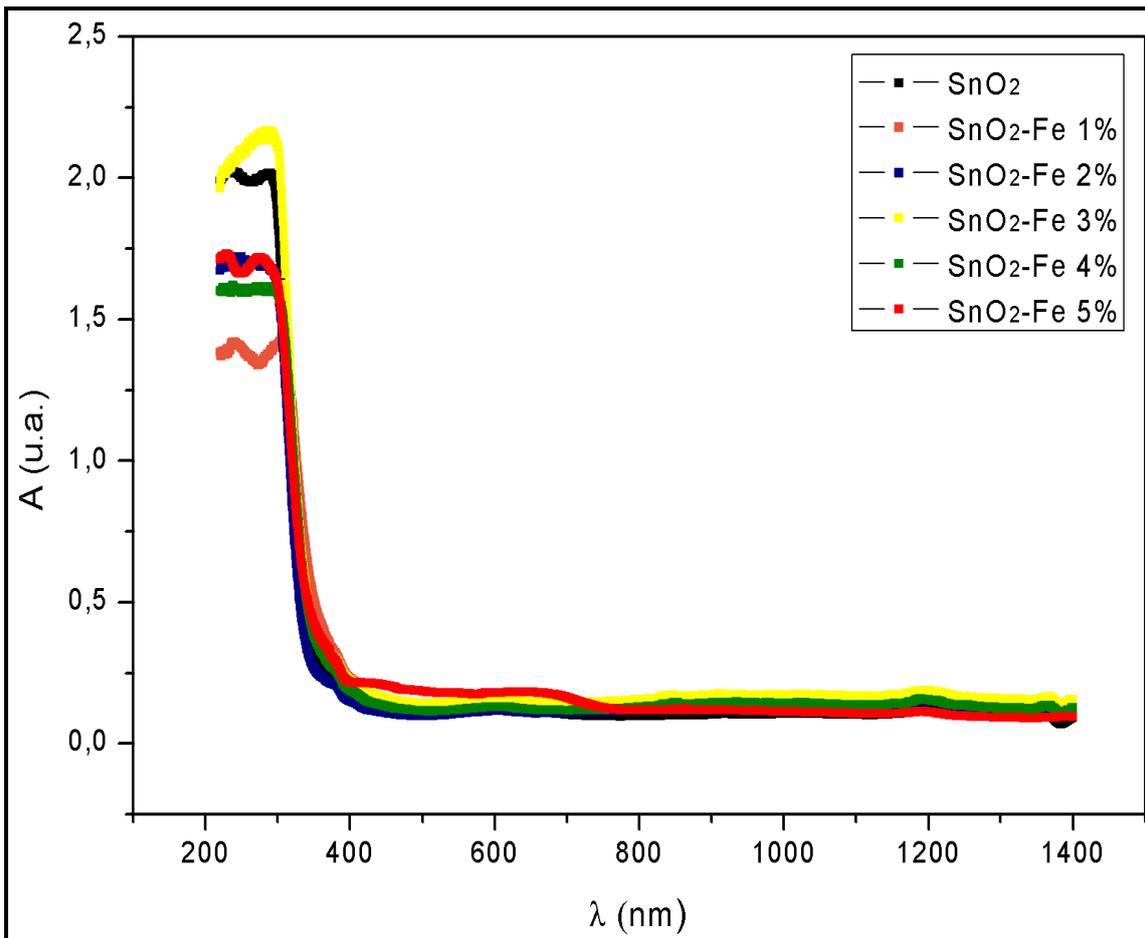


Figura 48: Espectro de absorção dos filmes finos de SnO₂ e de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe, pela técnica de Espectrofotometria no Ultravioleta e Visível.

Observa-se que a maior absorbância pelos filmes finos ocorre na faixa de comprimento de onda, do feixe de luz, compreendida entre 200 e 400 nanômetros, ou seja, na região do ultravioleta. A absorção, pelos filmes, na região acima de 400 nm, ou seja, na região do visível, é muito baixa, próxima a zero. O melhor comprimento de onda para a análise de um determinado material é aquele em que há uma maior absorção de luz, ou seja, uma maior absorbância, e, assim, uma menor transmitância, ou seja, menor transmissão de luz pelo material (Faust 1997). Logo, para os filmes finos de SnO₂ e de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe, deste trabalho, este comprimento se situa na faixa de 200 a 400 nm.

O método de Tauc (Tauc 1974) foi utilizado neste trabalho para determinar o *gap* de energia (banda proibida) de todos os filmes finos confeccionados. Segundo este método, o *gap* óptico de energia (E_g^{opt}) está relacionado com a absorbância (A), de acordo com a relação proposta pela equação (13), onde, para semicondutores de *gap* direto, $n = 2$ (Aquino 2014):

$$Ah\nu = A (h\nu - E_g^{\text{opt}})^n \quad (13)$$

Sendo ν a frequência do feixe de luz, h a constante de Planck ($6.62 \times 10^{-34} \text{J}$).

A partir de uma reta traçada em um gráfico da razão $h\nu A^2$ vs $h\nu$, pode-se determinar o *gap* de energia (Figura 49).

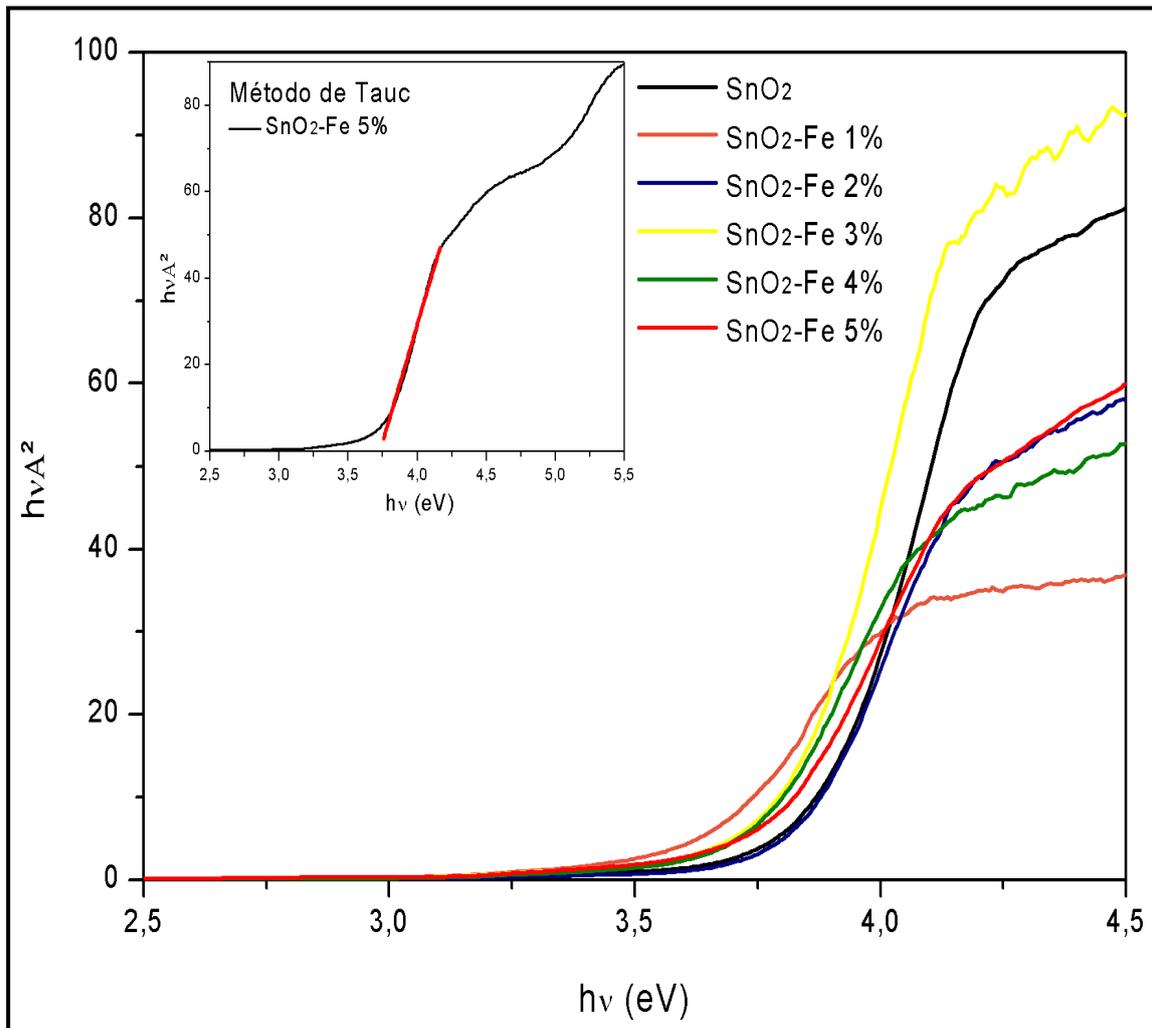


Figura 49: Gráfico de $h\nu A^2$ vs $h\nu$ dos filmes finos de SnO_2 e de SnO_2 dopados com 1 a 5% de Fe, confeccionado para a aplicação do Método de Tauc. O método é apresentado, para a amostra de SnO_2 - Fe5%, no menor quadrante, para a visualização da sua aplicação e determinação do *gap* ótico de energia para este filme e, semelhantemente, para os outros filmes finos. O *gap* de energia para o filme de SnO_2 - Fe 5% é de 3.75 eV.

Os valores encontrados para o *gap* de energia de cada filme variaram entre 3.61 eV e 3.85 eV (Figura 50 e Tabela 9), o que condiz com o encontrado na literatura para o sólido cristalino de SnO_2 (Aragón 2010; Sánchez-Zeferino *et al.* 2012).

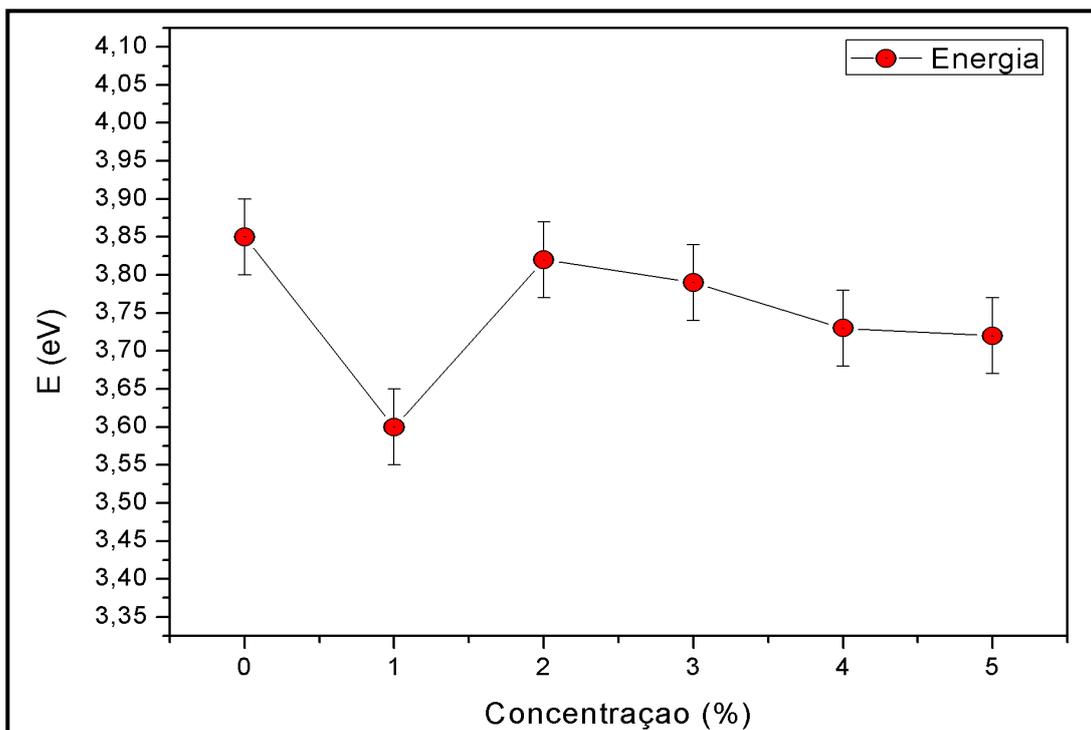


Figura 50: Energia do *gap* pela concentração de Fe em cada filme fino de SnO₂.

Tabela 9: Valores da energia do *gap* dos filmes finos.

Filme Fino	Energia do gap (eV)
SnO ₂	3,85 (+/- 0,03)
SnO ₂ -Fe 1%	3,61 (+/-0,03)
SnO ₂ -Fe 2%	3,83 (+/-0,03)
SnO ₂ -Fe 3%	3,80 (+/-0,03)
SnO ₂ -Fe 4%	3,76 (+/-0,03)
SnO ₂ -Fe 5%	3,74 (+/-0,03)

Os resultados da energia do *gap* dos filmes finos de SnO₂ e de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe, mostraram uma tendência a diminuição, bem pequena, à medida que a concentração de Fe, como dopante, aumentou, sendo, dessa forma, o maior valor de energia do *gap*, o do filme fino sem dopagem ou intrínseco.

O valor da energia do *gap* encontrado para o filme fino de SnO₂ - Fe 1%, bem inferior aos valores encontrados para os demais filmes, pode ser explicado pela presença de bandas de energia localizadas abaixo do *gap* ótico, que pode influenciar os resultados obtidos pelo Método de Tauc. A presença destas bandas pode estar relacionada à

ocorrência de defeitos cristalinos, como vacâncias, na estrutura do rutilo ou SnO_2 devido à dopagem com o Fe, que podem formar níveis profundos dentro do *gap* (Aquino 2014; Yu & Cardona 2003). Estes defeitos podem ter sido produzidos majoritariamente, nesta amostra, por alguma variação de algum parâmetro na fase de preparação do alvo, durante a deposição do filme fino ou mesmo durante o tratamento térmico.

4.1.5 Medições magnéticas

Como mencionado no capítulo Metodologia deste trabalho⁶, foi feita uma medição, no sistema de medições magnéticas, de uma lâmina de microscopia limpa, sem a presença de um filme fino depositado em sua superfície, para retirar a diferença da resposta do vidro em todas as análises de propriedades magnéticas obtidas para cada filme, uma vez que o vidro é o substrato no qual todos os filmes encontram-se depositados sobre a sua superfície e influencia o resultado magnético obtido (Figura 51). Logo, para todas as respostas magnéticas obtidas dos filmes, a 300K, foi retirada, de cada uma, para efeitos de correção, a resposta do vidro da lâmina na mesma temperatura.

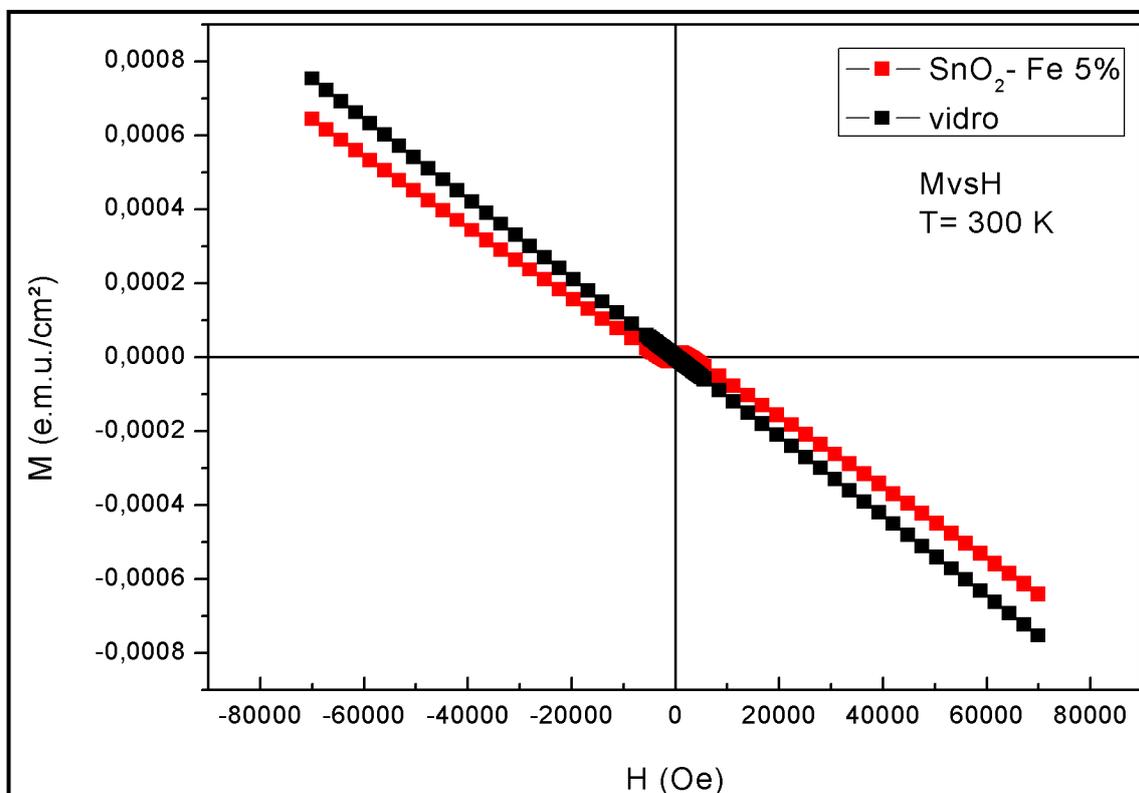


Figura 51: Medidas, no sistema de medições magnéticas, da magnetização (M) pelo campo magnético H , do vidro, que é o substrato sobre o qual os filmes foram depositados, e do filme fino de SnO_2 -Fe 5%, a uma temperatura de 300K, para visualização da influencia da resposta do vidro nas medições magnéticas, através da diferença da resposta deste para a resposta do filme.

⁶ Encontra-se na página 84 do trabalho.

Um gráfico da magnetização (momento por unidade de área) em função do campo magnético aplicado, de todos os filmes finos dopados com Fe, foi confeccionado, com as devidas correções (Figura 52).

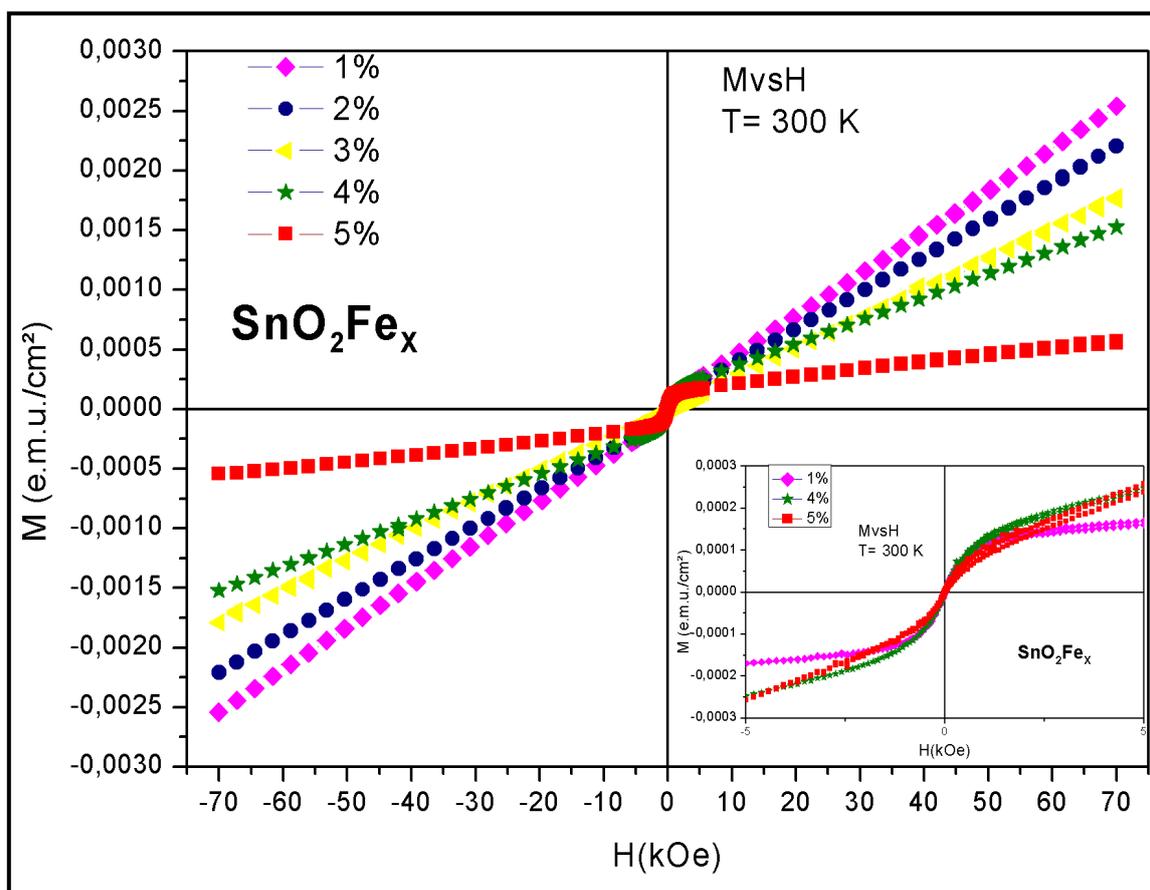


Figura 52: Magnetização (M), onde os valores obtidos de magnetização na análise foram divididos pela área (cm²) de cada filme, pelo campo magnético (\vec{H}), à temperatura (T) de 300K, dos filmes finos de SnO₂ dopados com concentrações de 1 a 5% de Fe. O gráfico de MxH no menor quadrante mostra, para três dos cinco filmes, dopados em 1%, 4% e 5%, o comportamento magnético dos filmes finos.

O filme fino de SnO₂ dopado com 1% de Fe apresenta um comportamento linear na região de altos campos magnéticos (Figura 53). Este comportamento linear, que define materiais paramagnéticos, fica menos intenso no filme de SnO₂ dopado com 5% de Fe.

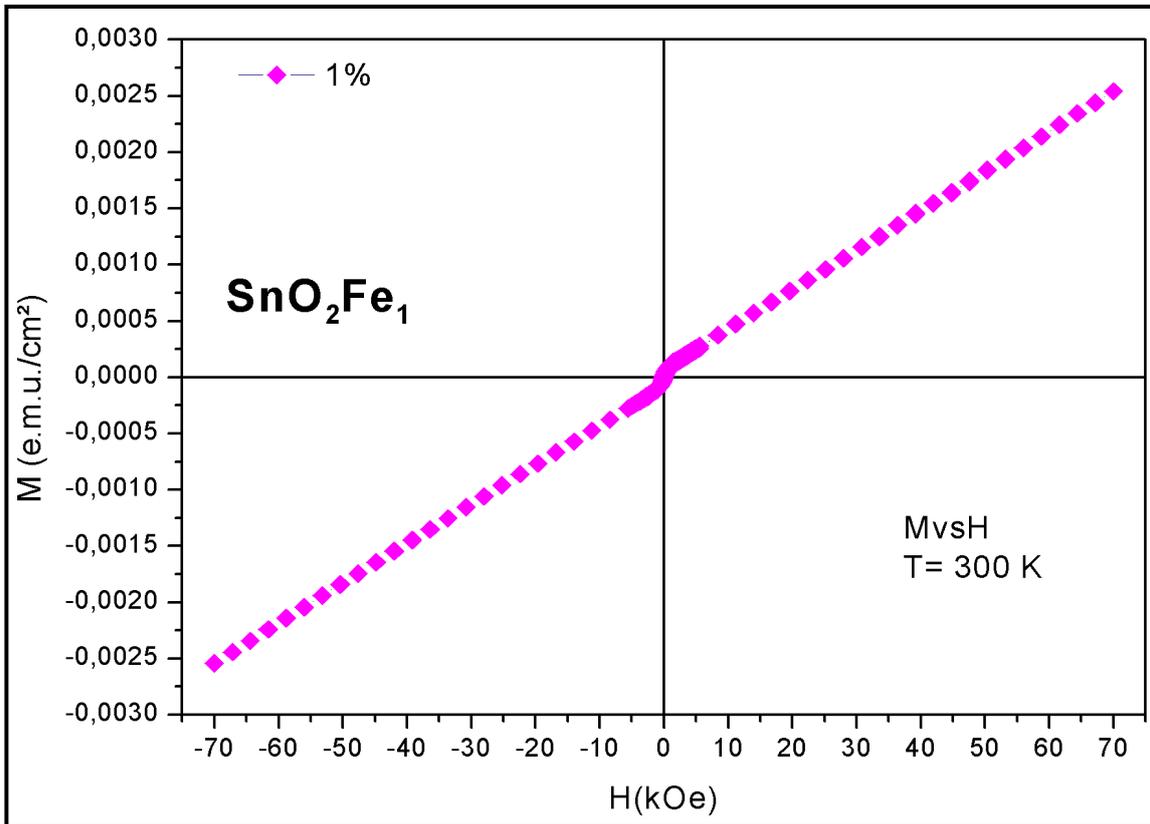


Figura 53: Magnetização (M) do filme fino de SnO₂ dopado com 1% de Fe, em função do campo magnético (H), a uma temperatura (T) de 300K, evidenciando o comportamento paramagnético mais evidente nas regiões de alto campo magnético (entre ±70kOe e ±10kOe) e o comportamento ferromagnético menos evidente nas regiões de baixo campo magnético (entre ±10kOe e 0kOe).

O que se observa, a respeito deste comportamento linear, é uma menor evidência deste, na região de altos campos magnéticos, à medida que a concentração de Fe, nos filmes, aumenta. Em contrapartida, nas regiões de baixos campos magnéticos, com \vec{H} próximo ou igual a zero kOe, o comportamento magnético dos filmes finos muda, de linear, tipicamente paramagnético, para uma curva de magnetização, característica de materiais ferromagnéticos.

Da mesma forma que o comportamento paramagnético dos filmes, porém, ao contrário, tem-se uma maior evidência do comportamento ferromagnético à medida que a concentração de Fe, nos filmes, aumenta (Figura 54). Assim, tem-se uma coexistência de fases magnéticas, apresentadas pelos filmes finos dopados com Fe, caracterizadas pelos comportamentos paramagnéticos e ferromagnéticos.

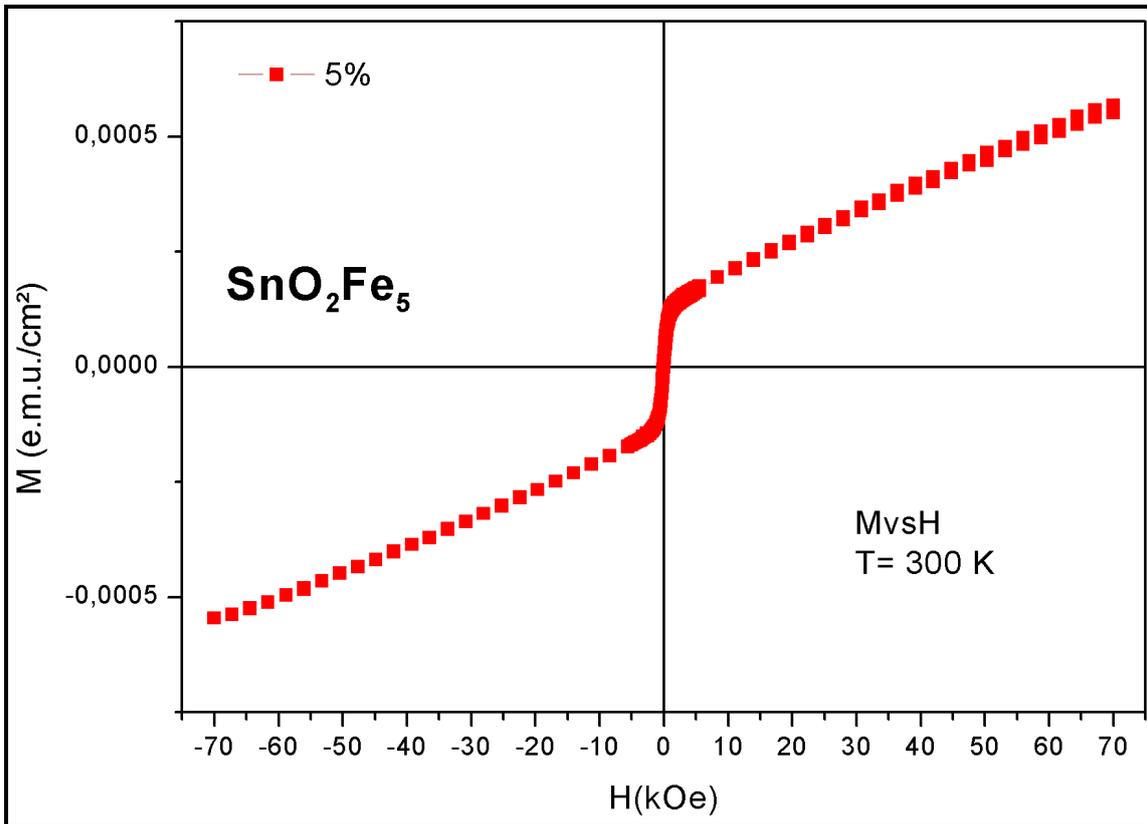


Figura 54: Magnetização (M) do filme fino de SnO_2 dopado com 5% de Fe, em função do campo magnético (H), a uma temperatura (T) de 300K, evidenciando o comportamento paramagnético menos evidente nas regiões de alto campo magnético (entre $\pm 70\text{kOe}$ e $\pm 10\text{kOe}$) e o comportamento ferromagnético mais evidente nas regiões de baixo campo magnético (entre $\pm 10\text{kOe}$ e 0kOe).

A dependência térmica da magnetização também foi estudada no trabalho. A magnetização normalizada (razão da magnetização determinada na temperatura variando de 5 a 300K pela magnetização determinada a 300K), foi obtida para os filmes de SnO_2 dopados com 1, 4 e 5% de Fe, em uma faixa de temperatura de 5 a 300K e em um campo aplicado de 1000 Oe (Figura 55). Como pode ser observado, os comportamentos paramagnéticos e ferromagnéticos dos filmes finos com dopagem de 1%, 4% e 5% de Fe é evidenciado.

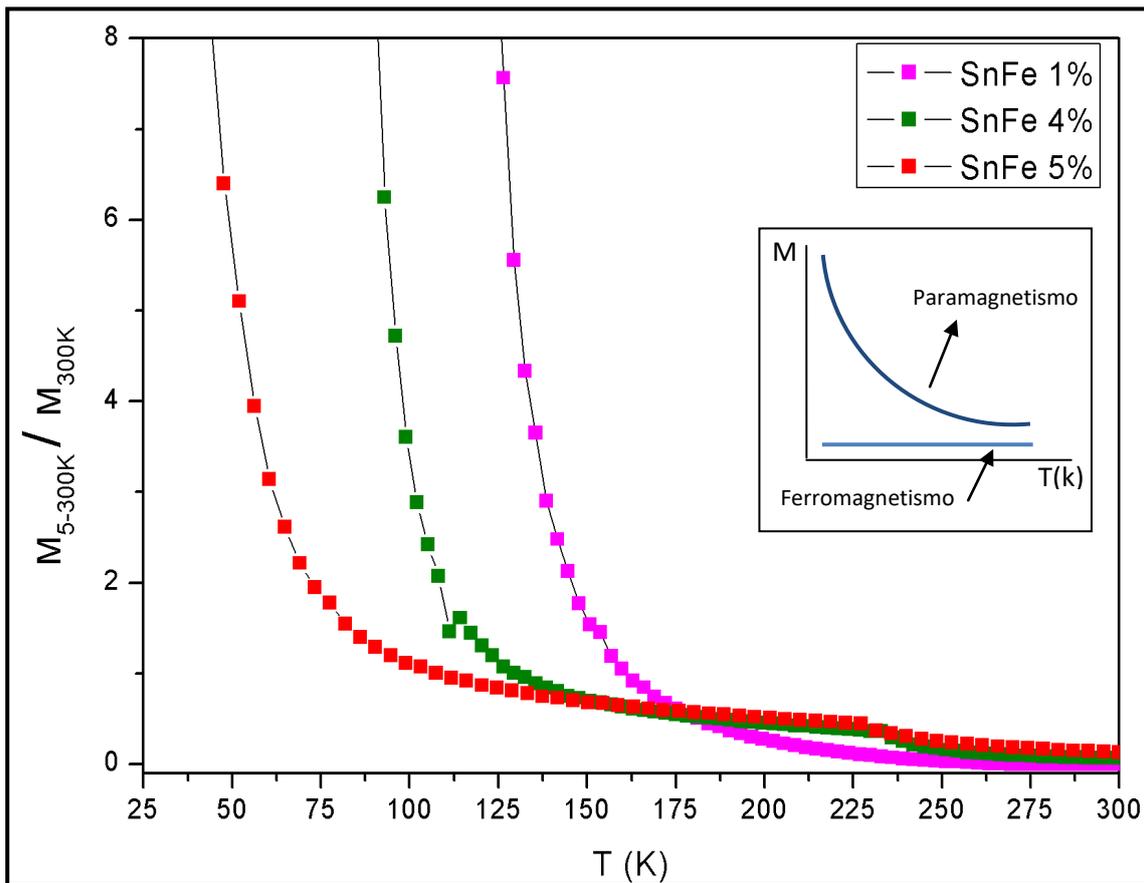


Figura 55: Magnetizações (M) normalizadas em função da temperatura (T). A normalização da magnetização é a razão da magnetização à temperatura no intervalo de 5K a 300K pela magnetização à temperatura de 300K. O gráfico do menor quadrante representa os comportamentos paramagnético e ferromagnético esperados para uma amostra em um gráfico de magnetização por temperatura, segundo a lei de Curie que estabelece, para materiais que possuem uma fase paramagnética, mas que não são paramagnetos ideais, que a magnetização é inversamente proporcional à temperatura.

Como exposto no capítulo Revisão Teórica do trabalho⁷, os materiais que possuem fase paramagnética, mas que não são paramagnetos ideais, tem suas propriedades magnéticas dependentes da temperatura fornecida, pela conhecida Lei de Curie, onde a susceptibilidade magnética deste material, que é a sua capacidade em magnetizar-se sob a ação de um campo magnético externo, é inversamente proporcional à temperatura (Nussbaum 1971).

O comportamento paramagnético, como já mencionado, é mais intenso no filme fino de SnO_2 dopado com 1% de Fe e menos intenso no filme dopado com 5% de Fe. O oposto ocorre para o comportamento ferromagnético nestes filmes, onde há uma maior evidência do comportamento ferromagnético no filme de $\text{SnO}_2 - 5\%$ Fe.

⁷ Encontra-se na página 40 do trabalho.

4.1.6 Testes de sensores para o gás metano dos filmes finos

Os testes de sensores para o gás metano mostram a variação da resistência elétrica, medida em ohms (Ω), em função do tempo, medido em segundos (s), de cada filme fino de SnO_2 e de SnO_2 dopados com 1 a 5% de Fe.

No capítulo Metodologia do trabalho foi mencionado⁸ que, para a escolha do melhor tempo de deposição para a fabricação dos principais filmes finos semicondutores de SnO_2 da dissertação, com dopagem de 1 a 5% de Fe e intrínseco, foram confeccionados, primeiramente, quatro filmes finos de SnO_2 dopados em apenas uma concentração estequiométrica de Fe. A concentração escolhida, por ser a maior concentração dentre as definidas para a realização deste trabalho, foi a de 5% do elemento Fe.

Dessa forma, quatro filmes finos de SnO_2 , dopados com 5% de Fe foram feitos adotando a mesma metodologia descrita no capítulo, sendo cada filme depositado em um único tempo de deposição entre 1, 2, 3 e 4 horas. Os quatro filmes de SnO_2 – Fe 5% foram testados, em 200°C, conforme descrito na metodologia, para a escolha do melhor teste de sensor e, conseqüentemente, o melhor tempo de deposição (Figura 56).

A escolha do melhor teste de sensor baseou-se no parâmetro de sensibilidade de cada filme fino, sendo que, o filme fino que apresentou o melhor desempenho como sensor para o gás metano, ou seja, que mostrou o melhor resultado para o parâmetro mencionado, foi o filme fino escolhido para determinar o tempo em que seriam depositados os filmes finos principais do trabalho.

O parâmetro tempo de resposta foi calculado, para cada teste de sensor realizado, como a metade do tempo em que cada sensor respondeu à presença do gás metano, que é o gás alvo do trabalho. A resposta do sensor à presença de um gás alvo se dá pela mudança na resistência, medida em função do tempo. Dessa forma, o tempo de resposta foi calculado como a metade da diferença entre o tempo, medido em segundos, em que o sensor apresenta um valor mínimo e um valor máximo da resistência na presença do gás metano, durante o teste de sensor.

Como no parâmetro tempo de resposta os resultados encontrados variaram muito pouco de um filme para outro, o parâmetro considerado para definir o desempenho dos sensores de gás foi o parâmetro sensibilidade. O maior valor apresentado do parâmetro sensibilidade foi considerado o melhor desempenho como sensor para o gás metano.

⁸ Encontra-se na página 79 do trabalho.

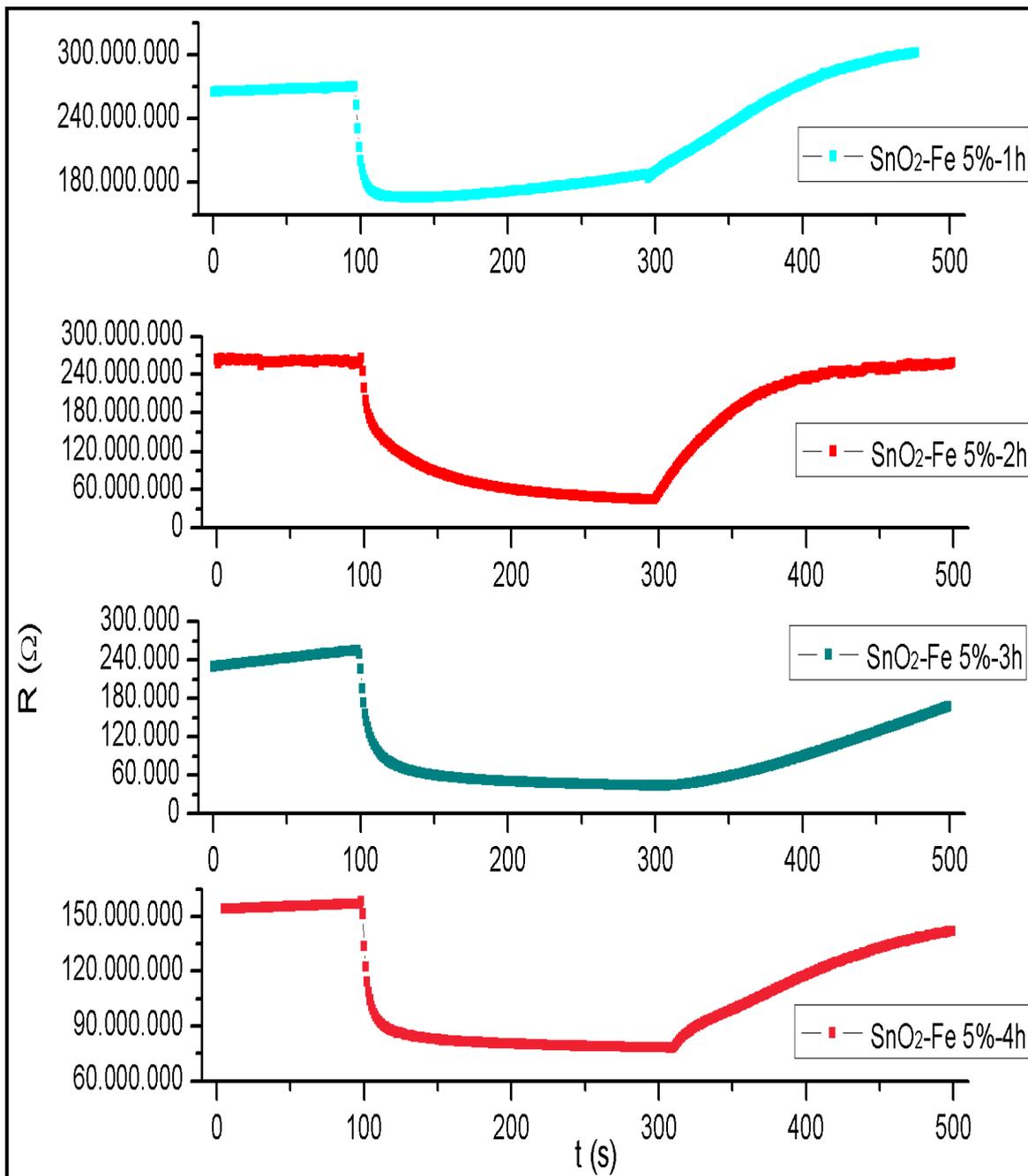


Figura 56: Resistência (R) pelo tempo (t) dos testes para sensores do gás metano à 200°C, de filmes finos de SnO₂- Fe 5%, depositados em 1 a 4 horas pela técnica de pulverização catódica.

Os dados de sensibilidade obtidos pelos testes de sensores de gás metano dos filmes finos de SnO₂ - Fe 5% (Tabela 10), embasaram a escolha do tempo de deposição dos filmes finos de SnO₂ dopados em concentrações de 1%, 2%, 3% e 4% de Fe do trabalho, por ser um importante parâmetro de avaliação de desempenho de sensores de gás.

Tabela 10: Dados dos testes para sensores do gás metano de filmes finos de SnO₂-Fe 5%.

Amostra	Sensibilidade
SnO ₂ -Fe 5%-1h	5,1
SnO ₂ -Fe 5%-2h	6,6
SnO ₂ -Fe 5%-3h	6,3
SnO ₂ -Fe 5%-4h	2,1

Conforme constatado, o filme fino de SnO₂ - Fe 5% depositado no tempo de 2 horas apresenta melhor sensibilidade que os demais filmes de mesma concentração, mas depositados em tempos diferentes (Figura 57). Assim, determinou-se como 2 horas o tempo de deposição padrão para todos os principais filmes finos de SnO₂ do trabalho.

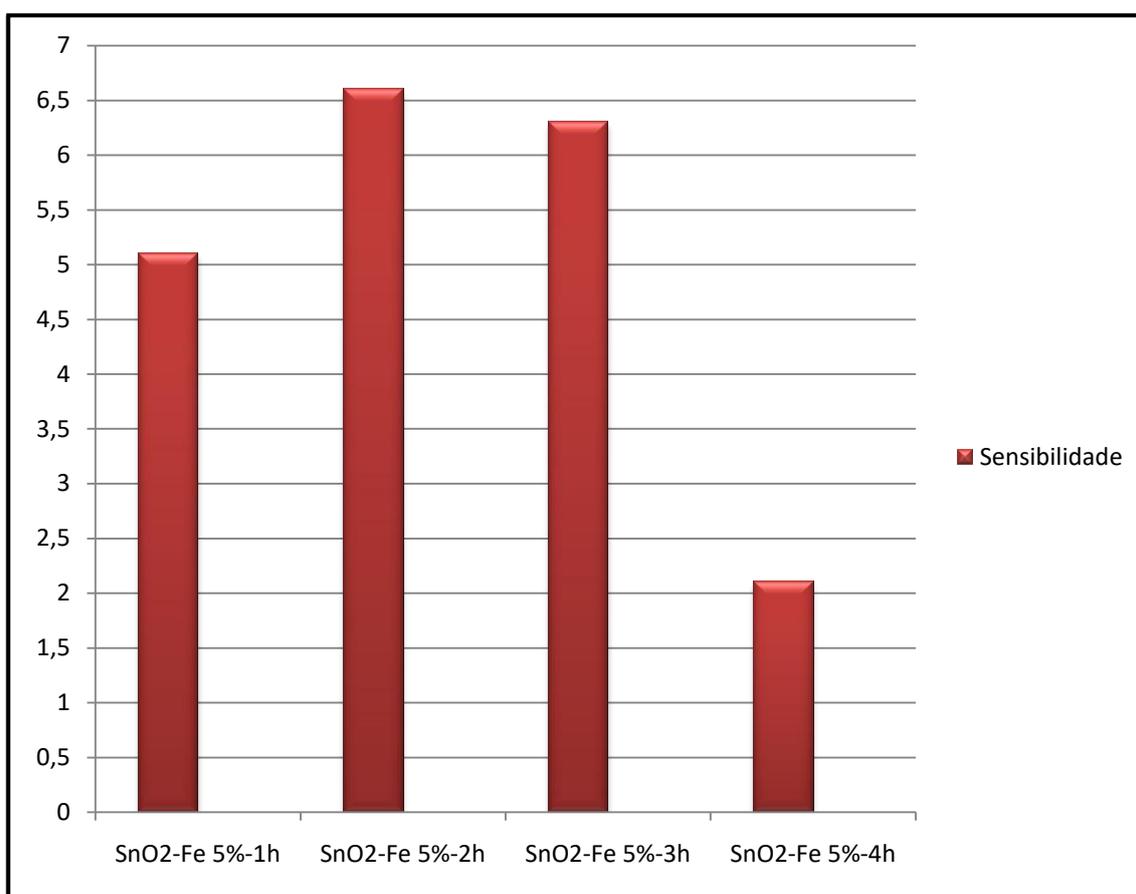


Figura 57: Dados de sensibilidade dos testes para sensores do gás metano de filmes finos de SnO₂ - Fe 5%, depositados em 1 a 4 horas.

Conforme reportado na literatura (Basu *et al.* 2008; Miller *et al.* 2006; Rothschild & Komem 2004) e mencionado no capítulo Revisão Teórica do trabalho⁹, a espessura dos filmes tem fundamental importância no que diz respeito à resposta dos sensores. Para que se tenha uma alta resposta do sensor semiconductor de óxidos metálicos, a região repleta de elétrons, em decorrência da quimiossorção do oxigênio na sua superfície e conseqüente ganho de elétrons, usualmente indicada pelo comprimento de Debye dos elétrons no sensor de SnO₂, deve ter a espessura próxima à espessura dos filmes finos de óxidos metálicos, sendo esta espessura medida pela largura dos contatos intergranulares entre as partículas adjacentes do SnO₂. A condutividade dos sensores de óxidos metálicos aumenta linearmente com o decréscimo de densidade de cargas retidas, inversamente proporcional ao tamanho do cristalito.

Os filmes finos de SnO₂ sem dopagem de Fe ou intrínsecos, foram também produzidos em quatro tempos de deposição diferentes, semelhantemente aos filmes finos dopados com 5% de Fe, de 1 a 4 horas de deposição (Figura 58).

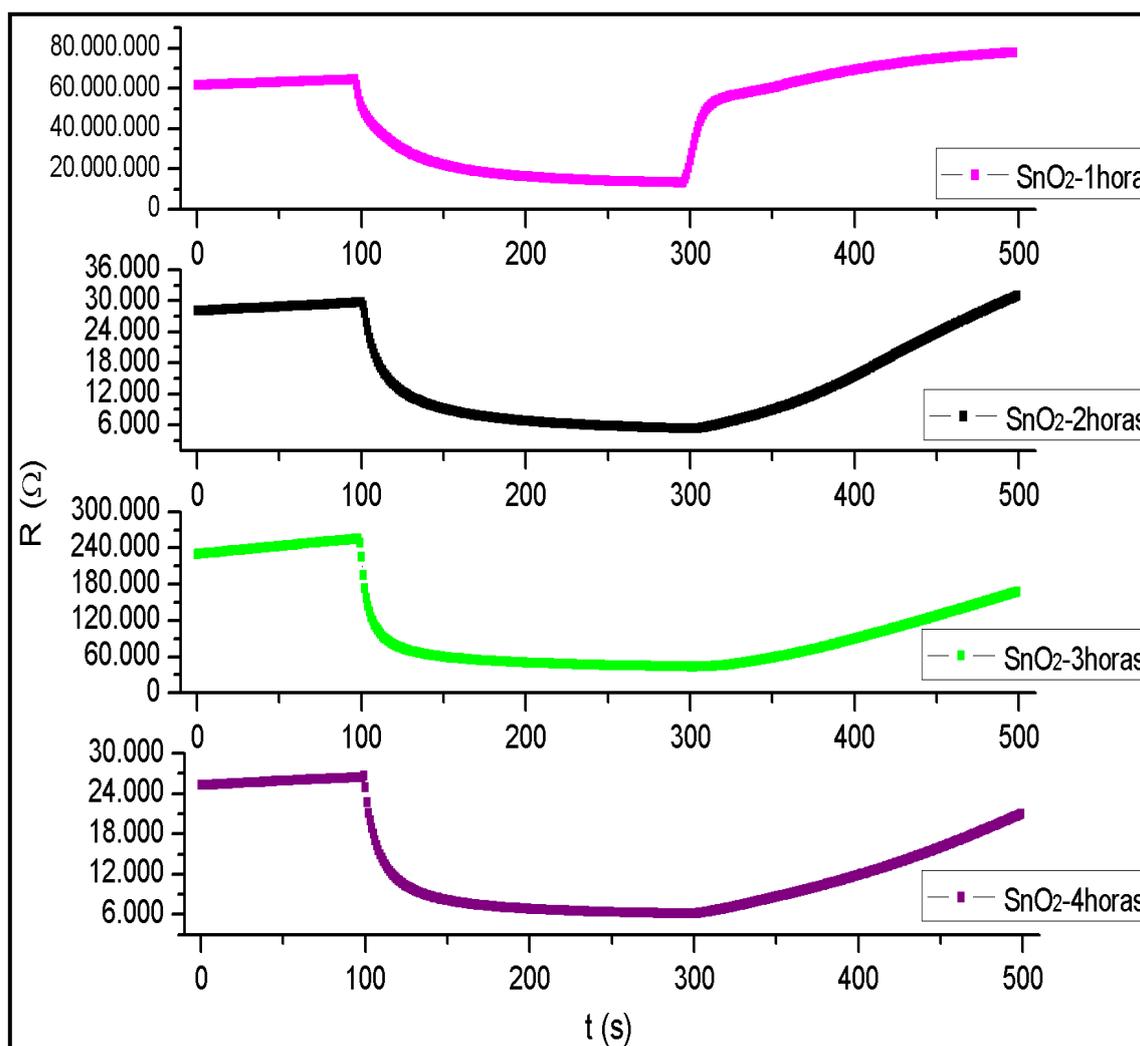


Figura 58: Resistência (R) pelo tempo (t) dos testes para sensores do gás metano à 200°C, de filmes finos de SnO₂, sem dopagem, depositados em 1 a 4 horas.

⁹ Encontram-se nas páginas 47, 48, 49 e 50 do trabalho.

O cálculo da sensibilidade (Tabela 11), parâmetro de desempenho de sensor de gás, dos testes de sensores para o gás metano dos filmes finos de SnO₂ intrínsecos permitiram uma melhor visualização do desempenho de cada filme intrínseco como sensor deste gás (Figura 59).

Tabela 11: Dados dos testes para sensores do gás metano de filmes de SnO₂ intrínsecos.

Amostra	Sensibilidade
SnO ₂ -1h	5
SnO ₂ -2h	5,9
SnO ₂ -3h	6,2
SnO ₂ -4h	4,6

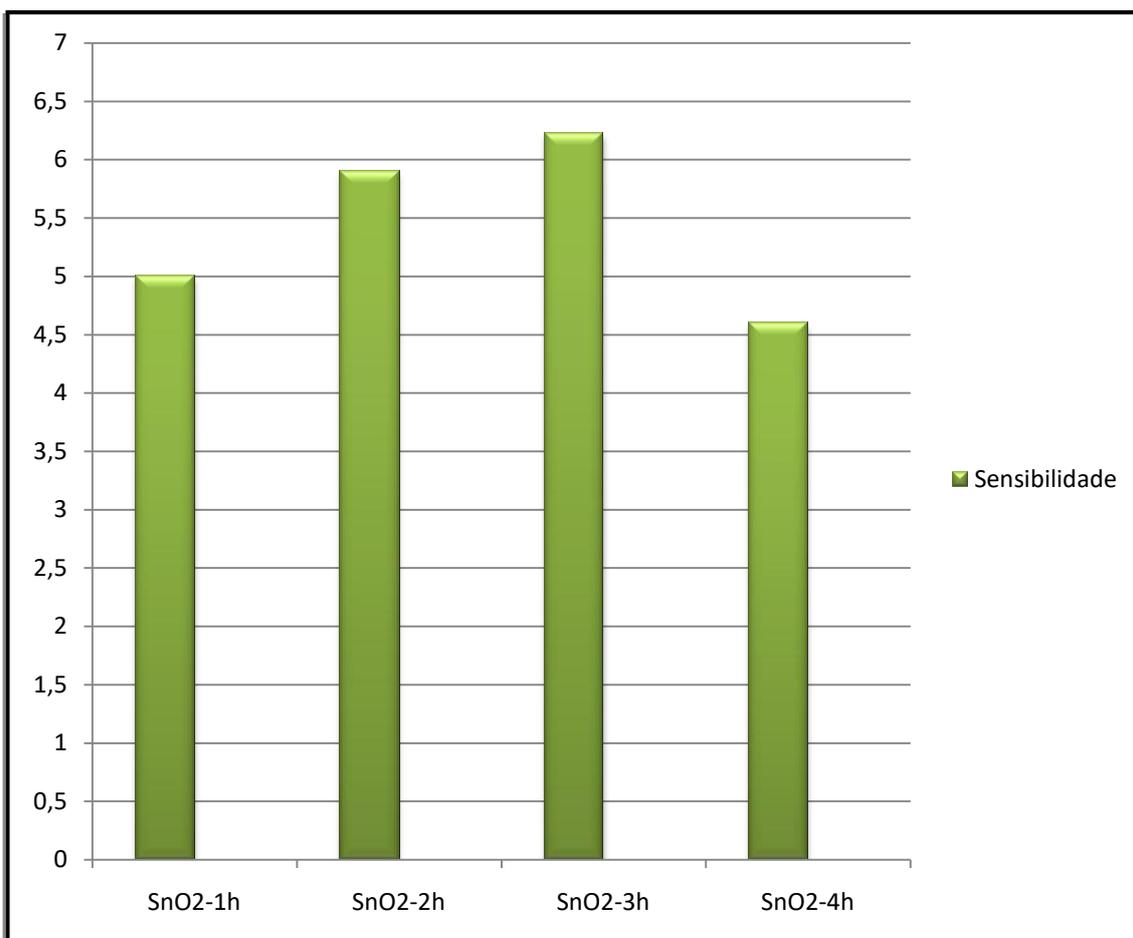


Figura 59: Dados de sensibilidade dos testes para sensores do gás metano de filmes finos de SnO₂ intrínsecos, depositados em 1 a 4 horas.

Embora os melhores resultados do parâmetro de sensibilidade para os sensores intrínsecos de SnO₂ tenham sido para o filme fino depositado em 3 horas, ligeiramente superior no parâmetro sensibilidade em relação ao filme depositado por 2 horas, o filme fino depositado em 2 horas foi escolhido para o trabalho por ter sido depositado pelo mesmo tempo que os filmes de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe, conforme explicado anteriormente.

É importante destacar também que tanto para o filme fino de SnO₂, intrínseco, depositado em 4 horas, quanto para o filme fino de SnO₂ dopado com 5% de Fe e depositado no mesmo tempo, os dados dos parâmetros de sensibilidade são notavelmente inferiores aos dados dos outros sensores.

Isto leva a refletir que, por alguma razão, na qual não foi possível identificar apenas com as técnicas e estudos adotados neste trabalho, a partir do tempo de deposição de 4 horas há uma piora considerável no desempenho do sensor de SnO₂. Esta piora diz respeito ao parâmetro de sensibilidade, que é um importante parâmetro de avaliação dos sensores de gás, pois define o valor mínimo de volume de concentração de um gás alvo que o sensor de gás consegue detectar (Bose *et al.* 2004; Liu *et al.* 2012), quando comparado com sensores feitos em tempos de deposições inferiores.

Como mencionado anteriormente, segundo ao exposto na literatura (Basu *et al.* 2008), isto pode ser devido às espessuras diferentes da camada repleta de elétrons do sensor, onde ocorre a quimiossorção, e, com isso, o ganho de elétrons, e do filme fino, uma vez que, conforme reportado, uma alta resposta do sensor de gás ocorre quando estas espessuras são próximas. Neste sentido, a partir do tempo de deposição de 4 horas, a espessura do filme fino pode estar sendo bem diferente da espessura da camada repleta de elétrons deste filme.

Outro fator importante a considerar, também explicitado no capítulo Revisão Teórica¹⁰, é a porosidade dos filmes finos, característica que influencia consideravelmente a resposta dos sensores de gás, em relação ao desempenho. Conforme reportado na literatura (Xu *et al.* 1990), camadas sensitivas compactas dos óxidos metálicos dificulta a entrada do gás no filme, confinando a reação das moléculas de gás nas camadas, apenas à superfície.

A porosidade nas camadas facilita o acesso do gás a um maior volume das camadas sensitivas do óxido semicondutor promovendo a reação do gás com os átomos do sólido semicondutor ao longo das camadas sensitivas (Xu *et al.* 1990). Dessa forma, outra possibilidade para explicar a piora no desempenho dos sensores de SnO₂

¹⁰ Encontra-se na página 47 do trabalho.

produzidos no tempo de deposição de 4 horas, é que pode estar ocorrendo uma maior compactação das camadas do filme fino a partir deste tempo de deposição.

Ainda há que se considerar que, em compostos metálicos, que contém elementos dopantes, pode ocorrer uma remoção não estequiométrica dos átomos da superfície do alvo, devido às diferenças nas energias de ligação entre os diferentes compostos, que favorece a remoção dos que estão mais fracamente ligados, até que se alcance uma situação de equilíbrio, após um determinado tempo de bombardeamento (Krug 2010; Mori 2011).

Entretanto, mais pesquisas precisam ser feitas, utilizando a metodologia deste trabalho, com sensores de gás de SnO_2 dopados com Fe e não dopados, depositados em tempos superiores a 4 horas, para o entendimento do papel da espessura do filme fino em relação ao bom desempenho deste filme como sensor de gás, uma vez que o tempo de deposição está diretamente relacionado à espessura do filme e, dessa forma, no desempenho deste tipo de sensor.

Os únicos sensores, dos que foram produzidos neste trabalho, que responderam aos testes de sensores de gás realizados em temperatura mais próxima à ambiente, entre 35°C e 60°C , foram os filmes de SnO_2 sem dopagem e depositados nos tempos de 2 a 4 horas (Figura 60). Destes testes, novamente, o sensor de SnO_2 depositado em 3 horas, foi o sensor que apresentou o melhor desempenho nos mesmos.

Materiais nanoestruturados possuem características peculiares, decorrentes do tamanho nanométrico, sendo a resistividade destes materiais um somatório das resistividades influenciadas por três importantes fatores que são a temperatura de detecção do gás, as impurezas presentes no sensor e os defeitos que podem ter sido gerados na fabricação dos sensores em escalas tão diminutas (Krug 2010; Mori 2011; Ohring 2002).

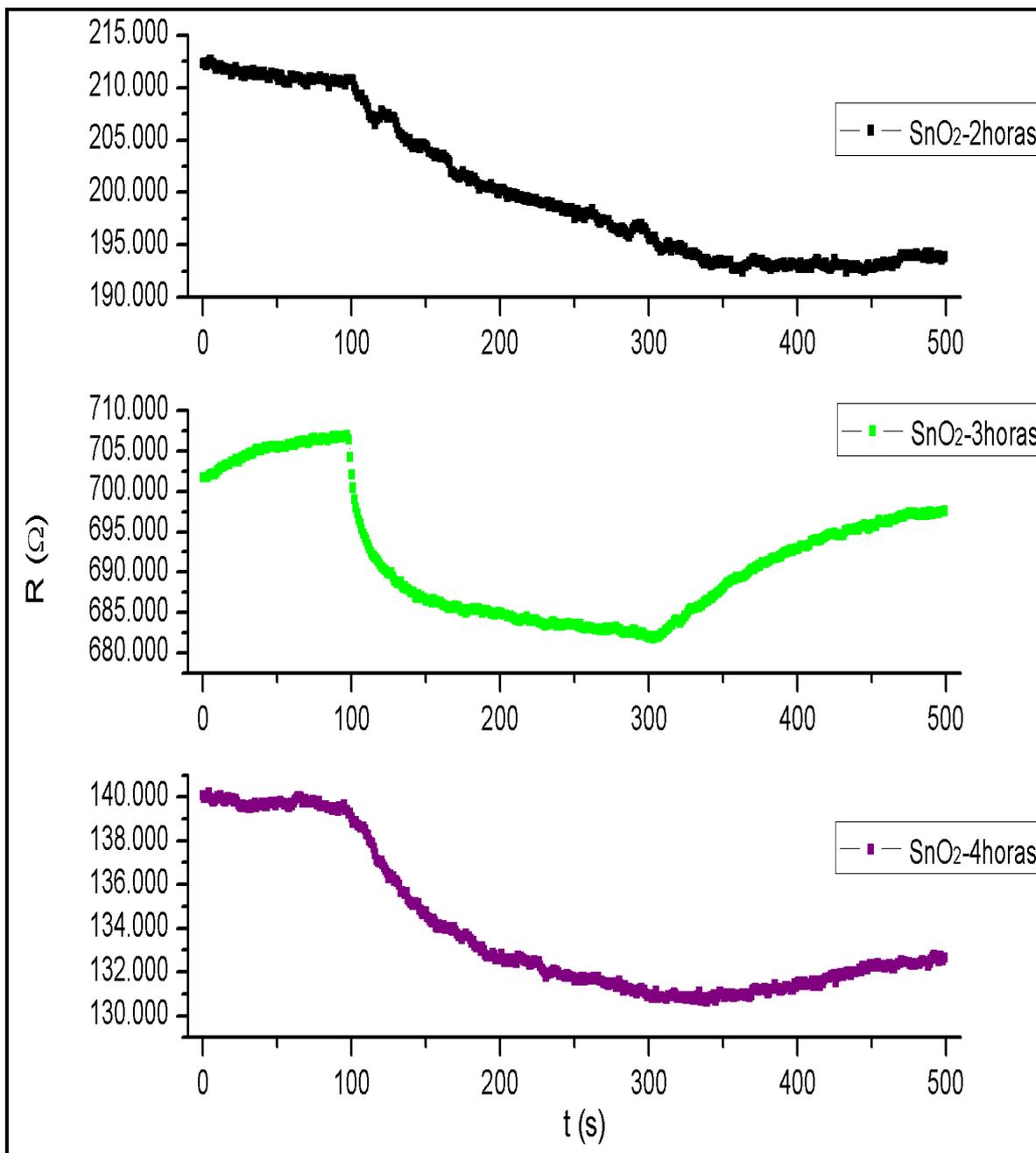


Figura 60: Resistência (R) pelo tempo (t) dos testes para sensores do gás metano de filmes finos de SnO₂, sem dopagem, depositados em 2, 3 e 4 horas, em temperaturas entre 35 a 60°C.

A Figura 61 mostra os testes de sensores para o gás metano dos filmes finos de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe, que são os filmes principais do trabalho, e depositados pelo tempo de 2 horas.

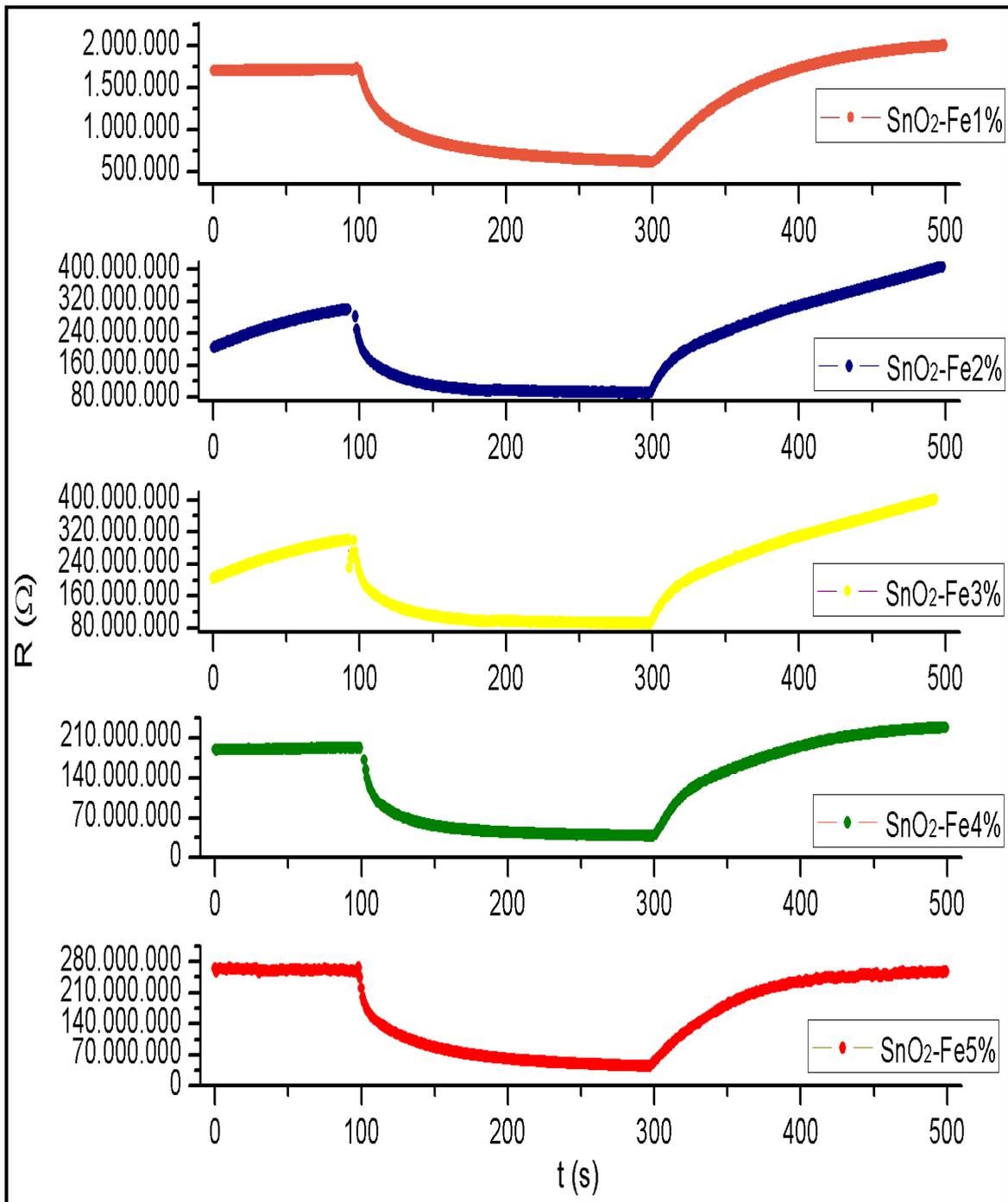


Figura 61: Resistência (R) em função do tempo (t), dos filmes finos de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe, nos testes de sensores para o gás metano à 200°C.

A Figura 62 mostra os testes de sensores para o gás metano do filme fino de SnO₂ intrínseco depositados pelo tempo de 2 horas.

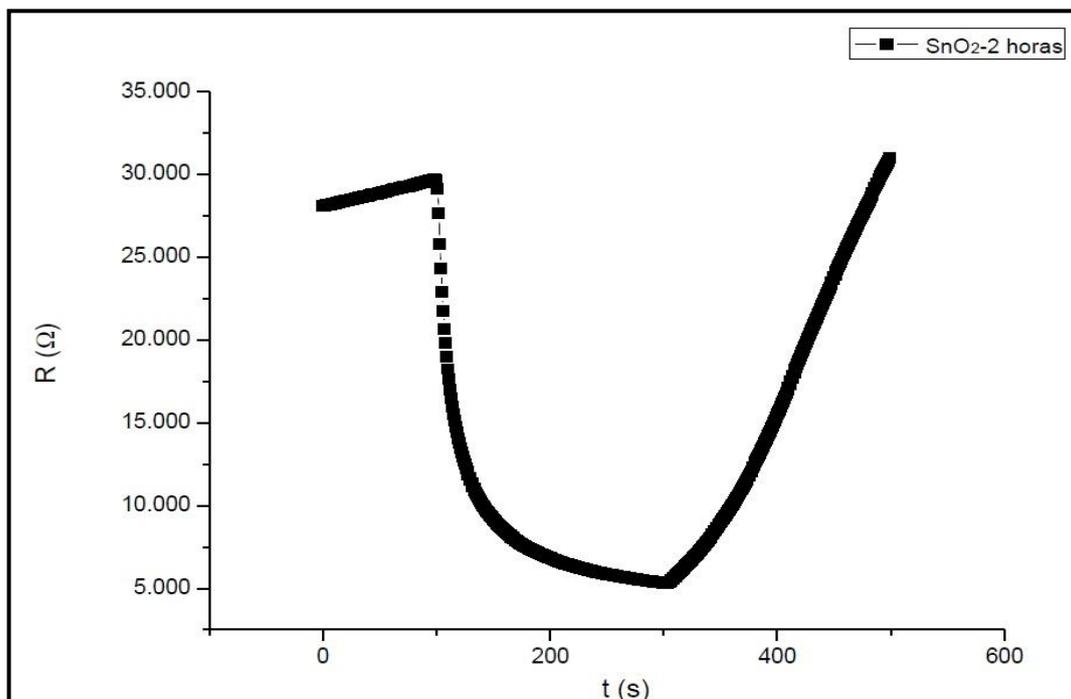


Figura 62: Resistência (R) em função do tempo (t), do filme fino de SnO₂ intrínsecos, no teste de sensor para o gás metano à 200°C.

Como explicitado no capítulo Metodologia¹¹ do trabalho, os testes para sensores de gás mediram a resistência de cada filme fino em função do tempo em três situações diferentes, no interior de uma câmara fechada de gás e a uma temperatura de 200°C. Primeiramente mediu-se a resistência do filme no vácuo, nos primeiros 100 segundos. Posteriormente e sem interrupções, foi feita a medição da resistência do filme na presença do gás metano até 300 segundos e, por fim, também sem interrupções, a resistência do filme foi medida na presença do ar atmosférico, até os 500 segundos.

Todos os filmes finos apresentam um comportamento típico de um semiconductor, onde, na presença do gás redutor, que é o gás metano, a sua resistência é diminuída, não linearmente ou não diretamente proporcional e, na presença do ar atmosférico, que é um gás oxidante, novamente aumentada, de forma não linear.

Inicialmente, com a entrada do gás metano, a resistência decai notavelmente, mas à medida que o gás metano vai saturando o interior da câmara fechada, já que ele está entrando a uma taxa constante de 10 cc/min para o seu interior, a resistência do filme fino continua decaindo, porém, em proporções cada vez menores. O mesmo é observado para a entrada do ar atmosférico para o interior da câmara, uma vez que há, a princípio, um maior aumento da resistência do filme fino na presença do ar, mas este aumento vai sendo cada vez menor conforme o ar atmosférico vai também saturando o interior da câmara fechada de gás, tendo assim um aumento não linear da resistência.

¹¹ Encontra-se nas páginas 77 e 78 do trabalho.

O mecanismo de operação de filmes finos de SnO₂ está fundamentado nas mudanças de condutividade elétrica do material semiconductor de SnO₂, quando o oxigênio, que passou por um processo de quimiossorção na superfície do semiconductor, reage com as moléculas do gás alvo, em elevadas temperaturas. Na presença de gases redutores, como o metano, a condutividade do sensor aumenta, mas na presença de gases oxidantes, esta condutividade diminui (Coles & Williams 1991; Huang & Wan 2009; Miller *et al.* 2006).

A adsorção de gás na superfície dos semicondutores óxidos metálicos, como o SnO₂, muda a condutividade elétrica dos óxidos. As mudanças na resistência do semiconductor de SnO₂ varia de acordo com a concentração do gás alvo, sendo que esta relação entre a resistência e a concentração do gás alvo é não linear (Matsuura & Takahata 1991; Miller *et al.* 2006). Este embasamento teórico encontra-se explicitado no capítulo Revisão Teórica deste trabalho¹².

Os parâmetros mais importantes na avaliação do desempenho de um sensor de gás são a sensibilidade, seletividade e o tempo de resposta do sensor, sendo a seletividade, a capacidade do sensor em responder à presença de um gás alvo contido em uma mistura gasosa (Bochenkov & Sergeev 2010).

Os filmes finos de SnO₂ e de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe deste trabalho apresentam uma boa seletividade, no que diz respeito ao gás metano, que é o gás alvo do trabalho, uma vez que os filmes responderam aos testes para sensores de gás metano, onde utilizou-se uma mistura gasosa contendo 4% de metano em sua composição, o que pode ser evidenciado pelo aumento da condutividade ou diminuição da resistividade do sensor na presença da mistura gasosa. Com relação à sensibilidade de cada sensor, as mesmas foram calculadas¹³ e listadas (Tabela 12).

Tabela 12: Dados da sensibilidade dos principais filmes finos.

Amostra	Sensibilidade
SnO ₂	5,9
SnO ₂ -Fe 1%	2,9
SnO ₂ -Fe 2%	3,5
SnO ₂ -Fe 3%	3,6
SnO ₂ -Fe 4%	5,4
SnO ₂ -Fe 5%	6,6

¹² Encontra-se nas páginas 44 e 45 do trabalho.

¹³ Embasamento teórico dos cálculos encontra-se na página 53 do trabalho.

O parâmetro sensibilidade dos sensores apresenta, nos sensores dopados com Fe, um aumento gradativo e proporcional ao aumento da concentração do Fe. O sensor sem dopagem apresenta maior sensibilidade que os sensores com dopagem até 4% de Fe. Em relação à 5% de dopagem de Fe, o sensor intrínseco já apresenta sensibilidade consideravelmente inferior. Logo, a dopagem a partir de 5% de Fe no semicondutor cristalino de SnO₂, depositado por 2 horas, influencia no desempenho deste semicondutor como nanosensor para o gás metano, melhorando consideravelmente o mesmo (Figura 63).

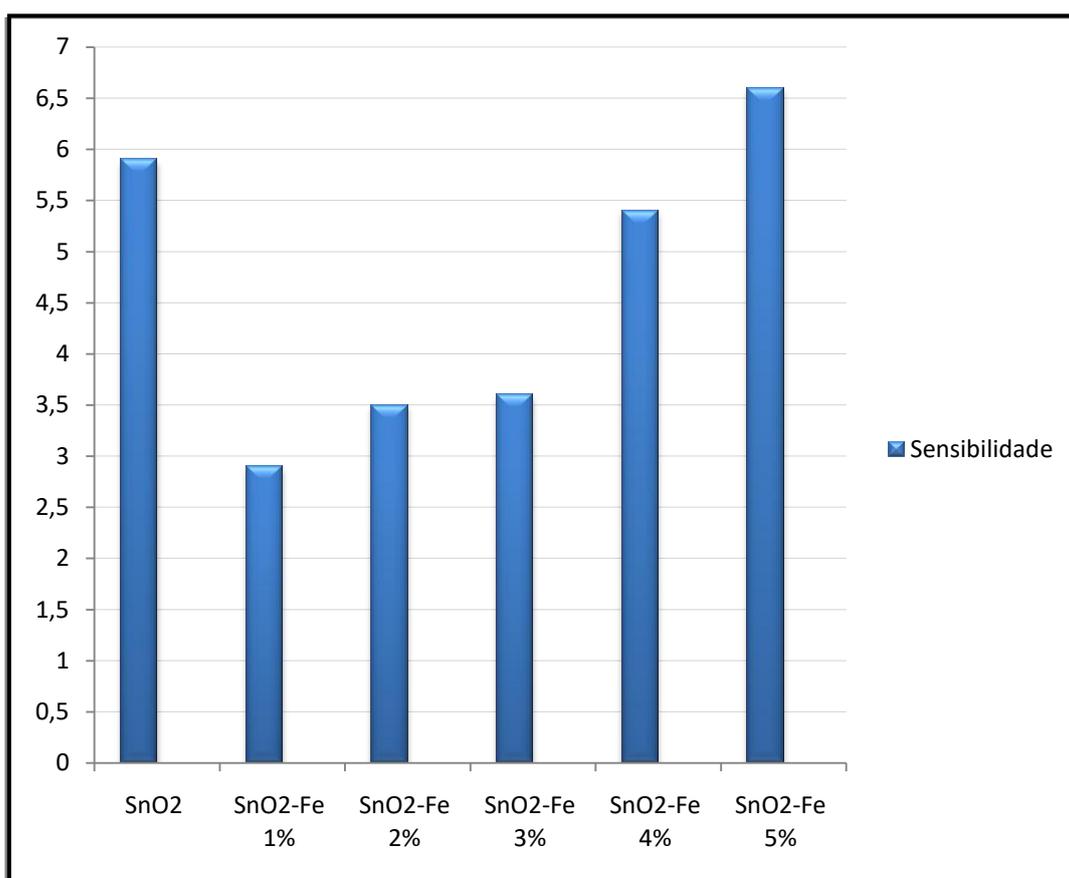


Figura 63: Sensibilidade dos sensores de SnO₂ e de SnO₂ dopados com Fe, na concentração de 1 a 5%, para testes com o gás metano à 200°C.

No capítulo Revisão Teórica do trabalho é reportada a forma pela qual a utilização de dopantes no sensor de SnO₂ melhora consideravelmente o seu desempenho como sensor de gás¹⁴.

¹⁴ Encontra-se nas páginas 50 e 51 do trabalho.

4.2 DISCUSSÃO

Os filmes finos de SnO₂ e de SnO₂ dopados em concentrações de 1 a 5% de Fe são sólidos cristalinos, semicondutores policristalinos, com uma banda gap de energia variando entre 3.61 eV e 3.85 eV e uma superfície de crescimento nanométrico em colunas, aparentemente homogênea. O filme fino de SnO₂ é um semicondutor puro ou intrínseco, por não conter átomos de outros elementos (impurezas) em sua estrutura cristalina, e os demais filmes finos de SnO₂, com concentrações de 1 a 5% de Fe são denominados semicondutores extrínsecos ou impuros, devido a presença do elemento ferro (dopante) na rede cristalina.

A dopagem de um semicondutor de SnO₂ com outro elemento químico objetiva a melhora considerável do seu desempenho como sensor de gás ao, principalmente, modificar as interações de adsorção e dessorção das moléculas de gás com a superfície do sensor, alterando significativamente a resistência elétrica do sensor e, com isso, a detecção de um gás alvo por este (Miller *et al.* 2006; Yamazoe *et al.* 1983). Entretanto, é importante considerar que, conforme reportado na literatura (Miller *et al.* 2006; Montmeat *et al.* 2003), os dopantes influenciam de diversas formas o desempenho do sensor, levando a mudanças no comprimento de Debye dos elétrons, na morfologia das partículas do sensor, nas propriedades de interação gás-superfície do sensor, entre outras, o que torna ainda um desafio o completo entendimento do papel do dopante no semicondutor de SnO₂.

Os testes de sensores para o gás metano, realizados no trabalho, confirmaram a mudança na resistência dos filmes finos na presença do gás metano e na presença do ar atmosférico. Os parâmetros de sensibilidade dos testes de sensores identificaram o filme fino de SnO₂ com dopagem de 5% de Fe, que é maior concentração de dopante utilizada no trabalho, como o de melhor desempenho para sensor do gás metano, o que confirma, conforme encontrado na literatura, que a dopagem melhora significativamente o desempenho dos sensores de gás.

Para o filme fino de SnO₂ dopado com 4% de Fe, os dados de sensibilidade também foram satisfatórios, próximos aos encontrados para o semicondutor puro ou intrínseco, entretanto, a sensibilidade deste filme encontrada foi um pouco menor que a do filme intrínseco. Os demais filmes finos, com 1 a 3% de concentração de ferro, apresentam valores de sensibilidade inferiores ao valor do filme intrínseco, o que leva a concluir que, para a dopagem de SnO₂ com o elemento ferro em concentrações menores que 4% não melhoram o desempenho do semicondutor como sensor para o gás metano.

As medições magnéticas realizadas no trabalho com os filmes finos dopados com ferro mostram a coexistência de dois comportamentos magnéticos diferentes que se manifestam em regiões diferentes de campo, um em regiões de alto campo magnético e outro em regiões de baixo campo magnético, que são o paramagnético e o ferromagnético, respectivamente.

Entretanto, a evidência de cada um dos dois comportamentos magnéticos citados foi diferente de um filme para o outro, sendo que o comportamento paramagnético é mais evidente no filme com menor dopagem, de 1% de Fe, e o comportamento ferromagnético, no de maior dopagem, de 5%. Logo, tem-se uma maior presença do elemento ferro no filme fino dopado em concentração de 5% do mesmo.

O SnO₂ possui uma estrutura cristalina tetragonal tipo rutilo (Figura 64), com parâmetros de rede $a=b= 4.737$ angstroms (Å) e $c= 3.185$ Å, raios iônicos do O²⁻ de 1.40 Å e do Sn⁺⁴ de 0.71 Å, sendo a sua célula unitária constituída por quatro átomos de oxigênio e dois átomos de estanho, onde cada átomo de oxigênio encontra-se rodeado por três átomos de estanho, dispostos de forma a quase representarem os vértices de um triângulo equilátero (Aragón 2010).

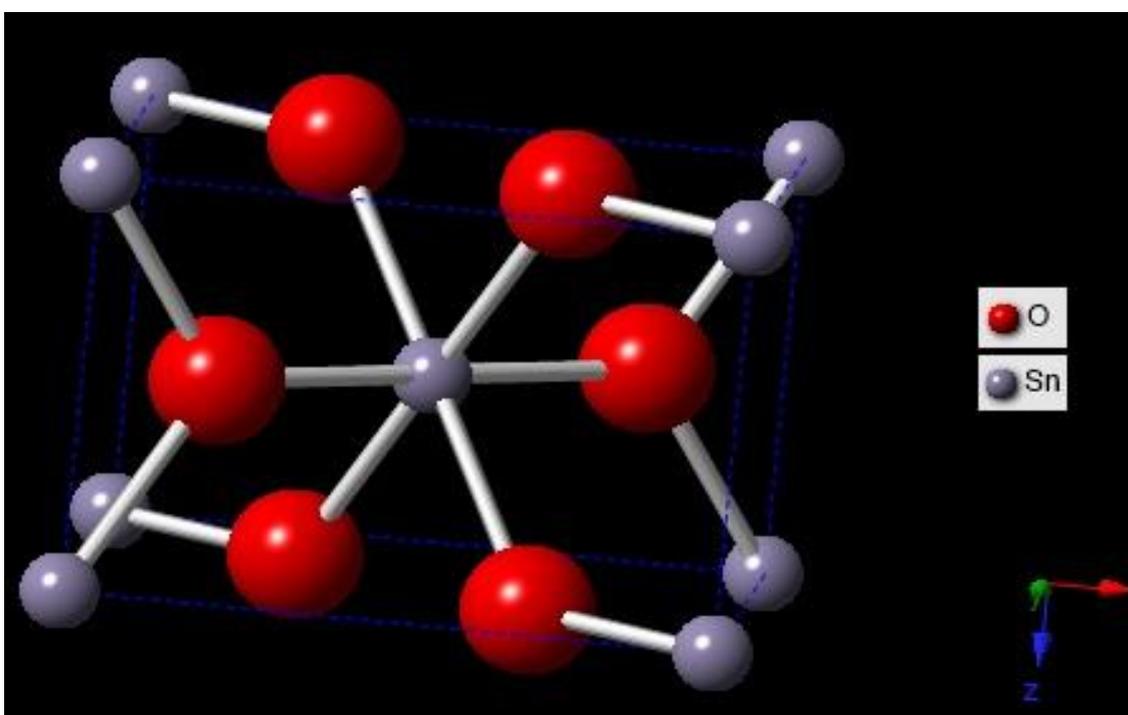


Figura 64: Estrutura cristalina do semiconductor de SnO₂, mostrando os átomos de estanho (Sn) ligados ao átomos de oxigênio (O), formando a estrutura cristalina tetragonal.

As impurezas, na estrutura cristalina de um semiconductor, podem ser de dois tipos, sendo denominada impureza substitucional, quando o dopante entra na estrutura

cristalina substituindo posições que o estanho (Sn) ocupa na rede, e impureza intersticial, quando o dopante se fixa em sítios disponíveis entre os átomos da rede cristalina (Nussbaum 1971). Todos os resultados encontrados neste trabalho, nas técnicas de caracterizações e nos testes de sensores, podem ser explicados por três diferentes hipóteses.

A primeira delas diz respeito à entrada do dopante ferro como uma impureza substitucional, na qual o ferro entra na estrutura cristalina do SnO₂ substituindo algumas posições, anteriormente ocupadas pelo elemento estanho (Figura 65).

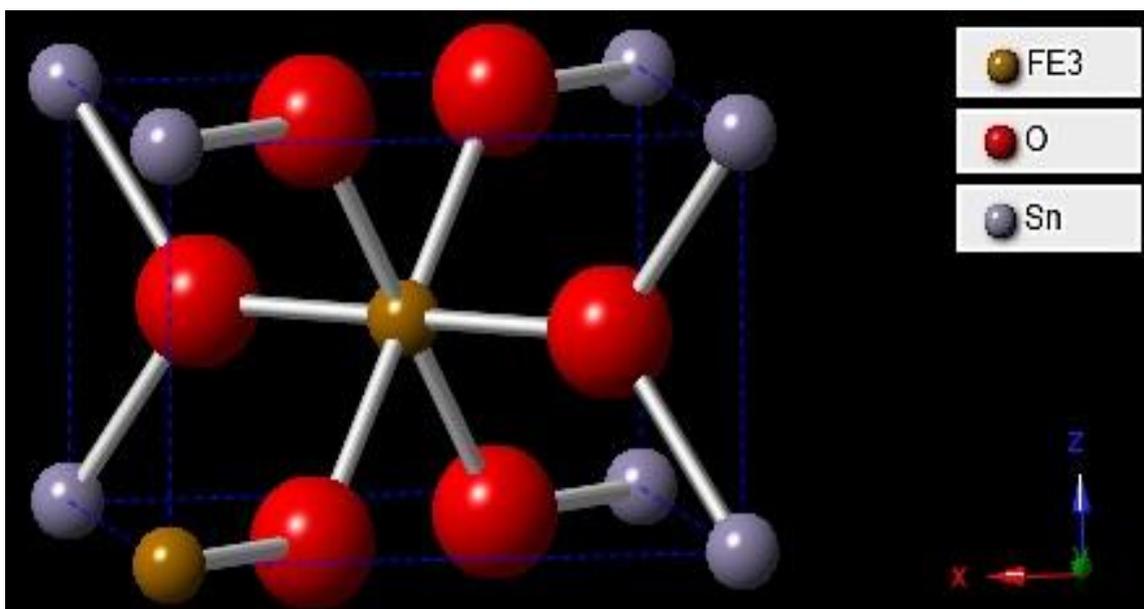


Figura 65: Estrutura cristalina tetragonal do semicondutor de SnO₂, mostrando alguns átomos de estanho (Sn) sendo substituídos por átomos de ferro (Fe³⁺).

A segunda hipótese está relacionada à entrada do dopante ferro na estrutura cristalina como uma impureza intersticial, onde este elemento está ocupando interstícios desta rede cristalina, ou seja, ocupando espaços entre os átomos de estanho/ferro do semicondutor de SnO₂ (Figura 66).

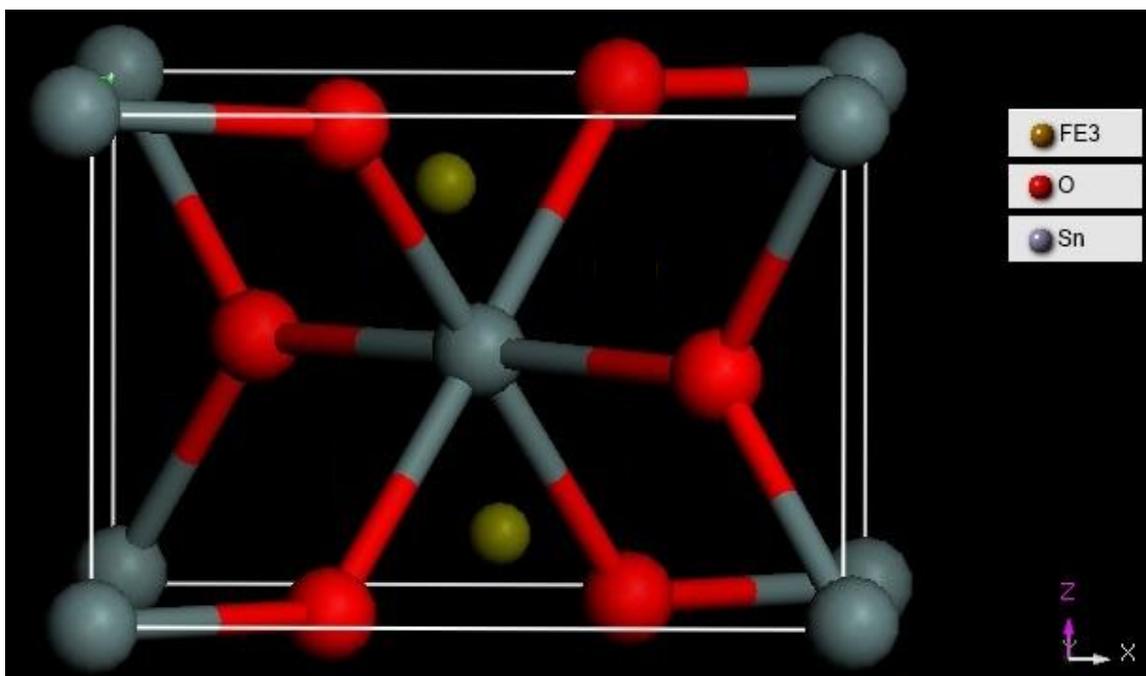


Figura 66: Estrutura cristalina tetragonal do semiconductor de SnO₂, mostrando os átomos de estanho (Sn) ligados ao átomos de oxigênio (O), com átomos de ferro (Fe³⁺) intersticiais no interior da estrutura cristalina.

Como não foi possível detectar, pela técnica de difração de Raios-X, a presença de outras fases que não a fase tetragonal de SnO₂, para as amostras com dopagem de ferro em concentrações variando de 1 a 5%, uma terceira hipótese foi formulada considerando que a concentração do elemento ferro, ou parte desta concentração, estaria formando aglomerados de Fe.

Dessa forma, para explicar os resultados encontrados, existem as três possibilidades, em relação à presença do ferro na estrutura cristalina do semiconductor de SnO₂, já que o mesmo foi identificado pelas medições magnéticas e pelos testes de sensores para o gás metano. Entretanto, outras técnicas de caracterizações mais precisas, como a técnica de Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por Raios-X (XPS), são necessárias para definir exatamente o papel do ferro como dopante na estrutura cristalina do SnO₂, se como um dopante substitucional, intersticial ou, por fim, formando aglomerados de Fe metálico ou algum óxido de Fe cuja porcentagem seria muito baixa.

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 CONCLUSÕES

As caracterizações estruturais dos filmes finos de dióxido de estanho, intrínseco e com dopagem estequiométrica de 3% de ferro, mostraram a formação de uma única fase, correspondente à estrutura cristalina do dióxido de estanho. As caracterizações morfológicas mostraram a presença dos filmes finos de dióxido de estanho, intrínseco e com dopagem estequiométrica de 5% de ferro, nos substratos de vidro, com suas superfícies crescidas em colunas sobre estes substratos.

Os valores encontrados para o *gap* de energia dos filmes finos, por meio de caracterizações óticas, aproximam-se dos valores encontrados na literatura para o sólido cristalino de dióxido de estanho. Observou-se uma tendência à diminuição da energia do *gap* conforme a concentração de ferro nos filmes finos aumentava.

Medições magnéticas permitiram observar a coexistência dos comportamentos paramagnéticos e ferromagnéticos dos filmes, sendo o primeiro mais intenso no filme com menor dopagem de ferro e, o segundo, mais intenso no filme com maior dopagem.

A avaliação do desempenho dos sensores para o gás metano foi embasada nos parâmetros sensibilidade e tempo de resposta. A partir dos testes de sensor de gás realizados com os filmes finos foi possível observar que a dopagem melhorou notavelmente o desempenho dos sensores a partir da concentração estequiométrica de cinco por cento de ferro.

Apesar de não ser descartada a possível formação de uma segunda fase pelas caracterizações estruturais, as caracterizações magnéticas e óticas evidenciaram a presença do elemento ferro na estrutura cristalina dos filmes finos de dióxido de estanho, que entrou substituindo átomos de Sn ou em sítios intersticiais na estrutura cristalina. A presença de Fe na estrutura cristalina tipo rutilo explica as diferenças nos resultados encontrados para os testes de sensores de cada filme fino.

O comportamento ferromagnético mais intenso no filme com maior concentração de ferro e o melhor desempenho como sensor, deste filme, evidenciam que a dopagem com ferro a partir desta concentração tem papel fundamental na melhoria do desempenho do sensor de gás.

Os estudos realizados neste trabalho buscaram, de uma maneira geral, compreender a forma como a dopagem com ferro pode influenciar o desempenho dos sensores de dióxido de estanho na detecção do gás metano.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com relação à dopagem com o elemento ferro, é interessante e também importante que a fabricação de novos sensores semicondutores de dióxido de estanho, pela mesma metodologia adotada neste trabalho, seja realizada, mas com dopagem superior a cinco por cento de ferro, uma vez que ficou constatado que esta concentração mostrou melhorias no desempenho do sensor nos testes de gás realizados.

A adoção de novas metodologias de fabricação de sensores à base de dióxido de estanho, dopagens em diferentes concentrações e com outros elementos químicos para serem testados como sensores de gás, devem também ser considerados visando melhorar a performance dos materiais usados como sensores de gás.

Um estudo mais aprofundado sobre as características dos grãos e o tamanho dos cristalitos dos sensores, também pela adoção de métodos de caracterizações mais precisos que os utilizados no trabalho, conforme proposto na literatura para explicar os mecanismos de condutância dos sensores de gás, é importante para um completo entendimento da resistência dos sensores, se alta ou baixa, e com isso a sensibilidade e, conseqüentemente, o desempenho de cada filme fino como sensor de gás.

O estudo realizado nesta dissertação de mestrado abre espaço, assim, para a busca, dentro do importante e vasto campo da nanotecnologia, pela fabricação de melhores sensores de gás, frente aos sensores tradicionais disponíveis no mercado. Esta melhoria é justificada pelo fato dos sensores serem mais baratos de produzir e mais eficientes, de menores dimensões, com alto grau de confiança e operabilidade.

O intuito da fabricação de melhores sensores de gás é a detecção precisa e confiável de gases como o metano, que é o principal constituinte do gás natural. Por esta razão, a fabricação dos sensores deste trabalho tem um grande impacto na indústria petrolífera, que é uma das principais indústrias do país e do setor energético. Além disso, o gás metano é um dos principais gases que contribuem com a poluição ambiental, pauta de importantes discussões sobre alterações climáticas mundiais.

E para tanto se faz necessário dar continuidade ao estudo iniciado neste mestrado, por outros alunos, professores e/ou pesquisadores que disponham de interesse

e novas ferramentas para tornar este trabalho cada vez mais completo, atingindo assim o objetivo principal que é melhorar o desempenho do sensor à base de dióxido de estanho para a detecção do gás metano.

Aquino, J. C. R. **Estudo da estabilidade das propriedades estruturais, vibracionais e hiperfinas de nanopartículas de SnO₂ dopadas com Cr após tratamento térmico.** 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília.

Aragón, F. F. H. **Estudo das propriedades estruturais e magnéticas de nanopartículas de SnO₂ dopadas com Ni, Co e Cr.** 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília.

Aragón, F. F. H., Aquino, J. C. R., Gomes, N. C. S., Ardisson, J. D., Silva, S. W., Pacheco-Salazar, D. G., Coaquira, J. A. H. **Characterization of polycrystalline SnO₂ films deposited by DC sputtering technique with potential for technological applications.** Journal of the European Ceramic Society, v. 10, p. 12-17, abr. 2017.

Araújo, A. E. P. **Propriedades magnéticas de manganitas, fitas amorfas e filmes finos com anisotropia unidirecional.** 2002. 145 f. Tese (Doutorado em Física) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Baker, J. A. **Energy and nanotechnology: strategy for the future.** Baker Institute Study, n. 30, 19 f., abr. 2005.

Bakrania, S. D.; Wooldridge, M. S. **The effects of two thick film deposition methods on tin dioxide gas sensor performance.** Sensors Actuators B, v. 9, p. 6853-6868, aug. 2009.

Basu, S.; Basu, P. K. **Nanocrystalline metal oxides for methane sensors: role of noble metals.** Journal of Sensors, v. 2009, 20 f, jul. 2009.

Basu, P. K., Bhattacharyya, P., Saha, N., Basu, S. **Methane sensing properties of platinum catalysed nano porous zinc oxide thin films derived by electrochemical anodization.** Sensors Letters, v. 6, n. 1, p. 219-225, 2008.

Bezerra, B. A. F. **Detecção de vazamentos em tubulações de gás pelo método de transitório de pressão utilizando CLP e sensores.** 2008. 77 f. Especialização (Especialização em Engenharia de Instrumentação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco.

Bochenkov, V. E.; Sergeev, G. B. Sensitivity, selectivity, and stability of gas-sensitive metal-oxide nanostructures. In: Umar, A.; Hahn, Y-B. (Org.) **Metal oxide nanostructures and their applications**, v. 3, p. 31-52, 2010. Rússia.

Bose, S., Chakraborty, S., Ghosh, B. K., Das, D., Sem, A., Maiti, H. S. **Methane sensitivity of Fe-doped SnO₂ thick films.** Sensors and Actuators B, v. 105, p. 346-350, aug. 2004.

Cadieu, F. J.; Chencinski, N. **Selective thermalization in sputtering to produce high T_c films.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 11, n. 2, p. 227-230, mar. 1975.

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello - CENPES. **Geoquímica do Petróleo**. Divisão de Exploração, Setor de Geoquímica. Rio de Janeiro, set. 1984.

Clennell, M. B. **Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira**. Brazilian Journal of Geophysics, v. 18, n. 3, p. 397-410, set. 2001.

Cofala, J., Amann, M., Klimont, Z., Kupiainen, K., Höglund-Isaksson, L. **Scenarios of global anthropogenic emissions of air pollutants and methane until 2030**. Atmospheric Environment, v. 41, n. 38, p. 8486-8499, jul. 2007.

Cohen, S. H.; Lightbody, M. L. (Org.). **Atomic force microscopy/scanning tunneling microscopy 3**. 3. ed. Estados Unidos: Ed. Kluwer Academic Publishers, 2002, 219 f.

Coles, G. S. V.; Williams, G. **Selectivity studies on tin oxide-based semiconductor gas sensors**. Sensors and Actuators B, v. 3. p. 7-14, aug. 1991.

Comini, E. **Metal oxide nano-crystals for gas sensing**. Analytica Chimica Acta, v. 568, p. 28-40, dez. 2005.

Crystalmaker[®]. **CrystalMaker**, versão 2.2.4. CrystalMaker Software Ltd. CrystalMaker para Windows, 2010.

Dartora, C. A. **Magnetismo e Spintrônica**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná. Paraná, 145 f., 2010. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE824/Magnetismo_Spintronica.pdf>. Acesso em: 05 out. 2016. Notas de aula.

Einsele, G. **Sedimentary basins: evolution, facies and sediment budget**. 2. ed. Estados Unidos: Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1965, p. 707-723.

El-Diasty, A. I., Ragab, A. M. S. **Applications of nanotechnology in the oil & gas industry: latest trends worldwide & future challenges in Egypt**. Society of Petroleum Engineers, Cairo, 13 f., abr. 2013.

Faust, B. Ultraviolet/visible spectroscopy. In: **Modern Chemical Techniques: an essential reference for students and teachers**. 1. ed. Estados Unidos: Ed. Royal Society of Chemistry, 1997, 192 f.

Fernandes, A. S.; Marques Junior, W. **Propagação de ondas longitudinais eletrostáticas em plasmas**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 23, n. 2, p. 200-210, jun. 2001.

Filho, J. A. **Preparação e caracterização do composto intermetálico GdNiIn e as modificações introduzidas após a absorção de hidrogênio**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília.

Gallas, M. R. **Estado Sólido: propriedades elétricas dos metais e semicondutores**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 9 f., 2002. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/ES_aula2.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2016. Notas de aula.

Göpel, W.; Schierbaum, K. D. **SnO₂ sensors: current status and future prospects.** Sensors and Actuators B, v. 26-27, p. 1-12, 1995.

Gsas[®] & ExpGui[®]. **General Structure Analysis System.** Larson, A. C.; Von Dreele, R. B., Laboratório Nacional de Los Alamos (LAUR 86-748), Universidade da Califórnia, Estados Unidos, 2004.

Guelfi, L. R.; Scheer, A. P. **Estudo de adsorção para purificação e separação de misturas na indústria petrolífera.** Engenharia Química, Universidade Federal do Pará. Curitiba, fev. 2007. 44 f.

Guimarães, L. J. M. **Física do estado sólido.** 1. ed. Lisboa: Serviços Gráficos Universidade de Lisboa, 1977. p. 57-197.

Hoffman, W.; Thornton, J. A. **Compressive stress and inert gas in Mo films sputtered from a cylindrical-post magnetron with Ne, Ar, Kr and Xe.** Journal of Vacuum Science and Technology, v. 17, n. 1, p. 380, jun. 1998.

Huang, J.; Wan, Q. **Gas sensors based on semiconducting metal oxide one-dimensional nanostructures.** Sensors Actuators B, v. 9, p. 9903-9924, dez. 2009.

Ibarra, J. E. R. **Síntese e caracterização das propriedades vibracionais, estruturais e magnéticas de nanopartículas de ZnO dopadas com metais de transição.** 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília.

Kong, X.; Ohadi, M. **Applications of micro and nano Technologies in the oil and gas industry – overview of the recent progress.** Society of Petroleum Engineers, Conferência Internacional de Petróleo, 11 f., 1-4 nov. 2010.

Krishnamoorti, R. **Extracting the benefits of nanotechnology for the oil and industry.** Journal of Petroleum Technology, v. 58, n. 11, 2 f., nov. 2006.

Krug, C. **Deposição de filmes finos por pulverização catódica.** Engenharia de Superfícies, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2010. 163 f. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~ckrug/pvd/slides.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016. Notas de aula.

Kumar, M., Kumar, A., Abhyankar, A. C. **SnO₂ based sensors with improved sensitivity and response-recovery time.** Ceramics International, v. 40, p. 8411-8418, jan. 2014.

LabView[®]. **LabView.** National Instruments, 2012.

Leite, R. C. C.; Castro, A. R. B. **Física do estado sólido.** 1. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1978, p. 72-177.

Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., Ning, H. **A survey on gas sensing technology.** Sensors and Actuators B, v. 12, p. 9635-9665, jul. 2012.

Machuno, L. G. B., Lima, A. B., Buso, R. R., Abdanur, M. F., Rangel, E. C., Gelamo, R. V. **Desenvolvimento e avaliação de uma fonte DC de alta tensão para utilização em sistema de deposição de filmes finos por pulverização catódica.** Revista Matéria, v. 21, n. 2, p. 492-500, 2016.

Mahendranath, A., Varkey, S., Mazumder, S. **Applications of nanotechnology in petroleum industry.** International Journal of Recent Scientific Research, v. 6, n. 9, p. 6152-6157, set. 2015.

Maliska, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, 98 f., 2003. Disponível em: <http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 05 out. 2016. Notas de aula.

Materials Studio[®]. **Materials Studio**, versão 6.1. Biovia. Licenciado para Windows, 2000.

Matsuura, Y.; Takahata, K. **Stabilization of SnO₂ sintered gas sensors.** Sensors and Actuators B, v. 5, p. 205-209, abr. 1991.

Matteo, C., Candido, P., Vera, R., Francesca, V. **Current and future nanotech applications in the oil industry.** American Journal of Applied Sciences, v. 9, n. 6, p. 784-793, 2012.

Mello, H. A.; Biasi, R. S. **Introdução à física dos semicondutores.** 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1975. p. 26-82.

Miller, T. A., Bakrania, S. D., Perez, C., Wooldridge, M. S. Nanostructured tin dioxide materials for gas sensor applications. In: Geckeler, K. E.; Rosenberg, E. **Functional nanomaterials**, p. 1-24, 2006. Estados Unidos.

Montmeat, P., Marchand, J-C., Lalauze, R., Viricelle, J-P., Tournier, G., Pijolat, C. **Physico-chemical contribution of gold metallic particles to the action of oxygen on tin dioxide sensors.** Sensors and Actuators B, v. 95, n.1-3, p.83-89, out. 2003.

Mora, N. D., Lucas, J. F. R., Maran, M. A. (Org.). Materiais semicondutores. In: **Apostila de materiais elétricos**, p. 397-443, 2010. Laboratório de Materiais, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap15.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2016.

Mori, T. J. A. **Crescimento de filmes finos de Ni₈₁Fe₁₉ para aplicações envolvendo magnetorresistência anisotrópica.** 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul.

Morrison, R. T.; Boyd, R. N. **Química Orgânica.** 9. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1990, p. 7-95.

Muksunov, T. R., Maksimova, N. K., Sevast'yanov, E. Yu., Shipilov, S. É., Yakubov, V. P. **Increase in the sensitivity and selectivity of semiconductor gas sensors.** Russian Physics Journal, v. 57, n. 9, p. 123-128, jan. 2015.

Murvey, P.-S.; Silea, I. **A survey on gas leak detection and localization techniques.** Journal of Loss Prevention in the Processes Industries, v. 25, n. 6, p. 966-973, nov. 2012.

Nabhani, N., Emami, M., Moghadam, A. B. T. **Application of nanotechnology and nanomaterials in oil and gas industry.** API Conference Proceedings, v. 1415, n. 1, 128 f., dez. 2011.

Nussbaum, A. **Comportamento eletrônico e magnético dos materiais.** 1. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1971, p. 24-123.

Ohring, M. **Materials science of thin films.** 2. ed. Estados Unidos: Ed. Academic Press, 2002, 794 f.

OriginLab®. **OriginPro 8 SR0**, versão 8.7024 (B724). OriginLab Corporation, Licenciado para Windows, 2007.

Pandey, R. K., Krishna, S., Rana, J., Hazarika, N. K. **Emerging applications of nanotechnology in oil and gas industry.** International Journal for Technological Research in Engineering, v. 3, n. 11, jun. 2016.

Park, C. O.; Akbar, S. A. **Ceramics for chemical sensing.** Journal of Materials Science, v. 38, n. 23, p. 4611-4637, dez. 2003.

Pourafshary, P., Azimpour, S. S., Motamedi, P., Samet, M., Taheri, S. A., Bargozin, H., Hendi, S. S. **Priority assessment of investment in development of nanotechnology in upstream petroleum industry.** Society of Petroleum Engineers, SPE Simpósio Técnico da Arábia Saudita, 9-11 mai. 2009.

Rothschild, A.; Komem, Y. **The effect of grain size on the sensitivity of nanocrystalline metal-oxide gas sensors.** Journal of Applied Physics, v. 95, n. 11, p. 6374-6380, 2004.

Ruthven, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes.** 1. ed. Canadá: Ed. United States Copyright, 1984, 453 f.

Sakai, G., Matsunaga, N., Shimano, K., Yamazoe, N. **Theory of gas-diffusion controlled sensitivity for thin film semiconductor gas sensor.** Sensors and Actuators B, v. 80, n. 2, p. 125-131, nov. 2001.

Salgado, V. G. **Proposta de indicadores de ecoeficiência para o transporte de gás natural.** 2004. 248 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Salvador, M. A. **Análise de superfície de filmes finos poliméricos utilizando técnicas de processamento de imagens.** 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Sánchez-Zeferino, R. S., Pal, U., Barboza-Flores, M., Santiago, P., Rendón, L., Garibay-Febles, V. **Hydrothermally grown ultra-fine SnO₂ and SnO₂**: Ag nanoparticles and their optical characteristics. *Science of Advanced Materials*, v. 4 n. 5-6, p. 591-596, mai. 2012.

Santos Neto, E. V. **Geoquímica de gases**: uma nova tecnologia em avaliação de sistemas petrolíferos. *Geociências Petrobrás*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 357-383, mai./nov. 2014.

Sberveglieri, G. **Classical and novel techniques for the preparation of SnO₂ thin-film gas sensors**. *Sensors and Actuators B*, v. 6, n. 1-3, p. 239-247, 1992.

Speakman, S. A. **Basics of X-Ray powder diffraction**. Massachusetts Institute of Technology. Estados Unidos, 97f., 2011. Disponível em: <<http://www.prism.mit.edu/xray>>. Acesso em: 03 fev. 2016.

Suguio, K. **Rochas sedimentares**. 1. ed. Estados Unidos: Ed. Edgard Blucher, 2003, 400 f.

Sunjay, R. **Nano-science & technology in upstream**. 8° Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, India, 7 f., 2010.

Tauc, J. **Amorphous and Liquid Semiconductors**. 1. ed. Londres: Ed. Plenum Press, 1974, p. 159-220.

Teles, L. K. **Física**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, 2008. 257 f. Disponível em: <http://www.fis.ita.br/fis32/notas/fis32-notas_aula.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015. Notas de aula.

Wilson, D. M., Hoyt, S., Janata, J., Booksh, K., Obando, L. **Chemical sensors for portable, handheld field instruments**. *Sensors Journal*, v. 1, n. 4, p. 256-274, dez. 2001.

Xingqin, L., Chunhua, C., Wendong, X., Yusheng, S., Guangyao, M. **Study on SnO₂-Fe₂O₃ gas-sensing system by a.c. impedance**. *Sensors and Actuators B*, v. 17, n. 1, p. 1-5, jan. 1993.

Xu, C., Tamaki, J., Miura, N., Yamazoe, N. **Relationship between gas sensitivity and microstructure of porous stannic oxide**. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 58, n. 12, 1990.

Yamazoe, N., Kurokawa, Y., Seiyama, T. **Effects of additives on semiconductor gas sensors**. *Sensors and Actuators*, v. 4, p. 283-289, mai./jun.1983.

Yamazoe, N. **New approaches for improving semiconductor gas sensors**. *Sensors Actuators B*, v. 5, p. 7-19, 1991.

Young, R. A. **The Rietveld Method**: International Union of Crystallography Monographs on Crystallography. 1. ed. Estados Unidos: Ed. Oxford University Press. 312 f., 1995.

Yu, P. Y.; Cardona, M. **Fundamentals of semiconductors:** physics and materials properties. 3. ed. Estados Unidos: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, p. 470-551, 2003.

Apêndice A

A.1 Considerações gerais

Trata-se de um método de refinamento utilizada para refinar os dados experimentais que são obtidos pela Técnica de Difração de Raios-X, para o estudo dos parâmetros estruturais do material analisado, através da formulação de um modelo teórico que condiz com padrão de difração experimental. Foi desenvolvido, primeiramente, por Rietveld (Young 1995), em 1960, e desde então, tem sido amplamente aplicado com o propósito mencionado por meio de programas livres como o Fullprof, Rietan, GSAS, DBWS, entre outros (Filho 2011; Ibarra 2013).

O modelo desenvolvido está baseado no método dos mínimos quadrados, sendo necessários, para o refinamento da estrutura cristalina pelo método de Rietveld, a inclusão dos parâmetros estruturais grupo espacial, estrutura cristalina, posição dos átomos na célula unitária da amostra, entre outros (Ibarra 2013).

O método dos mínimos quadrados minimiza a quantidade (S_y) segundo o algoritmo de Newton-Raphson, que relaciona o somatório da diferença entre as intensidades observada (y_i) e calculada (y_{ci}), do padrão de difração, em um ponto i deste padrão, elevada ao quadrado, e o peso dado às intensidades neste ponto i (ω_i), que pode ser calculado pelo inverso de y_i (Filho 2011; Ibarra 2013), de acordo com a equação (A.1.1):

$$S_y = \sum \omega_i (y_i - y_{ci})^2 \quad (\text{A.1.1})$$

Esta função é denominada resíduo e inclui todos os parâmetros que dão origem ao padrão de difração da amostra (Ibarra 2013). O objetivo do refinamento de Rietveld é justamente encontrar o menor valor possível que S_y possa assumir dados os valores dos parâmetros da difração.

Nos programas utilizados para o refinamento pelo método de Rietveld, mencionados anteriormente, existem funções que realizam o refinamento, como a função Gaussiana (G) Lorentziana (L), Pseudo-Voigt (pV) e Pseudo-Voigt modificada por Thompson – Cox – Hastings (TCHZ) e outras (Ibarra 2013).

A função Gaussiana é calculada segundo a relação (A.1.2), considerando C_0 como uma constante, H_k^2 como a largura a meia-altura do pico de difração na k -ésima reflexão e a diferença entre $2\theta_i$ e $2\theta_k$ o ângulo de Bragg para esta k -ésima reflexão (Filho 2011):

$$G = \frac{\sqrt{C_0}}{2H_k} \exp\left(\frac{-C_0(2\theta_i - 2\theta_k)^2}{H_k^2}\right) \quad (\text{A.1.2})$$

A função Lorentziana é dada pela equação (A.1.3) (Filho 2011):

$$L = \frac{2}{\pi H_k} \frac{1}{\left(1 + \frac{4(2\theta_i - 2\theta_k)^2}{H_k^2}\right)} \quad (\text{A.1.3})$$

A função pseudo-Voigt consiste em uma combinação linear das duas funções anteriores, Gaussiana e Lorentziana (Ibarra 2013), segundo a relação (A.1.4):

$$\rho V = \eta L + (1 - \eta)G \quad (\text{A.1.4})$$

Sendo η o parâmetro que descreve a forma do pico de difração. Se $\eta = 0$, a função é Gaussiana, se $\eta=1$, é uma Lorentziana e se o valor de η estiver entre 0 e 1, tem-se uma combinação das duas funções (Ibarra 2013).

Para encontrar o valor de η utiliza-se a relação (A.1.5):

$$\eta = (N_A + N_B) * 2\theta \quad (\text{A.1.5})$$

onde $N_A + N_B$ são variáveis refináveis (Ibarra 2013).

Por fim, a função Pseudo-Voigt modificada por Thompson-Cox-Hastings representa uma variação da função Pseudo-Voigt, se diferenciando nesta em relação à seleção dos parâmetros de refinamento, uma vez que, na função Pseudo-Voigt os parâmetros refinados são o η e o H , calculando-se, com isso, H_G e o H_L e, na função Pseudo-Voigt modificada por Thompson-Cox-Hastings, é o oposto: os parâmetros

refinados são os H_G e H_L e, os calculados, os η e H (Filho 2011; Ibarra 2013). Para tanto utiliza-se as relações (A.1.6) e (A.1.7):

$$H_{G^2} = Utg^2\theta + Vtg\theta + W + \frac{Z}{\cos^2\theta} \quad (\text{A.1.6})$$

$$H_L = Xtg\theta + \frac{Y}{\cos\theta} \quad (\text{A.1.7})$$

U, W, Z, X e Y são parâmetros refináveis, pelo programa, que definem a forma do perfil, sendo que, os parâmetros Y e Z fornecem as medidas dos alargamentos isotrópicos em decorrência dos efeitos dos tamanhos dos cristalitos, onde Y são os alargamentos de natureza Lorentziana, e Z, os de natureza Gaussiana. Já os parâmetros X e U fornecem as medidas dos alargamentos isotrópicos que ocorrem, neste caso, em função de micro-deformações das duas naturezas, Lorentziana e Gaussiana, respectivamente. Por fim, os parâmetros V e W dizem respeito aos alargamentos instrumentais (Filho 2011). Estes parâmetros da forma do perfil possibilitam, como explicitado, uma interpretação física dos tipos de alargamentos, que podem ser Gaussiano, Lorentziano ou instrumental (Filho 2011).

Anexo A

ANEXO A - TABELAS COM AS MEDIÇÕES MAGNÉTICAS DOS FILMES

A seguir são apresentadas as tabelas contendo os dados das medições magnéticas realizadas no trabalho, dos filmes finos de SnO₂ dopados com 1 a 5% de Fe. Os dados apresentados são a temperatura, em Kelvin (K), campo magnético (H), em Oersted (Oe), e magnetização ($M_{\text{SnO}_2\text{-Fe}\%}$), em unidades eletromagnéticas, de cada filme fino. Também são apresentados os cálculos das diferenças das magnetizações para cada filme fino (M_{final}), em função da área medida de cada filme, em centímetros ao quadrado, após retirada a resposta magnética do substrato de vidro (M_{vidro}). Os cálculos efetuados nas tabelas possibilitaram a confecção do gráfico de magnetização pelo campo magnético medido para os filmes com dopagem de ferro, apresentado no capítulo Resultados e Discussão do trabalho¹⁵.

Tabela 13: Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO₂ dopado com 1% de Fe.

Temperatura (K)	H (Oe)	$M_{\text{SnO}_2\text{-Fe}1\%}$ (e.m.u.)	M_{vidro}	$(M_{\text{SnO}_2\text{-Fe}1\%}) - (M_{\text{vidro}}) = M_{\text{final}}$	$M_{\text{final}}/\text{Área}$
300,00052	-0,06103	-6,33E-08	-8,95E-08	2,62E-08	2,62E-07
300,0006	2,00188	-1,85E-09	-7,86E-08	7,68E-08	7,68E-07
300,00075	8,03195	-1,01E-08	-7,02E-08	6,01E-08	6,01E-07
300,00107	18,02917	4,33E-08	-8,51E-08	1,28E-07	1,28E-06
300,00009	31,93251	-1,29E-08	-2,64E-07	2,51E-07	2,51E-06
300,00241	49,93727	8,43E-08	-4,49E-07	5,33E-07	5,33E-06
300,0119	72,00683	6,96E-08	-6,56E-07	7,26E-07	7,26E-06
300,0134	97,98251	3,11E-07	-9,53E-07	1,26E-06	1,26E-05
300,01718	127,99857	3,33E-07	-1,25E-06	1,58E-06	1,58E-05
300,02536	162,11607	4,78E-07	-1,57E-06	2,05E-06	2,05E-05
300,0325	199,9688	5,73E-07	-1,93E-06	2,51E-06	2,51E-05
300,04587	242,03279	5,84E-07	-2,27E-06	2,85E-06	2,85E-05
300,06653	288,05173	7,23E-07	-2,69E-06	3,41E-06	3,41E-05
300,08275	337,85474	6,92E-07	-3,16E-06	3,85E-06	3,85E-05
300,08075	391,80798	5,97E-07	-3,68E-06	4,28E-06	4,28E-05
300,07123	449,83826	5,76E-07	-4,30E-06	4,88E-06	4,88E-05
300,05975	511,75018	4,80E-07	-4,89E-06	5,37E-06	5,37E-05
300,0477	578,06873	4,06E-07	-5,00E-06	5,41E-06	5,41E-05
300,03976	647,86615	1,72E-07	-6,19E-06	6,37E-06	6,37E-05
300,03435	721,7406	-1,06E-07	-6,94E-06	6,84E-06	6,84E-05
300,04277	799,98499	-2,75E-07	-7,78E-06	7,50E-06	7,50E-05
300,04279	881,91577	-7,32E-07	-8,49E-06	7,76E-06	7,76E-05
300,03981	967,82599	-9,83E-07	-9,36E-06	8,38E-06	8,38E-05
300,03693	1058,08179	-1,26E-06	-1,02E-05	8,90E-06	8,90E-05
300,03062	1152,04822	-1,92E-06	-1,13E-05	9,34E-06	9,34E-05
300,02667	1249,93311	-2,20E-06	-1,21E-05	9,88E-06	9,88E-05

¹⁵ Encontra-se na página 110 do trabalho.

Observação: nas tabelas “E” significa “elevado a”.

300,02425	1351,91943	-2,92E-06	-1,29E-05	1,00E-05	1,00E-04
300,03474	1457,93384	-3,57E-06	-1,43E-05	1,08E-05	1,08E-04
300,05536	1567,95203	-4,22E-06	-1,54E-05	1,12E-05	1,12E-04
300,05898	1681,9375	-4,93E-06	-1,66E-05	1,17E-05	1,17E-04
300,06427	1799,54822	-5,76E-06	-1,79E-05	1,21E-05	1,21E-04
300,08133	1921,91956	-6,51E-06	-1,93E-05	1,28E-05	1,28E-04
300,07689	2047,70874	-7,44E-06	-2,05E-05	1,30E-05	1,30E-04
300,06633	2178,09985	-8,25E-06	-2,20E-05	1,38E-05	1,38E-04
300,05574	2311,83545	-9,17E-06	-2,34E-05	1,43E-05	1,43E-04
300,04561	2449,74585	-1,02E-05	-2,48E-05	1,47E-05	1,47E-04
300,03824	2591,76978	-1,11E-05	-2,64E-05	1,53E-05	1,53E-04
300,03101	2737,87085	-1,22E-05	-2,80E-05	1,58E-05	1,58E-04
300,02605	2887,73145	-1,34E-05	-2,97E-05	1,63E-05	1,63E-04
300,03459	3041,82764	-1,44E-05	-3,14E-05	1,69E-05	1,69E-04
300,04623	3200,05005	-1,55E-05	-3,29E-05	1,74E-05	1,74E-04
300,05025	3361,9707	-1,65E-05	-3,48E-05	1,83E-05	1,83E-04
300,07445	3527,76074	-1,78E-05	-3,64E-05	1,86E-05	1,86E-04
300,10493	3698,26294	-1,91E-05	-3,82E-05	1,91E-05	1,91E-04
300,10309	3872,34155	-2,03E-05	-4,01E-05	1,98E-05	1,98E-04
300,08719	4050,17969	-2,15E-05	-4,20E-05	2,06E-05	2,06E-04
300,07173	4232,16797	-2,28E-05	-4,39E-05	2,11E-05	2,11E-04
300,05914	4418,28223	-2,41E-05	-4,60E-05	2,19E-05	2,19E-04
300,04829	4608,26611	-2,55E-05	-4,79E-05	2,24E-05	2,24E-04
300,04605	4802,44922	-2,69E-05	-5,01E-05	2,32E-05	2,32E-04
300,0611	5000,30615	-2,82E-05	-5,21E-05	2,39E-05	2,39E-04
300,10541	5500,0083	-3,18E-05	-5,74E-05	2,56E-05	2,56E-04
300,09883	5600,2002	-3,23E-05	-5,82E-05	2,59E-05	2,59E-04
300,08139	8400,1543	-5,28E-05	-9,05E-05	3,77E-05	3,77E-04
300,06468	11200,44922	-7,30E-05	-1,21E-04	4,76E-05	4,76E-04
300,04637	14000,42773	-9,33E-05	-1,51E-04	5,72E-05	5,72E-04
300,034	16800,30859	-1,14E-04	-1,81E-04	6,69E-05	6,69E-04
300,02357	19600,35938	-1,34E-04	-2,11E-04	7,67E-05	7,67E-04
300,02104	22400,36133	-1,54E-04	-2,41E-04	8,63E-05	8,63E-04
300,02863	25200,32813	-1,75E-04	-2,71E-04	9,59E-05	9,59E-04
300,03049	28000,33203	-1,95E-04	-3,01E-04	1,05E-04	0,00105
300,02551	30800,31836	-2,15E-04	-3,31E-04	1,16E-04	0,00116
300,01953	33600,34766	-2,35E-04	-3,61E-04	1,26E-04	0,00126
300,0161	36400,44922	-2,55E-04	-3,91E-04	1,35E-04	0,00135
300,00975	39200,46094	-2,76E-04	-4,21E-04	1,45E-04	0,00145
300,00725	42000,24219	-2,97E-04	-4,51E-04	1,54E-04	0,00154
300,00661	44800,17578	-3,16E-04	-4,81E-04	1,65E-04	0,00165
300,00421	47600,34766	-3,38E-04	-5,11E-04	1,73E-04	0,00173
300,0101	50400,16797	-3,57E-04	-5,41E-04	1,85E-04	0,00185
300,0336	53200,32813	-3,78E-04	-5,71E-04	1,93E-04	0,00193
300,04942	56000,38281	-3,98E-04	-6,02E-04	2,04E-04	0,00204
300,04518	58800,32031	-4,18E-04	-6,32E-04	2,14E-04	0,00214
300,0379	61600,28906	-4,38E-04	-6,62E-04	2,24E-04	0,00224
300,03072	64400,375	-4,58E-04	-6,93E-04	2,34E-04	0,00234

300,0403	67200,36719	-4,79E-04	-7,23E-04	2,44E-04	0,00244
300,04155	70000,48438	-4,99E-04	-7,53E-04	2,54E-04	0,00254
300,03497	67200,4375	-4,78E-04	-7,22E-04	2,44E-04	0,00244
300,02538	64400,44922	-4,58E-04	-6,92E-04	2,35E-04	0,00235
300,01907	61600,34375	-4,37E-04	-6,61E-04	2,24E-04	0,00224
300,01442	58800,47656	-4,17E-04	-6,31E-04	2,14E-04	0,00214
300,01491	56000,34375	-3,97E-04	-6,01E-04	2,04E-04	0,00204
300,0237	53200,31641	-3,77E-04	-5,71E-04	1,94E-04	0,00194
300,01852	50400,32813	-3,56E-04	-5,41E-04	1,84E-04	0,00184
300,01389	47600,38672	-3,36E-04	-5,11E-04	1,75E-04	0,00175
300,01768	44800,26172	-3,16E-04	-4,80E-04	1,64E-04	0,00164
300,04782	42000,47656	-2,96E-04	-4,50E-04	1,55E-04	0,00155
300,04408	39200,24219	-2,75E-04	-4,20E-04	1,45E-04	0,00145
300,0322	36400,32813	-2,55E-04	-3,90E-04	1,35E-04	0,00135
300,02708	33600,37109	-2,35E-04	-3,60E-04	1,25E-04	0,00125
300,03545	30800,38086	-2,15E-04	-3,30E-04	1,16E-04	0,00116
300,03551	28000,36523	-1,94E-04	-3,00E-04	1,06E-04	0,00106
300,02917	25200,20508	-1,74E-04	-2,70E-04	9,59E-05	9,59E-04
300,02046	22400,3125	-1,54E-04	-2,40E-04	8,64E-05	8,64E-04
300,015	19600,44531	-1,33E-04	-2,10E-04	7,65E-05	7,65E-04
300,01178	16800,2832	-1,13E-04	-1,80E-04	6,69E-05	6,69E-04
300,01132	14000,52441	-9,26E-05	-1,50E-04	5,70E-05	5,70E-04
300,02585	11200,15625	-7,25E-05	-1,20E-04	4,71E-05	4,71E-04
300,04446	8400,23926	-5,22E-05	-8,96E-05	3,74E-05	3,74E-04
300,0426	5600,38379	-3,19E-05	-5,97E-05	2,78E-05	2,78E-04
300,03534	5500,3501	-3,13E-05	-5,87E-05	2,75E-05	2,75E-04
300,02269	5000,35498	-2,78E-05	-5,33E-05	2,55E-05	2,55E-04
300,01782	4802,33936	-2,64E-05	-5,12E-05	2,48E-05	2,48E-04
300,01576	4608,48584	-2,50E-05	-4,89E-05	2,39E-05	2,39E-04
300,0126	4418,42871	-2,36E-05	-4,72E-05	2,36E-05	2,36E-04
300,00867	4232,37598	-2,22E-05	-4,52E-05	2,30E-05	2,30E-04
300,00758	4050,38696	-2,09E-05	-4,32E-05	2,23E-05	2,23E-04
300,0081	3872,39038	-1,97E-05	-4,13E-05	2,16E-05	2,16E-04
300,0083	3698,49487	-1,84E-05	-3,94E-05	2,10E-05	2,10E-04
300,01279	3528,38379	-1,73E-05	-3,77E-05	2,04E-05	2,04E-04
300,02429	3362,21484	-1,62E-05	-3,59E-05	1,97E-05	1,97E-04
300,02634	3200,45288	-1,50E-05	-3,42E-05	1,92E-05	1,92E-04
300,02357	3042,29175	-1,38E-05	-3,25E-05	1,87E-05	1,87E-04
300,01868	2888,24414	-1,28E-05	-3,08E-05	1,80E-05	1,80E-04
300,01331	2738,28589	-1,18E-05	-2,93E-05	1,75E-05	1,75E-04
300,01274	2592,20923	-1,08E-05	-2,77E-05	1,69E-05	1,69E-04
300,01653	2450,40503	-9,80E-06	-2,61E-05	1,63E-05	1,63E-04
300,01497	2312,01855	-8,90E-06	-2,48E-05	1,59E-05	1,59E-04
300,01265	2178,40503	-7,97E-06	-2,33E-05	1,53E-05	1,53E-04
300,00941	2048,20923	-7,24E-06	-2,19E-05	1,47E-05	1,47E-04
300,00749	1922,43225	-6,26E-06	-2,06E-05	1,43E-05	1,43E-04
300,00772	1800,26843	-5,63E-06	-1,92E-05	1,36E-05	1,36E-04
300,00581	1682,25476	-4,71E-06	-1,81E-05	1,34E-05	1,34E-04

300,00368	1568,29382	-4,11E-06	-1,68E-05	1,27E-05	1,27E-04
300,00464	1458,01929	-3,39E-06	-1,57E-05	1,23E-05	1,23E-04
300,0029	1352,18799	-2,77E-06	-1,47E-05	1,19E-05	1,19E-04
300,00299	1250,20166	-2,33E-06	-1,32E-05	1,09E-05	1,09E-04
300,002	1151,99939	-1,78E-06	-1,25E-05	1,07E-05	1,07E-04
300,00583	1058,24036	-1,42E-06	-1,17E-05	1,02E-05	1,02E-04
300,01581	968,13116	-1,48E-06	-1,06E-05	9,17E-06	9,17E-05
300,0202	882,22101	-5,27E-07	-9,79E-06	9,26E-06	9,26E-05
300,01981	800,13153	-3,54E-07	-9,31E-06	8,95E-06	8,95E-05
300,01683	721,9115	1,13E-07	-8,26E-06	8,37E-06	8,37E-05
300,01366	648,23236	2,50E-07	-7,47E-06	7,72E-06	7,72E-05
300,01488	577,91003	1,94E-07	-6,60E-06	6,80E-06	6,80E-05
300,02661	511,93329	3,75E-07	-6,13E-06	6,50E-06	6,50E-05
300,02618	449,98468	8,54E-07	-5,47E-06	6,32E-06	6,32E-05
300,0248	391,97885	5,98E-07	-4,93E-06	5,53E-06	5,53E-05
300,03391	338,1843	9,21E-07	-4,58E-06	5,50E-06	5,50E-05
300,04619	288,10056	7,93E-07	-3,97E-06	4,77E-06	4,77E-05
300,04265	242,39899	6,84E-07	-3,50E-06	4,18E-06	4,18E-05
300,03725	200,24954	6,19E-07	-2,75E-06	3,37E-06	3,37E-05
300,03134	162,32358	8,06E-07	-2,34E-06	3,15E-06	3,15E-05
300,02736	128,19389	7,69E-07	-2,01E-06	2,78E-06	2,78E-05
300,03377	98,12899	6,27E-07	-1,67E-06	2,30E-06	2,30E-05
300,0486	72,16551	3,84E-07	-1,23E-06	1,61E-06	1,61E-05
300,0475	50,16919	3,15E-07	-1,00E-06	1,32E-06	1,32E-05
300,04556	32,07899	1,66E-07	-7,65E-07	9,32E-07	9,32E-06
300,05588	17,94373	1,74E-07	-6,21E-07	7,96E-07	7,96E-06
300,05075	7,92209	5,56E-08	-2,85E-07	3,40E-07	3,40E-06
300,05284	1,89203	2,52E-07	-1,32E-07	3,84E-07	3,84E-06
300,08598	-0,15869	4,36E-07	1,51E-07	2,85E-07	2,85E-06
300,11945	-1,95306	3,59E-07	2,01E-07	1,58E-07	1,58E-06
300,12868	-7,80003	3,86E-07	2,37E-07	1,49E-07	1,49E-06
300,11452	-17,82166	2,18E-07	2,60E-07	-4,26E-08	-4,26E-07
300,09622	-31,78603	-1,05E-07	3,55E-07	-4,60E-07	-4,60E-06
300,07936	-49,83961	-5,81E-07	5,65E-07	-1,15E-06	-1,15E-05
300,06371	-71,7627	-6,53E-07	5,99E-07	-1,25E-06	-1,25E-05
300,05463	-97,7872	-7,94E-07	1,09E-06	-1,89E-06	-1,89E-05
300,04933	-127,8521	-1,12E-06	1,58E-06	-2,70E-06	-2,70E-05
300,04065	-161,53015	-6,46E-07	1,99E-06	-2,64E-06	-2,64E-05
300,03979	-199,78569	-9,62E-07	2,57E-06	-3,53E-06	-3,53E-05
300,06387	-241,76425	-7,99E-07	3,21E-06	-4,01E-06	-4,01E-05
300,07063	-287,70993	-9,95E-07	3,62E-06	-4,61E-06	-4,61E-05
300,07506	-337,56177	-9,08E-07	4,63E-06	-5,54E-06	-5,54E-05
300,09195	-391,50281	-9,96E-07	5,03E-06	-6,03E-06	-6,03E-05
300,08572	-449,81384	-6,13E-07	5,79E-06	-6,40E-06	-6,40E-05
300,07489	-511,82339	-9,42E-07	6,39E-06	-7,34E-06	-7,34E-05
300,06966	-577,849	-7,45E-07	6,93E-06	-7,68E-06	-7,68E-05
300,08102	-647,70746	-2,81E-07	7,88E-06	-8,16E-06	-8,16E-05
300,07433	-721,5575	-7,11E-08	8,62E-06	-8,69E-06	-8,69E-05

300,06451	-799,80188	1,52E-07	9,45E-06	-9,30E-06	-9,30E-05
300,05339	-881,83038	4,64E-07	1,01E-05	-9,64E-06	-9,64E-05
300,04962	-967,72833	1,15E-06	1,10E-05	-9,86E-06	-9,86E-05
300,07582	-1058,05737	1,59E-06	1,16E-05	-1,00E-05	-1,00E-04
300,1068	-1151,86511	1,43E-06	1,29E-05	-1,15E-05	-1,15E-04
300,10715	-1249,83545	2,41E-06	1,40E-05	-1,16E-05	-1,16E-04
300,10399	-1351,84619	3,33E-06	1,54E-05	-1,21E-05	-1,21E-04
300,10977	-1457,83618	3,79E-06	1,63E-05	-1,26E-05	-1,26E-04
300,10066	-1568,02527	4,66E-06	1,73E-05	-1,27E-05	-1,27E-04
300,08615	-1682,03516	5,08E-06	1,88E-05	-1,37E-05	-1,37E-04
300,07066	-1799,99988	5,89E-06	2,01E-05	-1,42E-05	-1,42E-04
300,0587	-1921,83398	6,89E-06	2,14E-05	-1,45E-05	-1,45E-04
300,04688	-2047,74524	7,62E-06	2,29E-05	-1,53E-05	-1,53E-04
300,03755	-2178,07544	8,57E-06	2,41E-05	-1,56E-05	-1,56E-04
300,03088	-2311,76221	9,38E-06	2,55E-05	-1,61E-05	-1,61E-04
300,02983	-2449,72144	9,69E-06	2,74E-05	-1,77E-05	-1,77E-04
300,05321	-2591,97729	1,13E-05	2,83E-05	-1,71E-05	-1,71E-04
300,08411	-2737,72437	1,30E-05	2,98E-05	-1,68E-05	-1,68E-04
300,08513	-2888	1,33E-05	3,15E-05	-1,82E-05	-1,82E-04
300,07616	-3041,82764	1,39E-05	3,32E-05	-1,93E-05	-1,93E-04
300,06688	-3200,01318	1,53E-05	3,43E-05	-1,90E-05	-1,90E-04
300,05617	-3361,95825	1,66E-05	3,66E-05	-2,00E-05	-2,00E-04
300,04523	-3527,83423	1,81E-05	3,83E-05	-2,02E-05	-2,02E-04
300,03905	-3698,26294	1,90E-05	4,05E-05	-2,15E-05	-2,15E-04
300,05273	-3872,45117	2,03E-05	4,20E-05	-2,18E-05	-2,18E-04
300,07448	-4050,28955	2,15E-05	4,40E-05	-2,24E-05	-2,24E-04
300,09149	-4232,50977	2,28E-05	4,58E-05	-2,30E-05	-2,30E-04
300,08844	-4418,37988	2,41E-05	4,79E-05	-2,37E-05	-2,37E-04
300,07976	-4608,2417	2,55E-05	4,99E-05	-2,44E-05	-2,44E-04
300,06885	-4802,33936	2,69E-05	5,20E-05	-2,51E-05	-2,51E-04
300,06248	-5000,3916	2,84E-05	5,41E-05	-2,58E-05	-2,58E-04
300,09605	-5499,97168	3,18E-05	5,94E-05	-2,76E-05	-2,76E-04
300,10379	-5600,32227	3,24E-05	6,02E-05	-2,78E-05	-2,78E-04
300,09161	-8400,47168	5,29E-05	9,05E-05	-3,76E-05	-3,76E-04
300,07301	-11200,2168	7,32E-05	1,20E-04	-4,73E-05	-4,73E-04
300,05379	-14000,40332	9,35E-05	1,51E-04	-5,71E-05	-5,71E-04
300,03893	-16800,33203	1,14E-04	1,81E-04	-6,69E-05	-6,69E-04
300,02905	-19600,29883	1,34E-04	2,11E-04	-7,68E-05	-7,68E-04
300,02226	-22400,3125	1,54E-04	2,41E-04	-8,62E-05	-8,62E-04
300,01549	-25200,35156	1,74E-04	2,71E-04	-9,62E-05	-9,62E-04
300,01151	-28000,41602	1,95E-04	3,01E-04	-1,06E-04	-0,00106
300,00745	-30800,44141	2,15E-04	3,31E-04	-1,16E-04	-0,00116
300,0038	-33600,1875	2,35E-04	3,61E-04	-1,25E-04	-0,00125
300,00581	-36400,39844	2,56E-04	3,91E-04	-1,35E-04	-0,00135
300,02377	-39200,48828	2,76E-04	4,21E-04	-1,45E-04	-0,00145
300,0276	-42000,29297	2,97E-04	4,51E-04	-1,54E-04	-0,00154
300,02362	-44800,22266	3,17E-04	4,81E-04	-1,65E-04	-0,00165
300,02733	-47600,40625	3,37E-04	5,11E-04	-1,75E-04	-0,00175

300,05702	-50400,27734	3,57E-04	5,41E-04	-1,84E-04	-0,00184
300,07169	-53200,40234	3,78E-04	5,71E-04	-1,94E-04	-0,00194
300,06332	-56000,48828	3,98E-04	6,02E-04	-2,04E-04	-0,00204
300,04782	-58800,45313	4,18E-04	6,32E-04	-2,14E-04	-0,00214
300,03815	-61600,49609	4,38E-04	6,62E-04	-2,24E-04	-0,00224
300,02681	-64400,21875	4,58E-04	6,92E-04	-2,34E-04	-0,00234
300,02289	-67200,375	4,78E-04	7,23E-04	-2,44E-04	-0,00244
300,02361	-70000,45313	4,99E-04	7,53E-04	-2,54E-04	-0,00254
300,01868	-67200,39063	4,77E-04	7,22E-04	-2,44E-04	-0,00244
300,01736	-64400,25391	4,58E-04	6,92E-04	-2,34E-04	-0,00234
300,02023	-61600,48047	4,38E-04	6,61E-04	-2,24E-04	-0,00224
300,02269	-58800,47656	4,17E-04	6,31E-04	-2,14E-04	-0,00214
300,04842	-56000,20703	3,97E-04	6,02E-04	-2,05E-04	-0,00205
300,07822	-53200,44141	3,77E-04	5,71E-04	-1,94E-04	-0,00194
300,06699	-50400,41016	3,57E-04	5,41E-04	-1,84E-04	-0,00184
300,05086	-47600,38672	3,36E-04	5,10E-04	-1,74E-04	-0,00174
300,03688	-44800,29688	3,16E-04	4,80E-04	-1,64E-04	-0,00164
300,02475	-42000,39063	2,95E-04	4,50E-04	-1,55E-04	-0,00155
300,01663	-39200,36328	2,76E-04	4,20E-04	-1,44E-04	-0,00144
300,0114	-36400,35938	2,55E-04	3,90E-04	-1,35E-04	-0,00135
300,01094	-33600,22656	2,35E-04	3,60E-04	-1,25E-04	-0,00125
300,0314	-30800,22266	2,15E-04	3,30E-04	-1,15E-04	-0,00115
300,03134	-28000,41602	1,94E-04	3,00E-04	-1,06E-04	-0,00106
300,02281	-25200,41406	1,74E-04	2,70E-04	-9,57E-05	-9,57E-04
300,01552	-22400,25195	1,54E-04	2,40E-04	-8,62E-05	-8,62E-04
300,01154	-19600,44531	1,33E-04	2,10E-04	-7,65E-05	-7,65E-04
300,01572	-16800,25781	1,13E-04	1,80E-04	-6,66E-05	-6,66E-04
300,04706	-14000,30566	9,27E-05	1,50E-04	-5,70E-05	-5,70E-04
300,04956	-11200,29102	7,24E-05	1,20E-04	-4,73E-05	-4,73E-04
300,06241	-8400,21484	5,21E-05	8,96E-05	-3,74E-05	-3,74E-04
300,05748	-5600,31006	3,18E-05	5,97E-05	-2,79E-05	-2,79E-04
300,04851	-5500,49658	3,14E-05	5,86E-05	-2,72E-05	-2,72E-04
300,02823	-5000,17188	2,76E-05	5,32E-05	-2,56E-05	-2,56E-04
300,02263	-4802,26611	2,63E-05	5,12E-05	-2,50E-05	-2,50E-04
300,01878	-4608,25391	2,48E-05	4,91E-05	-2,43E-05	-2,43E-04
300,01495	-4418,33105	2,35E-05	4,70E-05	-2,35E-05	-2,35E-04
300,01419	-4232,2417	2,23E-05	4,51E-05	-2,28E-05	-2,28E-04
300,01755	-4050,44849	2,10E-05	4,31E-05	-2,21E-05	-2,21E-04
300,01897	-3872,29272	1,96E-05	4,12E-05	-2,16E-05	-2,16E-04
300,0186	-3698,4707	1,85E-05	3,94E-05	-2,09E-05	-2,09E-04
300,0206	-3528,3103	1,71E-05	3,76E-05	-2,05E-05	-2,05E-04
300,01852	-3362,16602	1,61E-05	3,58E-05	-1,97E-05	-1,97E-04
300,01619	-3200,30615	1,50E-05	3,41E-05	-1,91E-05	-1,91E-04
300,01523	-3042,16968	1,35E-05	3,24E-05	-1,89E-05	-1,89E-04
300,01651	-2888,45166	1,28E-05	3,09E-05	-1,81E-05	-1,81E-04
300,02191	-2738,17603	1,18E-05	2,92E-05	-1,75E-05	-1,75E-04
300,01952	-2592,5144	1,07E-05	2,77E-05	-1,70E-05	-1,70E-04
300,02251	-2450,31958	9,78E-06	2,62E-05	-1,64E-05	-1,64E-04

300,04051	-2311,95752	8,91E-06	2,47E-05	-1,58E-05	-1,58E-04
300,0435	-2178,36841	8,28E-06	2,33E-05	-1,51E-05	-1,51E-04
300,05089	-2048,06274	7,18E-06	2,19E-05	-1,47E-05	-1,47E-04
300,04698	-1922,3468	6,32E-06	2,06E-05	-1,43E-05	-1,43E-04
300,03893	-1800,07312	5,51E-06	1,91E-05	-1,36E-05	-1,36E-04
300,03511	-1682,20605	4,71E-06	1,79E-05	-1,32E-05	-1,32E-04
300,02898	-1568,36707	4,01E-06	1,68E-05	-1,28E-05	-1,28E-04
300,03035	-1458,2146	3,27E-06	1,56E-05	-1,23E-05	-1,23E-04
300,02841	-1352,34656	2,68E-06	1,44E-05	-1,17E-05	-1,17E-04
300,02574	-1250,33594	1,59E-06	1,36E-05	-1,20E-05	-1,20E-04
300,03136	-1152,06042	1,75E-06	1,27E-05	-1,10E-05	-1,10E-04
300,03574	-1058,42346	1,34E-06	1,17E-05	-1,03E-05	-1,03E-04
300,03862	-968,26538	7,50E-07	1,06E-05	-9,85E-06	-9,85E-05
300,04594	-882,19659	4,86E-07	9,69E-06	-9,20E-06	-9,20E-05
300,04128	-800,30237	3,51E-07	9,00E-06	-8,65E-06	-8,65E-05
300,03564	-722,10681	-2,83E-07	8,41E-06	-8,69E-06	-8,69E-05
300,02943	-648,37885	-2,04E-07	7,24E-06	-7,44E-06	-7,44E-05
300,02271	-578,23962	-4,07E-07	6,72E-06	-7,13E-06	-7,13E-05
300,02025	-512,00653	-4,99E-07	6,14E-06	-6,64E-06	-6,64E-05
300,03146	-450,35092	-9,37E-07	5,59E-06	-6,53E-06	-6,53E-05
300,02969	-392,25961	-7,51E-07	4,75E-06	-5,50E-06	-5,50E-05
300,02467	-338,33078	-9,70E-07	4,16E-06	-5,13E-06	-5,13E-05
300,02209	-288,1738	-7,74E-07	3,70E-06	-4,47E-06	-4,47E-05
300,02879	-241,95955	-8,34E-07	3,34E-06	-4,17E-06	-4,17E-05
300,02765	-200,0054	-7,32E-07	2,61E-06	-3,34E-06	-3,34E-05
300,02328	-162,09166	-6,84E-07	2,33E-06	-3,02E-06	-3,02E-05
300,02393	-127,97417	-8,24E-07	1,91E-06	-2,74E-06	-2,74E-05
300,03564	-97,90927	-2,73E-07	1,61E-06	-1,89E-06	-1,89E-05
300,03436	-71,89697	-1,89E-07	1,32E-06	-1,51E-06	-1,51E-05
300,03041	-50,04713	-3,79E-07	1,10E-06	-1,48E-06	-1,48E-05
300,02632	-31,95692	-1,28E-07	6,11E-07	-7,39E-07	-7,39E-06
300,02129	-17,95593	-2,20E-07	4,35E-07	-6,55E-07	-6,55E-06
300,01703	-7,94651	-1,70E-07	2,36E-07	-4,05E-07	-4,05E-06
300,01227	-1,92865	-2,85E-07	5,23E-08	-3,38E-07	-3,38E-06
300,01158	0,17089	-3,59E-07	-1,83E-07	-1,75E-07	-1,75E-06
300,01697	2,0263	-4,15E-07	-1,95E-07	-2,20E-07	-2,20E-06
300,03185	8,08078	-4,30E-07	-2,77E-07	-1,54E-07	-1,54E-06
300,03482	18,01697	-1,64E-07	-3,65E-07	2,00E-07	2,00E-06
300,03082	32,06678	1,33E-07	-3,42E-07	4,75E-07	4,75E-06
300,02841	50,03492	3,09E-07	-5,41E-07	8,49E-07	8,49E-06
300,02354	72,01904	5,12E-07	-8,40E-07	1,35E-06	1,35E-05
300,02124	98,06796	5,69E-07	-1,09E-06	1,66E-06	1,66E-05
300,02531	128,0352	6,97E-07	-1,63E-06	2,32E-06	2,32E-05
300,02934	162,18932	1,11E-06	-1,97E-06	3,08E-06	3,08E-05
300,02864	200,11526	6,70E-07	-2,60E-06	3,27E-06	3,27E-05
300,02641	242,0694	1,05E-06	-3,29E-06	4,34E-06	4,34E-05
300,0233	288,08838	1,03E-06	-3,59E-06	4,62E-06	4,62E-05
300,03192	337,90353	1,43E-06	-4,28E-06	5,70E-06	5,70E-05

300,03073	392,00327	1,21E-06	-4,63E-06	5,84E-06	5,84E-05
300,03032	450,08237	1,21E-06	-5,25E-06	6,46E-06	6,46E-05
300,04906	511,92108	7,19E-07	-6,08E-06	6,80E-06	6,80E-05
300,05986	578,28845	6,66E-07	-7,31E-06	7,97E-06	7,97E-05
300,05739	648,08588	1,93E-07	-7,73E-06	7,92E-06	7,92E-05
300,04993	721,9115	-6,21E-08	-8,50E-06	8,44E-06	8,44E-05
300,04115	800,24133	-3,61E-07	-9,55E-06	9,19E-06	9,19E-05
300,03514	882,05011	-8,10E-07	-1,02E-05	9,42E-06	9,42E-05
300,04703	967,98474	-8,14E-07	-1,15E-05	1,07E-05	1,07E-04
300,04727	1058,24036	-1,77E-06	-1,25E-05	1,07E-05	1,07E-04
300,05232	1152,0238	-2,47E-06	-1,31E-05	1,07E-05	1,07E-04
300,04958	1250,05518	-2,54E-06	-1,45E-05	1,19E-05	1,19E-04
300,04716	1352,078	-3,21E-06	-1,51E-05	1,19E-05	1,19E-04
300,05092	1458,06812	-2,79E-06	-1,64E-05	1,37E-05	1,37E-04
300,04532	1568,13525	-4,12E-06	-1,76E-05	1,34E-05	1,34E-04
300,03918	1682,07166	-5,33E-06	-1,88E-05	1,35E-05	1,35E-04
300,03159	1799,6947	-5,42E-06	-2,01E-05	1,47E-05	1,47E-04
300,02856	1922,06604	-6,76E-06	-2,14E-05	1,47E-05	1,47E-04
300,04077	2047,87964	-7,63E-06	-2,24E-05	1,47E-05	1,47E-04
300,04109	2178,27051	-8,84E-06	-2,40E-05	1,51E-05	1,51E-04
300,03593	2312,00635	-9,55E-06	-2,55E-05	1,59E-05	1,59E-04
300,02936	2449,94116	-1,04E-05	-2,70E-05	1,66E-05	1,66E-04
300,02258	2592,07495	-1,13E-05	-2,83E-05	1,70E-05	1,70E-04
300,01933	2737,94409	-1,23E-05	-3,00E-05	1,77E-05	1,77E-04
300,01537	2888,25635	-1,34E-05	-3,12E-05	1,78E-05	1,78E-04
300,01131	3041,97437	-1,46E-05	-3,32E-05	1,86E-05	1,86E-04
300,01004	3200,13525	-1,55E-05	-3,50E-05	1,94E-05	1,94E-04
300,01089	3362,10522	-1,67E-05	-3,66E-05	1,99E-05	1,99E-04
300,02023	3527,89502	-1,78E-05	-3,85E-05	2,06E-05	2,06E-04
300,02524	3698,2749	-1,90E-05	-4,01E-05	2,11E-05	2,11E-04
300,02844	3872,43921	-2,05E-05	-4,22E-05	2,17E-05	2,17E-04
300,02612	4050,36279	-2,15E-05	-4,39E-05	2,24E-05	2,24E-04
300,02141	4232,18066	-2,27E-05	-4,60E-05	2,33E-05	2,33E-04
300,01837	4418,40479	-2,42E-05	-4,80E-05	2,38E-05	2,38E-04
300,01376	4608,44922	-2,56E-05	-4,99E-05	2,43E-05	2,43E-04
300,01038	4802,2417	-2,69E-05	-5,20E-05	2,51E-05	2,51E-04
300,0166	5000,42822	-2,83E-05	-5,42E-05	2,58E-05	2,58E-04
300,04129	5500,39893	-3,19E-05	-5,95E-05	2,76E-05	2,76E-04
300,04611	5600,33496	-3,24E-05	-6,03E-05	2,79E-05	2,79E-04
300,04272	8400,49512	-5,30E-05	-9,05E-05	3,75E-05	3,75E-04
300,0472	11200,4248	-7,31E-05	-1,21E-04	4,74E-05	4,74E-04
300,06348	14000,26855	-9,34E-05	-1,51E-04	5,72E-05	5,72E-04
300,06967	16800,2832	-1,14E-04	-1,81E-04	6,67E-05	6,67E-04
300,05898	19600,32227	-1,34E-04	-2,10E-04	7,65E-05	7,65E-04
300,04576	22400,50781	-1,54E-04	-2,41E-04	8,63E-05	8,63E-04
300,03745	25200,40039	-1,75E-04	-2,71E-04	9,59E-05	9,59E-04
300,0406	28000,24414	-1,95E-04	-3,01E-04	1,06E-04	0,00106
300,03401	30800,31836	-2,15E-04	-3,31E-04	1,16E-04	0,00116

300,02432	33600,33594	-2,36E-04	-3,61E-04	1,25E-04	0,00125
300,01421	36400,41016	-2,56E-04	-3,91E-04	1,35E-04	0,00135
300,01495	39200,41406	-2,75E-04	-4,21E-04	1,46E-04	0,00146
300,01326	42000,21094	-2,96E-04	-4,51E-04	1,55E-04	0,00155
300,03139	44800,49219	-3,18E-04	-4,81E-04	1,63E-04	0,00163
300,02815	47600,34766	-3,37E-04	-5,12E-04	1,75E-04	0,00175
300,02377	50400,32813	-3,57E-04	-5,41E-04	1,84E-04	0,00184
300,01735	53200,39063	-3,78E-04	-5,72E-04	1,94E-04	0,00194
300,01714	56000,29297	-3,98E-04	-6,02E-04	2,04E-04	0,00204
300,0295	58800,35938	-4,18E-04	-6,32E-04	2,14E-04	0,00214
300,03024	61600,37109	-4,38E-04	-6,63E-04	2,24E-04	0,00224
300,04454	64400,4375	-4,58E-04	-6,92E-04	2,34E-04	0,00234
300,04381	67200,41406	-4,79E-04	-7,23E-04	2,44E-04	0,00244
300,03682	70000,34375	-4,99E-04	-7,53E-04	2,54E-04	0,00254

Tabela 14: Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO₂ dopado com 2% de Fe.

Temperatura (K)	H (Oe)	M _{SnO₂-Fe2%} (e.m.u.)	M _{vidro}	(M _{SnO₂-Fe2%})- (M _{vidro})=M _{final}	M _{final} /Área
300,02074	-0,20751	-3,15E-08	-8,95E-08	5,80E-08	3,87E-07
300,01886	2,16057	-2,19E-08	-7,86E-08	5,68E-08	3,79E-07
300,01927	8,14181	2,07E-08	-7,02E-08	9,09E-08	6,06E-07
300,0257	18,15124	-6,98E-10	-8,51E-08	8,44E-08	5,63E-07
300,02422	32,14002	1,10E-07	-2,64E-07	3,74E-07	2,49E-06
300,02557	50,21802	2,08E-07	-4,49E-07	6,57E-07	4,38E-06
300,02733	72,08007	1,32E-07	-6,56E-07	7,88E-07	5,25E-06
300,02576	98,11678	3,17E-07	-9,53E-07	1,27E-06	8,47E-06
300,0276	128,09624	4,12E-07	-1,25E-06	1,66E-06	1,11E-05
300,04024	162,21371	5,96E-07	-1,57E-06	2,17E-06	1,44E-05
300,04077	200,15189	6,07E-07	-1,93E-06	2,54E-06	1,69E-05
300,03477	242,16705	7,58E-07	-2,27E-06	3,02E-06	2,02E-05
300,03079	288,16159	8,21E-07	-2,69E-06	3,51E-06	2,34E-05
300,02525	337,94019	8,92E-07	-3,16E-06	4,05E-06	2,70E-05
300,02089	391,94226	1,06E-06	-3,68E-06	4,75E-06	3,17E-05
300,01604	449,94809	1,11E-06	-4,30E-06	5,41E-06	3,61E-05
300,01237	511,83566	1,04E-06	-4,89E-06	5,93E-06	3,96E-05
300,01563	578,17859	1,12E-06	-5,00E-06	6,13E-06	4,08E-05
300,0266	647,93939	8,76E-07	-6,19E-06	7,07E-06	4,71E-05
300,03473	721,89929	9,29E-07	-6,94E-06	7,87E-06	5,25E-05
300,04828	800,11932	5,03E-07	-7,78E-06	8,28E-06	5,52E-05
300,05014	881,98914	5,07E-07	-8,49E-06	9,00E-06	6,00E-05
300,05948	967,92371	2,68E-07	-9,36E-06	9,63E-06	6,42E-05
300,05556	1058,16724	2,59E-08	-1,02E-05	1,02E-05	6,79E-05
300,0511	1152,09705	-2,80E-08	-1,13E-05	1,12E-05	7,49E-05
300,0461	1249,96973	-3,92E-07	-1,21E-05	1,17E-05	7,79E-05
300,03928	1352,00476	-6,07E-07	-1,29E-05	1,23E-05	8,23E-05

300,03116	1458,00708	-1,10E-06	-1,43E-05	1,32E-05	8,82E-05
300,02419	1568,09851	-1,77E-06	-1,54E-05	1,36E-05	9,09E-05
300,01718	1681,974	-2,24E-06	-1,66E-05	1,44E-05	9,60E-05
300,01627	1799,64587	-2,97E-06	-1,79E-05	1,49E-05	9,95E-05
300,01285	1921,96838	-3,40E-06	-1,93E-05	1,59E-05	1,06E-04
300,0121	2047,85522	-4,11E-06	-2,05E-05	1,64E-05	1,09E-04
300,00874	2178,1853	-4,76E-06	-2,20E-05	1,73E-05	1,15E-04
300,00638	2311,76221	-5,50E-06	-2,34E-05	1,79E-05	1,20E-04
300,00537	2449,68481	-6,19E-06	-2,48E-05	1,86E-05	1,24E-04
300,0049	2591,75757	-6,96E-06	-2,64E-05	1,95E-05	1,30E-04
300,00539	2737,67554	-7,78E-06	-2,80E-05	2,02E-05	1,35E-04
300,00487	2887,90234	-8,77E-06	-2,97E-05	2,09E-05	1,40E-04
300,00482	3041,80322	-9,50E-06	-3,14E-05	2,19E-05	1,46E-04
300,00404	3200,02563	-1,04E-05	-3,29E-05	2,26E-05	1,50E-04
300,00449	3361,98291	-1,12E-05	-3,48E-05	2,35E-05	1,57E-04
300,01515	3527,7854	-1,23E-05	-3,64E-05	2,41E-05	1,61E-04
300,01381	3698,23877	-1,31E-05	-3,82E-05	2,50E-05	1,67E-04
300,01312	3872,18286	-1,42E-05	-4,01E-05	2,59E-05	1,72E-04
300,01218	4050,33813	-1,53E-05	-4,20E-05	2,68E-05	1,78E-04
300,01163	4232,48535	-1,63E-05	-4,39E-05	2,76E-05	1,84E-04
300,01091	4418,24561	-1,75E-05	-4,60E-05	2,86E-05	1,90E-04
300,00989	4608,26611	-1,85E-05	-4,79E-05	2,94E-05	1,96E-04
300,01645	4802,40039	-1,97E-05	-5,01E-05	3,04E-05	2,02E-04
300,01793	5000,3916	-2,09E-05	-5,21E-05	3,12E-05	2,08E-04
300,01166	5500,30127	-2,39E-05	-5,74E-05	3,35E-05	2,23E-04
300,01025	5600,2002	-2,42E-05	-5,82E-05	3,40E-05	2,27E-04
300,01112	8400,42285	-4,17E-05	-9,05E-05	4,88E-05	3,26E-04
300,02852	11200,41211	-5,88E-05	-1,21E-04	6,17E-05	4,11E-04
300,03383	14000,21973	-7,63E-05	-1,51E-04	7,42E-05	4,95E-04
300,02838	16800,25781	-9,37E-05	-1,81E-04	8,69E-05	5,79E-04
300,02151	19600,20117	-1,11E-04	-2,11E-04	9,95E-05	6,63E-04
300,01813	22400,36133	-1,29E-04	-2,41E-04	1,12E-04	7,47E-04
300,01689	25200,50977	-1,46E-04	-2,71E-04	1,25E-04	8,31E-04
300,02013	28000,51172	-1,63E-04	-3,01E-04	1,37E-04	9,16E-04
300,01622	30800,24805	-1,81E-04	-3,31E-04	1,50E-04	0,001
300,01357	33600,40625	-1,98E-04	-3,61E-04	1,63E-04	0,00109
300,00977	36400,42188	-2,15E-04	-3,91E-04	1,76E-04	0,00117
300,00854	39200,28906	-2,33E-04	-4,21E-04	1,88E-04	0,00126
300,00629	42000,40234	-2,50E-04	-4,51E-04	2,01E-04	0,00134
300,00444	44800,46484	-2,67E-04	-4,81E-04	2,14E-04	0,00143
300,00221	47600,27344	-2,84E-04	-5,11E-04	2,27E-04	0,00151
300,00276	50400,38672	-3,02E-04	-5,41E-04	2,40E-04	0,0016
300,00146	53200,39063	-3,19E-04	-5,71E-04	2,53E-04	0,00168
300,00352	56000,39453	-3,36E-04	-6,02E-04	2,65E-04	0,00177
300,00261	58800,32031	-3,53E-04	-6,32E-04	2,79E-04	0,00186
300,0011	61600,33984	-3,70E-04	-6,62E-04	2,92E-04	0,00195
300,0139	64400,32422	-3,87E-04	-6,93E-04	3,05E-04	0,00203
300,01596	67200,30469	-4,04E-04	-7,23E-04	3,18E-04	0,00212

300,0127	70000,39063	-4,22E-04	-7,53E-04	3,31E-04	0,00221
300,01089	67200,39844	-4,04E-04	-7,22E-04	3,18E-04	0,00212
300,00986	64400,44922	-3,87E-04	-6,92E-04	3,06E-04	0,00204
300,00822	61600,40625	-3,70E-04	-6,61E-04	2,92E-04	0,00195
300,00554	58800,23438	-3,52E-04	-6,31E-04	2,79E-04	0,00186
300,00426	56000,28125	-3,35E-04	-6,01E-04	2,66E-04	0,00177
300,00269	53200,47656	-3,18E-04	-5,71E-04	2,53E-04	0,00169
300,00424	50400,17969	-3,01E-04	-5,41E-04	2,40E-04	0,0016
300,00313	47600,32422	-2,84E-04	-5,11E-04	2,27E-04	0,00152
300,00214	44800,27344	-2,67E-04	-4,80E-04	2,14E-04	0,00142
300,00542	42000,44141	-2,49E-04	-4,50E-04	2,01E-04	0,00134
300,01456	39200,25391	-2,32E-04	-4,20E-04	1,88E-04	0,00125
300,01521	36400,20313	-2,14E-04	-3,90E-04	1,76E-04	0,00117
300,01262	33600,43359	-1,97E-04	-3,60E-04	1,62E-04	0,00108
300,01172	30800,20898	-1,80E-04	-3,30E-04	1,50E-04	0,001
300,00766	28000,28125	-1,63E-04	-3,00E-04	1,37E-04	9,14E-04
300,00659	25200,36523	-1,45E-04	-2,70E-04	1,25E-04	8,30E-04
300,01711	22400,28906	-1,28E-04	-2,40E-04	1,12E-04	7,46E-04
300,03003	19600,41992	-1,10E-04	-2,10E-04	9,94E-05	6,63E-04
300,02606	16800,20898	-9,31E-05	-1,80E-04	8,67E-05	5,78E-04
300,01726	14000,24316	-7,56E-05	-1,50E-04	7,40E-05	4,93E-04
300,01338	11200,29102	-5,81E-05	-1,20E-04	6,15E-05	4,10E-04
300,0097	8400,19043	-4,09E-05	-8,96E-05	4,88E-05	3,25E-04
300,00764	5600,41992	-2,39E-05	-5,97E-05	3,58E-05	2,39E-04
300,00571	5500,19141	-2,34E-05	-5,87E-05	3,54E-05	2,36E-04
300,02507	5000,31836	-2,04E-05	-5,33E-05	3,29E-05	2,19E-04
300,02553	4802,26611	-1,92E-05	-5,12E-05	3,20E-05	2,13E-04
300,02278	4608,27832	-1,80E-05	-4,89E-05	3,09E-05	2,06E-04
300,01945	4418,20947	-1,68E-05	-4,72E-05	3,04E-05	2,03E-04
300,02425	4232,36328	-1,58E-05	-4,52E-05	2,94E-05	1,96E-04
300,04266	4050,375	-1,48E-05	-4,32E-05	2,84E-05	1,89E-04
300,04289	3872,30469	-1,38E-05	-4,13E-05	2,75E-05	1,83E-04
300,03773	3698,44604	-1,28E-05	-3,94E-05	2,66E-05	1,78E-04
300,03099	3528,39575	-1,18E-05	-3,77E-05	2,58E-05	1,72E-04
300,02713	3362,26367	-1,10E-05	-3,59E-05	2,49E-05	1,66E-04
300,03865	3200,34277	-1,00E-05	-3,42E-05	2,41E-05	1,61E-04
300,05647	3042,16968	-8,98E-06	-3,25E-05	2,35E-05	1,57E-04
300,0594	2888,45166	-8,19E-06	-3,08E-05	2,26E-05	1,51E-04
300,07144	2738,26147	-7,42E-06	-2,93E-05	2,19E-05	1,46E-04
300,065	2592,5022	-6,57E-06	-2,77E-05	2,11E-05	1,41E-04
300,05681	2450,31958	-5,89E-06	-2,61E-05	2,02E-05	1,34E-04
300,04677	2311,93311	-5,08E-06	-2,48E-05	1,97E-05	1,31E-04
300,03008	2178,24609	-4,52E-06	-2,33E-05	1,88E-05	1,25E-04
300,02835	2047,96509	-3,78E-06	-2,19E-05	1,81E-05	1,21E-04
300,02422	1922,20032	-3,29E-06	-2,06E-05	1,73E-05	1,15E-04
300,02339	1800,01196	-2,68E-06	-1,92E-05	1,66E-05	1,10E-04
300,0378	1681,99841	-2,30E-06	-1,81E-05	1,58E-05	1,05E-04
300,03566	1568,15967	-1,63E-06	-1,68E-05	1,52E-05	1,01E-04

300,03105	1458,0437	-1,21E-06	-1,57E-05	1,45E-05	9,68E-05
300,02519	1352,23682	-8,56E-07	-1,47E-05	1,38E-05	9,22E-05
300,02246	1250,20166	-3,22E-07	-1,32E-05	1,29E-05	8,61E-05
300,02496	1152,34119	-2,35E-07	-1,25E-05	1,22E-05	8,16E-05
300,05301	1058,26477	3,79E-07	-1,17E-05	1,20E-05	8,03E-05
300,08885	968,1922	4,82E-07	-1,06E-05	1,11E-05	7,42E-05
300,10484	882,11115	6,35E-07	-9,79E-06	1,04E-05	6,95E-05
300,11353	800,43665	8,01E-07	-9,31E-06	1,01E-05	6,74E-05
300,12469	722,32654	1,00E-06	-8,26E-06	9,25E-06	6,17E-05
300,11458	648,25677	1,05E-06	-7,47E-06	8,52E-06	5,68E-05
300,0992	578,25183	1,15E-06	-6,60E-06	7,76E-06	5,17E-05
300,10199	512,28723	1,27E-06	-6,13E-06	7,39E-06	4,93E-05
300,11455	450,46075	1,33E-06	-5,47E-06	6,80E-06	4,54E-05
300,11543	392,34506	9,57E-07	-4,93E-06	5,88E-06	3,92E-05
300,12267	338,22092	1,12E-06	-4,58E-06	5,71E-06	3,80E-05
300,1143	288,44235	1,32E-06	-3,97E-06	5,30E-06	3,53E-05
300,10916	242,28912	7,53E-07	-3,50E-06	4,25E-06	2,84E-05
300,11696	200,21292	1,11E-06	-2,75E-06	3,86E-06	2,57E-05
300,10757	162,31137	5,38E-07	-2,34E-06	2,88E-06	1,92E-05
300,09131	128,52347	4,83E-07	-2,01E-06	2,50E-06	1,66E-05
300,07747	98,25105	5,36E-07	-1,67E-06	2,21E-06	1,47E-05
300,0733	72,17773	6,29E-07	-1,23E-06	1,86E-06	1,24E-05
300,06422	50,15699	2,66E-07	-1,00E-06	1,27E-06	8,44E-06
300,05444	32,35974	1,85E-07	-7,65E-07	9,50E-07	6,33E-06
300,05887	18,24889	4,16E-07	-6,21E-07	1,04E-06	6,91E-06
300,05276	8,26388	8,64E-08	-2,85E-07	3,71E-07	2,47E-06
300,04248	2,24602	3,15E-07	-1,32E-07	4,47E-07	2,98E-06
300,03334	0,20751	3,99E-07	1,51E-07	2,48E-07	1,65E-06
300,03441	-1,8432	4,02E-07	2,01E-07	2,01E-07	1,34E-06
300,04807	-7,86106	2,37E-07	2,37E-07	-3,73E-10	-2,49E-09
300,04669	-17,83387	6,77E-08	2,60E-07	-1,93E-07	-1,28E-06
300,05321	-31,87147	-2,59E-07	3,55E-07	-6,14E-07	-4,09E-06
300,07384	-49,77858	-4,77E-07	5,65E-07	-1,04E-06	-6,95E-06
300,0769	-71,84814	-3,90E-07	5,99E-07	-9,89E-07	-6,59E-06
300,07474	-98,09237	-4,39E-07	1,09E-06	-1,53E-06	-1,02E-05
300,07271	-128,12064	-8,68E-07	1,58E-06	-2,45E-06	-1,63E-05
300,09172	-162,04283	-1,20E-06	1,99E-06	-3,20E-06	-2,13E-05
300,09641	-200,0054	-1,25E-06	2,57E-06	-3,82E-06	-2,54E-05
300,09357	-241,89851	-1,14E-06	3,21E-06	-4,35E-06	-2,90E-05
300,10318	-287,94186	-8,18E-07	3,62E-06	-4,44E-06	-2,96E-05
300,09679	-338,12326	-1,51E-06	4,63E-06	-6,14E-06	-4,09E-05
300,09355	-392,08871	-1,24E-06	5,03E-06	-6,27E-06	-4,18E-05
300,09247	-450,3143	-1,11E-06	5,79E-06	-6,90E-06	-4,60E-05
300,08821	-512,01874	-1,31E-06	6,39E-06	-7,70E-06	-5,14E-05
300,10716	-578,1908	-1,27E-06	6,93E-06	-8,20E-06	-5,46E-05
300,13155	-648,15912	-1,02E-06	7,88E-06	-8,89E-06	-5,93E-05
300,14227	-722,00916	-8,45E-07	8,62E-06	-9,47E-06	-6,31E-05
300,1284	-800,32684	-5,81E-07	9,45E-06	-1,00E-05	-6,69E-05

300,11072	-882,2088	-4,39E-07	1,01E-05	-1,05E-05	-7,03E-05
300,09421	-968,05792	2,46E-05	1,10E-05	1,36E-05	9,05E-05
300,08755	-1058,17944	1,86E-07	1,16E-05	-1,14E-05	-7,61E-05
300,07727	-1152,04822	2,15E-07	1,29E-05	-1,27E-05	-8,46E-05
300,06946	-1249,95752	7,54E-07	1,40E-05	-1,33E-05	-8,83E-05
300,05963	-1352,17578	1,18E-06	1,54E-05	-1,42E-05	-9,49E-05
300,05429	-1458,05591	2,54E-06	1,63E-05	-1,38E-05	-9,20E-05
300,06226	-1568,19629	2,10E-06	1,73E-05	-1,52E-05	-1,02E-04
300,05641	-1682,12048	2,17E-06	1,88E-05	-1,66E-05	-1,11E-04
300,05374	-1799,76794	3,09E-06	2,01E-05	-1,70E-05	-1,13E-04
300,06712	-1921,84631	4,35E-06	2,14E-05	-1,70E-05	-1,14E-04
300,0665	-2047,6355	4,37E-06	2,29E-05	-1,86E-05	-1,24E-04
300,06178	-2178,02661	4,68E-06	2,41E-05	-1,94E-05	-1,30E-04
300,06929	-2311,62793	5,80E-06	2,55E-05	-1,97E-05	-1,32E-04
300,06224	-2449,45288	6,03E-06	2,74E-05	-2,13E-05	-1,42E-04
300,05588	-2591,73315	7,12E-06	2,83E-05	-2,12E-05	-1,41E-04
300,04733	-2737,65088	7,95E-06	2,98E-05	-2,19E-05	-1,46E-04
300,03818	-2887,89014	8,93E-06	3,15E-05	-2,26E-05	-1,50E-04
300,03531	-3041,75439	9,65E-06	3,32E-05	-2,35E-05	-1,57E-04
300,03998	-3199,97681	1,06E-05	3,43E-05	-2,38E-05	-1,58E-04
300,03639	-3361,82446	1,13E-05	3,66E-05	-2,53E-05	-1,68E-04
300,03786	-3527,7854	1,21E-05	3,83E-05	-2,62E-05	-1,75E-04
300,05566	-3698,3606	1,29E-05	4,05E-05	-2,76E-05	-1,84E-04
300,0551	-3872,19507	1,42E-05	4,20E-05	-2,78E-05	-1,86E-04
300,04993	-4050,22852	1,53E-05	4,40E-05	-2,87E-05	-1,91E-04
300,04782	-4232,41211	1,64E-05	4,58E-05	-2,95E-05	-1,96E-04
300,04918	-4418,08691	1,74E-05	4,79E-05	-3,04E-05	-2,03E-04
300,04347	-4608,44922	1,85E-05	4,99E-05	-3,13E-05	-2,09E-04
300,03615	-4802,29053	1,97E-05	5,20E-05	-3,23E-05	-2,15E-04
300,02931	-5000,45264	2,09E-05	5,41E-05	-3,32E-05	-2,22E-04
300,02689	-5499,55664	2,38E-05	5,94E-05	-3,57E-05	-2,38E-04
300,03084	-5600,12695	2,42E-05	6,02E-05	-3,61E-05	-2,41E-04
300,03099	-8400,39746	4,15E-05	9,05E-05	-4,90E-05	-3,27E-04
300,04982	-11200,2666	5,90E-05	1,20E-04	-6,15E-05	-4,10E-04
300,04733	-14000,31738	7,62E-05	1,51E-04	-7,43E-05	-4,96E-04
300,03838	-16800,29492	9,37E-05	1,81E-04	-8,68E-05	-5,79E-04
300,02827	-19600,16406	1,11E-04	2,11E-04	-9,95E-05	-6,63E-04
300,02182	-22400,33789	1,28E-04	2,41E-04	-1,12E-04	-7,48E-04
300,01793	-25200,4375	1,46E-04	2,71E-04	-1,25E-04	-8,32E-04
300,01384	-28000,24414	1,63E-04	3,01E-04	-1,38E-04	-9,17E-04
300,0182	-30800,38086	1,81E-04	3,31E-04	-1,50E-04	-0,001
300,03474	-33600,26172	1,98E-04	3,61E-04	-1,63E-04	-0,00109
300,03632	-36400,38672	2,15E-04	3,91E-04	-1,75E-04	-0,00117
300,0453	-39200,31641	2,33E-04	4,21E-04	-1,88E-04	-0,00126
300,0416	-42000,18359	2,50E-04	4,51E-04	-2,01E-04	-0,00134
300,0323	-44800,19922	2,67E-04	4,81E-04	-2,14E-04	-0,00143
300,02415	-47600,29688	2,84E-04	5,11E-04	-2,27E-04	-0,00151
300,0312	-50400,33984	3,02E-04	5,41E-04	-2,40E-04	-0,0016

300,02602	-53200,39063	3,19E-04	5,71E-04	-2,53E-04	-0,00168
300,02084	-56000,17969	3,36E-04	6,02E-04	-2,66E-04	-0,00177
300,01587	-58800,35938	3,53E-04	6,32E-04	-2,79E-04	-0,00186
300,01581	-61600,41797	3,70E-04	6,62E-04	-2,92E-04	-0,00194
300,02052	-64400,35938	3,87E-04	6,92E-04	-3,05E-04	-0,00203
300,01816	-67200,375	4,04E-04	7,23E-04	-3,18E-04	-0,00212
300,01659	-70000,44531	4,21E-04	7,53E-04	-3,31E-04	-0,00221
300,02524	-67200,36719	4,04E-04	7,22E-04	-3,18E-04	-0,00212
300,02017	-64400,24219	3,87E-04	6,92E-04	-3,05E-04	-0,00203
300,01772	-61600,34375	3,70E-04	6,61E-04	-2,92E-04	-0,00195
300,01401	-58800,21094	3,52E-04	6,31E-04	-2,79E-04	-0,00186
300,00977	-56000,47656	3,35E-04	6,02E-04	-2,66E-04	-0,00178
300,0078	-53200,36328	3,18E-04	5,71E-04	-2,53E-04	-0,00169
300,02069	-50400,48438	3,01E-04	5,41E-04	-2,39E-04	-0,0016
300,0222	-47600,38672	2,84E-04	5,10E-04	-2,27E-04	-0,00151
300,01846	-44800,35547	2,66E-04	4,80E-04	-2,14E-04	-0,00143
300,0132	-42000,39063	2,49E-04	4,50E-04	-2,01E-04	-0,00134
300,00977	-39200,25391	2,32E-04	4,20E-04	-1,88E-04	-0,00125
300,00648	-36400,23828	2,15E-04	3,90E-04	-1,76E-04	-0,00117
300,00902	-33600,30859	1,97E-04	3,60E-04	-1,63E-04	-0,00109
300,00797	-30800,27148	1,80E-04	3,30E-04	-1,50E-04	-1,00E-03
300,00481	-28000,26953	1,62E-04	3,00E-04	-1,37E-04	-9,16E-04
300,00797	-25200,48633	1,45E-04	2,70E-04	-1,24E-04	-8,29E-04
300,00511	-22400,21484	1,28E-04	2,40E-04	-1,12E-04	-7,47E-04
300,00601	-19600,39648	1,10E-04	2,10E-04	-9,96E-05	-6,64E-04
300,0033	-16800,33203	9,31E-05	1,80E-04	-8,67E-05	-5,78E-04
300,00296	-14000,36719	7,56E-05	1,50E-04	-7,41E-05	-4,94E-04
300,00377	-11200,27832	5,82E-05	1,20E-04	-6,15E-05	-4,10E-04
300,00191	-8400,38574	4,09E-05	8,96E-05	-4,86E-05	-3,24E-04
300,00342	-5600,22461	2,38E-05	5,97E-05	-3,60E-05	-2,40E-04
300,0049	-5500,43555	2,34E-05	5,86E-05	-3,52E-05	-2,35E-04
300,00523	-5000,30615	2,03E-05	5,32E-05	-3,29E-05	-2,20E-04
300,00488	-4802,09473	1,91E-05	5,12E-05	-3,22E-05	-2,14E-04
300,00482	-4608,33936	1,80E-05	4,91E-05	-3,11E-05	-2,08E-04
300,00423	-4418,27051	1,69E-05	4,70E-05	-3,01E-05	-2,01E-04
300,00204	-4232,29053	1,59E-05	4,51E-05	-2,92E-05	-1,95E-04
300,00015	-4050,20435	1,48E-05	4,31E-05	-2,83E-05	-1,89E-04
300,00046	-3872,2439	1,39E-05	4,12E-05	-2,74E-05	-1,82E-04
300,00032	-3698,21411	1,27E-05	3,94E-05	-2,67E-05	-1,78E-04
300,00027	-3528,4812	1,17E-05	3,76E-05	-2,59E-05	-1,73E-04
300,00052	-3362,39795	1,09E-05	3,58E-05	-2,50E-05	-1,66E-04
300,00034	-3200,40405	9,92E-06	3,41E-05	-2,42E-05	-1,61E-04
300,0027	-3042,36475	9,09E-06	3,24E-05	-2,33E-05	-1,55E-04
300,02534	-2888,21973	8,23E-06	3,09E-05	-2,26E-05	-1,51E-04
300,05104	-2738,42017	7,44E-06	2,92E-05	-2,18E-05	-1,45E-04
300,05124	-2592,24585	7,48E-06	2,77E-05	-2,02E-05	-1,35E-04
300,04536	-2450,46606	6,01E-06	2,62E-05	-2,02E-05	-1,34E-04
300,03702	-2312,18945	5,23E-06	2,47E-05	-1,95E-05	-1,30E-04

300,03113	-2178,31934	4,52E-06	2,33E-05	-1,88E-05	-1,25E-04
300,02492	-2048,31909	4,03E-06	2,19E-05	-1,79E-05	-1,19E-04
300,02267	-1922,26123	3,27E-06	2,06E-05	-1,73E-05	-1,16E-04
300,02995	-1800,3783	2,71E-06	1,91E-05	-1,64E-05	-1,10E-04
300,02785	-1682,43799	2,19E-06	1,79E-05	-1,58E-05	-1,05E-04
300,02336	-1568,47693	1,71E-06	1,68E-05	-1,51E-05	-1,01E-04
300,02081	-1458,40991	1,25E-06	1,56E-05	-1,43E-05	-9,53E-05
300,01735	-1352,28564	8,02E-07	1,44E-05	-1,35E-05	-9,03E-05
300,01772	-1250,25049	4,71E-07	1,36E-05	-1,31E-05	-8,74E-05
300,02304	-1152,35352	4,57E-08	1,27E-05	-1,27E-05	-8,44E-05
300,03371	-1058,33801	-1,83E-07	1,17E-05	-1,19E-05	-7,90E-05
300,04553	-968,302	-5,42E-07	1,06E-05	-1,11E-05	-7,43E-05
300,04507	-882,28198	-7,93E-07	9,69E-06	-1,05E-05	-6,99E-05
300,0461	-800,43665	-8,79E-07	9,00E-06	-9,88E-06	-6,59E-05
300,05603	-722,28992	-1,09E-06	8,41E-06	-9,49E-06	-6,33E-05
300,05328	-648,50092	-1,68E-06	7,24E-06	-8,91E-06	-5,94E-05
300,04475	-578,30066	-1,20E-06	6,72E-06	-7,92E-06	-5,28E-05
300,03886	-512,04315	-1,42E-06	6,14E-06	-7,56E-06	-5,04E-05
300,03731	-450,24103	-1,30E-06	5,59E-06	-6,89E-06	-4,59E-05
300,03848	-392,10092	-1,40E-06	4,75E-06	-6,15E-06	-4,10E-05
300,04636	-338,26978	-1,24E-06	4,16E-06	-5,40E-06	-3,60E-05
300,05731	-288,14938	-9,48E-07	3,70E-06	-4,65E-06	-3,10E-05
300,07654	-241,98398	-1,13E-06	3,34E-06	-4,47E-06	-2,98E-05
300,09482	-200,06644	-1,23E-06	2,61E-06	-3,84E-06	-2,56E-05
300,08923	-161,94518	-7,61E-07	2,33E-06	-3,10E-06	-2,06E-05
300,08464	-128,0352	-6,94E-07	1,91E-06	-2,61E-06	-1,74E-05
300,08394	-98,01913	-3,36E-07	1,61E-06	-1,95E-06	-1,30E-05
300,08104	-71,90918	-6,65E-07	1,32E-06	-1,98E-06	-1,32E-05
300,08955	-49,87624	-3,76E-07	1,10E-06	-1,48E-06	-9,85E-06
300,07895	-31,93251	-3,50E-07	6,11E-07	-9,61E-07	-6,41E-06
300,06625	-17,95593	-8,21E-08	4,35E-07	-5,17E-07	-3,45E-06
300,05385	-7,78782	-3,24E-07	2,36E-07	-5,60E-07	-3,73E-06
300,04189	-1,96527	-3,57E-07	5,23E-08	-4,09E-07	-2,73E-06
300,0338	-0,08545	-3,55E-07	-1,83E-07	-1,71E-07	-1,14E-06
300,02756	2,13616	-3,42E-07	-1,95E-07	-1,47E-07	-9,83E-07
300,02644	8,23947	-3,38E-07	-2,77E-07	-6,16E-08	-4,10E-07
300,02696	18,18786	-2,04E-08	-3,65E-07	3,44E-07	2,30E-06
300,02403	32,16444	1,46E-07	-3,42E-07	4,88E-07	3,25E-06
300,0228	50,10816	4,34E-07	-5,41E-07	9,75E-07	6,50E-06
300,0322	72,14111	7,19E-07	-8,40E-07	1,56E-06	1,04E-05
300,03189	98,1412	5,35E-07	-1,09E-06	1,62E-06	1,08E-05
300,02861	128,07181	6,47E-07	-1,63E-06	2,27E-06	1,52E-05
300,02312	162,21371	9,09E-07	-1,97E-06	2,87E-06	1,92E-05
300,0247	200,1763	1,01E-06	-2,60E-06	3,61E-06	2,41E-05
300,03668	242,19147	1,35E-06	-3,29E-06	4,64E-06	3,10E-05
300,05095	288,12497	1,13E-06	-3,59E-06	4,72E-06	3,15E-05
300,06522	338,0134	1,06E-06	-4,28E-06	5,34E-06	3,56E-05
300,07047	391,95447	1,41E-06	-4,63E-06	6,04E-06	4,03E-05

300,09503	450,04578	1,24E-06	-5,25E-06	6,49E-06	4,33E-05
300,11723	511,93329	1,01E-06	-6,08E-06	7,09E-06	4,73E-05
300,11937	578,10535	1,41E-06	-7,31E-06	8,72E-06	5,82E-05
300,12852	648,01263	9,46E-07	-7,73E-06	8,67E-06	5,78E-05
300,12424	721,94812	9,02E-07	-8,50E-06	9,40E-06	6,27E-05
300,116	799,65546	8,84E-07	-9,55E-06	1,04E-05	6,95E-05
300,10146	882,01349	4,41E-07	-1,02E-05	1,07E-05	7,11E-05
300,08188	968,0213	4,28E-07	-1,15E-05	1,19E-05	7,96E-05
300,06625	1058,09399	-2,40E-07	-1,25E-05	1,23E-05	8,18E-05
300,05539	1152,0116	-6,08E-08	-1,31E-05	1,31E-05	8,72E-05
300,04472	1249,94531	-7,16E-07	-1,45E-05	1,38E-05	9,17E-05
300,03752	1352,0658	-7,15E-07	-1,51E-05	1,44E-05	9,61E-05
300,02953	1457,89722	-1,71E-06	-1,64E-05	1,47E-05	9,83E-05
300,02103	1568,18408	-2,11E-06	-1,76E-05	1,54E-05	1,03E-04
300,01945	1682,09607	-2,51E-06	-1,88E-05	1,63E-05	1,09E-04
300,02271	1799,6947	-3,02E-06	-2,01E-05	1,71E-05	1,14E-04
300,02438	1922,06604	-3,74E-06	-2,14E-05	1,77E-05	1,18E-04
300,03987	2047,85522	-4,66E-06	-2,24E-05	1,77E-05	1,18E-04
300,04213	2178,27051	-5,00E-06	-2,40E-05	1,90E-05	1,27E-04
300,03844	2311,83545	-5,89E-06	-2,55E-05	1,96E-05	1,31E-04
300,03264	2449,91675	-6,36E-06	-2,70E-05	2,06E-05	1,37E-04
300,0262	2592,02612	-6,88E-06	-2,83E-05	2,14E-05	1,43E-04
300,02324	2737,91968	-7,90E-06	-3,00E-05	2,21E-05	1,47E-04
300,02002	2888,20752	-8,83E-06	-3,12E-05	2,23E-05	1,49E-04
300,01544	3041,98633	-9,57E-06	-3,32E-05	2,36E-05	1,58E-04
300,01251	3200,19653	-1,05E-05	-3,50E-05	2,45E-05	1,63E-04
300,01131	3362,01953	-1,15E-05	-3,66E-05	2,51E-05	1,68E-04
300,00819	3528,15161	-1,22E-05	-3,85E-05	2,63E-05	1,75E-04
300,00522	3698,42188	-1,32E-05	-4,01E-05	2,69E-05	1,80E-04
300,00557	3872,28052	-1,42E-05	-4,22E-05	2,80E-05	1,86E-04
300,00584	4050,19189	-1,54E-05	-4,39E-05	2,85E-05	1,90E-04
300,01158	4232,36328	-1,63E-05	-4,60E-05	2,97E-05	1,98E-04
300,01282	4418,29443	-1,74E-05	-4,80E-05	3,06E-05	2,04E-04
300,00964	4608,4248	-1,85E-05	-4,99E-05	3,14E-05	2,10E-04
300,0096	4802,30273	-1,98E-05	-5,20E-05	3,22E-05	2,15E-04
300,00819	5000,47705	-2,10E-05	-5,42E-05	3,31E-05	2,21E-04
300,01711	5500,49658	-2,39E-05	-5,95E-05	3,55E-05	2,37E-04
300,0238	5600,22461	-2,43E-05	-6,03E-05	3,60E-05	2,40E-04
300,02415	8400,39746	-4,16E-05	-9,05E-05	4,89E-05	3,26E-04
300,01958	11200,31445	-5,90E-05	-1,21E-04	6,16E-05	4,10E-04
300,01451	14000,43848	-7,64E-05	-1,51E-04	7,41E-05	4,94E-04
300,01099	16800,42969	-9,37E-05	-1,81E-04	8,69E-05	5,80E-04
300,0079	19600,45703	-1,11E-04	-2,10E-04	9,93E-05	6,62E-04
300,00787	22400,41016	-1,29E-04	-2,41E-04	1,12E-04	7,47E-04
300,00624	25200,52344	-1,46E-04	-2,71E-04	1,24E-04	8,30E-04
300,00407	28000,46484	-1,63E-04	-3,01E-04	1,37E-04	9,16E-04
300,00261	30800,22266	-1,81E-04	-3,31E-04	1,50E-04	0,001
300,00101	33600,35938	-1,98E-04	-3,61E-04	1,63E-04	0,00109

300,00082	36400,48438	-2,15E-04	-3,91E-04	1,76E-04	0,00117
300,00165	39200,42578	-2,33E-04	-4,21E-04	1,88E-04	0,00125
300,00542	42000,18359	-2,50E-04	-4,51E-04	2,00E-04	0,00134
300,01387	44800,24609	-2,67E-04	-4,81E-04	2,14E-04	0,00143
300,01414	47600,52734	-2,85E-04	-5,12E-04	2,27E-04	0,00151
300,01443	50400,35938	-3,02E-04	-5,41E-04	2,39E-04	0,00159
300,01285	53200,23828	-3,19E-04	-5,72E-04	2,53E-04	0,00169
300,01199	56000,24219	-3,36E-04	-6,02E-04	2,65E-04	0,00177
300,02034	58800,34766	-3,54E-04	-6,32E-04	2,78E-04	0,00185
300,021	61600,37109	-3,73E-04	-6,63E-04	2,89E-04	0,00193
300,01906	64400,34766	-3,88E-04	-6,92E-04	3,04E-04	0,00203
300,03435	67200,26563	-4,05E-04	-7,23E-04	3,18E-04	0,00212
300,04916	70000,38281	-4,22E-04	-7,53E-04	3,31E-04	0,00221

Tabela 15: Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO₂ dopado com 3% de Fe.

Temperatura (K)	H (Oe)	M _{SnO₂-Fe3%} (e.m.u.)	M _{vidro}	(M _{SnO₂-Fe3%})-(M _{vidro})=M _{final}	M _{final} /Área
300,00542	0,29296	3,10E-08	-8,95E-08	1,20E-07	1,10E-06
300,00685	1,98968	-9,45E-08	-7,86E-08	-1,58E-08	-1,44E-07
300,00142	8,06857	-3,80E-08	-7,02E-08	3,22E-08	2,93E-07
300,00404	18,06579	-1,13E-07	-8,51E-08	-2,82E-08	-2,56E-07
300,00536	32,00575	-1,42E-07	-2,64E-07	1,22E-07	1,11E-06
300,02567	49,87624	-2,28E-07	-4,49E-07	2,21E-07	2,01E-06
300,04544	71,90918	-3,55E-07	-6,56E-07	3,01E-07	2,74E-06
300,0446	97,90927	-5,55E-07	-9,53E-07	3,98E-07	3,62E-06
300,04507	127,91314	-6,60E-07	-1,25E-06	5,90E-07	5,36E-06
300,05017	161,88416	-8,51E-07	-1,57E-06	7,19E-07	6,54E-06
300,05965	199,99321	-9,37E-07	-1,93E-06	9,98E-07	9,07E-06
300,07643	241,95955	-1,24E-06	-2,27E-06	1,02E-06	9,31E-06
300,09175	287,99072	-1,32E-06	-2,69E-06	1,37E-06	1,24E-05
300,09532	337,81812	-1,75E-06	-3,16E-06	1,41E-06	1,28E-05
300,09784	391,72253	-2,00E-06	-3,68E-06	1,68E-06	1,53E-05
300,0894	449,83826	-2,36E-06	-4,30E-06	1,94E-06	1,76E-05
300,07538	511,68915	-2,71E-06	-4,89E-06	2,18E-06	1,98E-05
300,06331	577,78796	-3,12E-06	-5,00E-06	1,88E-06	1,71E-05
300,05064	647,79291	-3,65E-06	-6,19E-06	2,54E-06	2,31E-05
300,03804	721,71619	-4,09E-06	-6,94E-06	2,86E-06	2,60E-05
300,02969	799,8996	-4,52E-06	-7,78E-06	3,25E-06	2,96E-05
300,02283	881,81818	-5,25E-06	-8,49E-06	3,24E-06	2,94E-05
300,0184	967,54529	-5,75E-06	-9,36E-06	3,61E-06	3,28E-05
300,01472	1057,54456	-6,40E-06	-1,02E-05	3,77E-06	3,43E-05
300,01237	1151,77966	-7,39E-06	-1,13E-05	3,88E-06	3,53E-05
300,0141	1249,66455	-7,85E-06	-1,21E-05	4,23E-06	3,84E-05
300,02942	1351,62634	-8,67E-06	-1,29E-05	4,28E-06	3,89E-05

300,03012	1457,67749	-9,57E-06	-1,43E-05	4,75E-06	4,32E-05
300,02954	1567,61023	-1,05E-05	-1,54E-05	4,94E-06	4,49E-05
300,02296	1681,49792	-1,13E-05	-1,66E-05	5,30E-06	4,82E-05
300,02248	1799,79236	-1,23E-05	-1,79E-05	5,62E-06	5,11E-05
300,03249	1921,651	-1,33E-05	-1,93E-05	6,06E-06	5,51E-05
300,02959	2047,58667	-1,43E-05	-2,05E-05	6,18E-06	5,62E-05
300,02701	2177,51392	-1,53E-05	-2,20E-05	6,66E-06	6,06E-05
300,02238	2311,70142	-1,65E-05	-2,34E-05	6,97E-06	6,34E-05
300,01932	2449,64819	-1,76E-05	-2,48E-05	7,21E-06	6,56E-05
300,01561	2591,73315	-1,87E-05	-2,64E-05	7,73E-06	7,03E-05
300,01326	2737,65088	-2,00E-05	-2,80E-05	8,04E-06	7,31E-05
300,01393	2887,63379	-2,13E-05	-2,97E-05	8,45E-06	7,68E-05
300,02676	3041,80322	-2,25E-05	-3,14E-05	8,87E-06	8,07E-05
300,02843	3199,63477	-2,37E-05	-3,29E-05	9,26E-06	8,42E-05
300,0271	3361,7876	-2,49E-05	-3,48E-05	9,86E-06	8,97E-05
300,0244	3527,72437	-2,64E-05	-3,64E-05	1,00E-05	9,09E-05
300,02	3698,16528	-2,78E-05	-3,82E-05	1,04E-05	9,45E-05
300,01785	3871,98755	-2,93E-05	-4,01E-05	1,08E-05	9,84E-05
300,0157	4050,15552	-3,05E-05	-4,20E-05	1,15E-05	1,05E-04
300,02492	4231,96094	-3,20E-05	-4,39E-05	1,20E-05	1,09E-04
300,02483	4417,95264	-3,33E-05	-4,60E-05	1,27E-05	1,15E-04
300,02484	4608,26611	-3,50E-05	-4,79E-05	1,30E-05	1,18E-04
300,02086	4802,08301	-3,65E-05	-5,01E-05	1,36E-05	1,24E-04
300,02473	5000,34277	-3,81E-05	-5,21E-05	1,40E-05	1,27E-04
300,02121	5499,50781	-4,21E-05	-5,74E-05	1,53E-05	1,39E-04
300,02103	5600,22461	-4,27E-05	-5,82E-05	1,55E-05	1,41E-04
300,01498	8400,16602	-6,53E-05	-9,05E-05	2,52E-05	2,29E-04
300,0114	11200,29102	-8,77E-05	-1,21E-04	3,28E-05	2,98E-04
300,00861	14000,18262	-1,10E-04	-1,51E-04	4,02E-05	3,66E-04
300,00578	16800,36914	-1,32E-04	-1,81E-04	4,82E-05	4,38E-04
300,00894	19600,25	-1,55E-04	-2,11E-04	5,55E-05	5,04E-04
300,02454	22400,43359	-1,77E-04	-2,41E-04	6,31E-05	5,74E-04
300,02473	25200,36523	-2,00E-04	-2,71E-04	7,04E-05	6,40E-04
300,0215	28000,42773	-2,22E-04	-3,01E-04	7,83E-05	7,11E-04
300,01773	30800,19727	-2,45E-04	-3,31E-04	8,61E-05	7,83E-04
300,01241	33600,37109	-2,67E-04	-3,61E-04	9,40E-05	8,55E-04
300,01172	36400,48438	-2,89E-04	-3,91E-04	1,02E-04	9,27E-04
300,01147	39200,25391	-3,11E-04	-4,21E-04	1,09E-04	9,94E-04
300,02541	42000,16016	-3,34E-04	-4,51E-04	1,17E-04	0,00106
300,02304	44800,26172	-3,57E-04	-4,81E-04	1,24E-04	0,00113
300,02441	47600,28516	-3,79E-04	-5,11E-04	1,32E-04	0,0012
300,04018	50400,3125	-4,00E-04	-5,41E-04	1,41E-04	0,00128
300,03606	53200,23438	-4,24E-04	-5,71E-04	1,47E-04	0,00134
300,02751	56000,32031	-4,46E-04	-6,02E-04	1,55E-04	0,00141
300,02672	58800,27344	-4,67E-04	-6,32E-04	1,64E-04	0,00149
300,03789	61600,45703	-4,90E-04	-6,62E-04	1,72E-04	0,00156
300,03455	64400,33594	-5,14E-04	-6,93E-04	1,79E-04	0,00163
300,02884	67200,33594	-5,37E-04	-7,23E-04	1,86E-04	0,00169

300,02222	70000,45313	-5,59E-04	-7,53E-04	1,94E-04	0,00176
300,01651	67200,41406	-5,37E-04	-7,22E-04	1,85E-04	0,00168
300,01192	64400,35938	-5,14E-04	-6,92E-04	1,78E-04	0,00162
300,00833	61600,44531	-4,90E-04	-6,61E-04	1,71E-04	0,00155
300,02098	58800,42969	-4,70E-04	-6,31E-04	1,61E-04	0,00147
300,03751	56000,40625	-4,48E-04	-6,01E-04	1,53E-04	0,00139
300,03499	53200,33984	-4,24E-04	-5,71E-04	1,48E-04	0,00134
300,0441	50400,27734	-4,03E-04	-5,41E-04	1,38E-04	0,00126
300,05966	47600,29688	-3,79E-04	-5,11E-04	1,32E-04	0,0012
300,06375	44800,18359	-3,56E-04	-4,80E-04	1,24E-04	0,00113
300,06416	42000,23438	-3,33E-04	-4,50E-04	1,17E-04	0,00106
300,05023	39200,39063	-3,06E-04	-4,20E-04	1,14E-04	0,00103
300,03761	36400,17969	-2,89E-04	-3,90E-04	1,01E-04	9,22E-04
300,04979	33600,40625	-2,66E-04	-3,60E-04	9,34E-05	8,49E-04
300,05798	30800,39453	-2,44E-04	-3,30E-04	8,60E-05	7,82E-04
300,05028	28000,37695	-2,21E-04	-3,00E-04	7,84E-05	7,13E-04
300,0377	25200,21875	-1,99E-04	-2,70E-04	7,03E-05	6,39E-04
300,02838	22400,44727	-1,77E-04	-2,40E-04	6,32E-05	5,74E-04
300,02553	19600,4082	-1,55E-04	-2,10E-04	5,51E-05	5,01E-04
300,03503	16800,24805	-1,32E-04	-1,80E-04	4,77E-05	4,34E-04
300,03043	14000,24316	-1,10E-04	-1,50E-04	4,01E-05	3,64E-04
300,02319	11200,2168	-8,69E-05	-1,20E-04	3,27E-05	2,97E-04
300,01888	8400,42285	-6,47E-05	-8,96E-05	2,49E-05	2,26E-04
300,02338	5600,44434	-4,23E-05	-5,97E-05	1,74E-05	1,58E-04
300,04626	5500,19141	-4,16E-05	-5,87E-05	1,71E-05	1,56E-04
300,07346	5000,23291	-3,75E-05	-5,33E-05	1,58E-05	1,44E-04
300,06863	4802,42432	-3,60E-05	-5,12E-05	1,52E-05	1,38E-04
300,05673	4608,4126	-3,43E-05	-4,89E-05	1,46E-05	1,33E-04
300,03799	4418,35596	-3,28E-05	-4,72E-05	1,45E-05	1,31E-04
300,02586	4232,27832	-3,15E-05	-4,52E-05	1,37E-05	1,24E-04
300,02095	4049,83789	-3,01E-05	-4,32E-05	1,32E-05	1,20E-04
300,02231	3872,09741	-2,85E-05	-4,13E-05	1,28E-05	1,17E-04
300,03423	3698,42188	-2,70E-05	-3,94E-05	1,24E-05	1,13E-04
300,02917	3527,76074	-2,59E-05	-3,77E-05	1,18E-05	1,07E-04
300,02173	3361,89746	-2,44E-05	-3,59E-05	1,15E-05	1,05E-04
300,0159	3199,65918	-2,32E-05	-3,42E-05	1,10E-05	9,97E-05
300,00996	3041,97437	-2,20E-05	-3,25E-05	1,05E-05	9,59E-05
300,00826	2888,07324	-2,06E-05	-3,08E-05	1,02E-05	9,23E-05
300,00555	2737,99292	-1,95E-05	-2,93E-05	9,82E-06	8,93E-05
300,00664	2592,06274	-1,82E-05	-2,77E-05	9,44E-06	8,58E-05
300,00455	2449,94116	-1,71E-05	-2,61E-05	8,93E-06	8,12E-05
300,00574	2311,73779	-1,61E-05	-2,48E-05	8,64E-06	7,85E-05
300,00534	2177,95337	-1,51E-05	-2,33E-05	8,13E-06	7,40E-05
300,00821	2047,92847	-1,40E-05	-2,19E-05	7,96E-06	7,23E-05
300,00716	1922,05383	-1,27E-05	-2,06E-05	7,85E-06	7,14E-05
300,00871	1799,75586	-1,20E-05	-1,92E-05	7,22E-06	6,57E-05
300,01062	1681,77881	-1,10E-05	-1,81E-05	7,11E-06	6,47E-05
300,01071	1568,0741	-1,02E-05	-1,68E-05	6,61E-06	6,00E-05

300,02782	1458,00708	-9,32E-06	-1,57E-05	6,41E-06	5,83E-05
300,0321	1351,99255	-8,56E-06	-1,47E-05	6,13E-06	5,57E-05
300,03038	1249,99414	-7,80E-06	-1,32E-05	5,44E-06	4,94E-05
300,02991	1151,93848	-7,12E-06	-1,25E-05	5,35E-06	4,87E-05
300,02663	1058,05737	-6,44E-06	-1,17E-05	5,22E-06	4,74E-05
300,02318	967,93591	-5,71E-06	-1,06E-05	4,94E-06	4,49E-05
300,02321	881,90356	-5,06E-06	-9,79E-06	4,73E-06	4,30E-05
300,03258	799,76532	-4,70E-06	-9,31E-06	4,60E-06	4,19E-05
300,03714	721,87488	-4,00E-06	-8,26E-06	4,25E-06	3,87E-05
300,03392	647,81732	-3,69E-06	-7,47E-06	3,77E-06	3,43E-05
300,02998	577,64148	-3,06E-06	-6,60E-06	3,55E-06	3,22E-05
300,02524	511,7746	-2,29E-06	-6,13E-06	3,83E-06	3,48E-05
300,02034	449,65512	-2,49E-06	-5,47E-06	2,98E-06	2,71E-05
300,02267	391,72253	-1,86E-06	-4,93E-06	3,07E-06	2,79E-05
300,04819	337,95239	-1,79E-06	-4,58E-06	2,80E-06	2,54E-05
300,07608	287,771	-1,36E-06	-3,97E-06	2,62E-06	2,38E-05
300,07486	241,95955	-1,49E-06	-3,50E-06	2,01E-06	1,83E-05
300,06364	199,981	-9,42E-07	-2,75E-06	1,81E-06	1,65E-05
300,05797	162,11607	-1,04E-06	-2,34E-06	1,30E-06	1,18E-05
300,07472	128,15727	-5,63E-07	-2,01E-06	1,45E-06	1,32E-05
300,07082	97,98251	-8,28E-07	-1,67E-06	8,42E-07	7,65E-06
300,06148	71,93359	-3,71E-07	-1,23E-06	8,56E-07	7,78E-06
300,05673	49,60769	-4,79E-07	-1,00E-06	5,21E-07	4,73E-06
300,06606	31,52969	-3,78E-07	-7,65E-07	3,87E-07	3,52E-06
300,06845	17,5287	-3,42E-07	-6,21E-07	2,80E-07	2,54E-06
300,0844	7,67796	-9,64E-08	-2,85E-07	1,88E-07	1,71E-06
300,07666	1,68451	1,45E-08	-1,32E-07	1,47E-07	1,34E-06
300,06783	0,39061	3,21E-08	1,51E-07	-1,19E-07	-1,08E-06
300,05923	-2,03851	1,57E-07	2,01E-07	-4,42E-08	-4,02E-07
300,07614	-8,04416	1,34E-07	2,37E-07	-1,03E-07	-9,38E-07
300,07457	-18,06579	-3,70E-09	2,60E-07	-2,64E-07	-2,40E-06
300,06596	-32,01795	1,74E-07	3,55E-07	-1,81E-07	-1,65E-06
300,05656	-49,92506	-1,49E-07	5,65E-07	-7,14E-07	-6,49E-06
300,04993	-72,04345	4,52E-08	5,99E-07	-5,54E-07	-5,03E-06
300,04993	-97,89706	7,50E-08	1,09E-06	-1,02E-06	-9,26E-06
300,06071	-127,88872	3,72E-07	1,58E-06	-1,21E-06	-1,10E-05
300,05914	-161,85973	6,23E-07	1,99E-06	-1,37E-06	-1,25E-05
300,05086	-199,91997	7,42E-07	2,57E-06	-1,83E-06	-1,66E-05
300,04335	-241,86191	7,28E-07	3,21E-06	-2,48E-06	-2,25E-05
300,03664	-287,69772	9,08E-07	3,62E-06	-2,71E-06	-2,46E-05
300,03461	-338,0256	1,38E-06	4,63E-06	-3,25E-06	-2,96E-05
300,05003	-392,03992	1,50E-06	5,03E-06	-3,53E-06	-3,21E-05
300,06935	-450,27768	2,56E-06	5,79E-06	-3,23E-06	-2,94E-05
300,06784	-511,9455	2,62E-06	6,39E-06	-3,77E-06	-3,43E-05
300,06305	-578,15417	3,43E-06	6,93E-06	-3,50E-06	-3,18E-05
300,06702	-648,1347	3,48E-06	7,88E-06	-4,39E-06	-3,99E-05
300,06306	-722,02136	3,72E-06	8,62E-06	-4,90E-06	-4,46E-05
300,05647	-800,24133	4,70E-06	9,45E-06	-4,75E-06	-4,32E-05

300,05377	-882,09894	5,26E-06	1,01E-05	-4,85E-06	-4,41E-05
300,07111	-967,8382	6,55E-06	1,10E-05	-4,46E-06	-4,05E-05
300,07245	-1058,16724	6,62E-06	1,16E-05	-4,98E-06	-4,53E-05
300,06551	-1152,0116	7,28E-06	1,29E-05	-5,63E-06	-5,11E-05
300,06252	-1249,9209	8,33E-06	1,40E-05	-5,67E-06	-5,16E-05
300,05612	-1352,10242	9,13E-06	1,54E-05	-6,27E-06	-5,70E-05
300,0475	-1457,99487	9,99E-06	1,63E-05	-6,35E-06	-5,77E-05
300,03992	-1568,24512	1,08E-05	1,73E-05	-6,50E-06	-5,90E-05
300,03252	-1682,13281	1,13E-05	1,88E-05	-7,46E-06	-6,78E-05
300,02678	-1799,74353	1,26E-05	2,01E-05	-7,43E-06	-6,75E-05
300,02568	-1922,09033	1,36E-05	2,14E-05	-7,83E-06	-7,12E-05
300,04396	-2047,85522	1,39E-05	2,29E-05	-9,05E-06	-8,23E-05
300,04666	-2178,13647	1,57E-05	2,41E-05	-8,41E-06	-7,64E-05
300,05008	-2311,89648	1,69E-05	2,55E-05	-8,66E-06	-7,88E-05
300,06682	-2449,77026	1,77E-05	2,74E-05	-9,64E-06	-8,76E-05
300,06595	-2592,02612	1,97E-05	2,83E-05	-8,65E-06	-7,87E-05
300,08034	-2737,98071	2,00E-05	2,98E-05	-9,80E-06	-8,91E-05
300,09563	-2888,12207	2,15E-05	3,15E-05	-1,00E-05	-9,11E-05
300,09201	-3042,04761	2,25E-05	3,32E-05	-1,07E-05	-9,71E-05
300,09325	-3200,29419	2,35E-05	3,43E-05	-1,08E-05	-9,86E-05
300,09708	-3362,06836	2,52E-05	3,66E-05	-1,14E-05	-1,04E-04
300,08862	-3528,02954	2,65E-05	3,83E-05	-1,19E-05	-1,08E-04
300,07317	-3698,34839	2,77E-05	4,05E-05	-1,28E-05	-1,17E-04
300,06145	-3872,1709	2,92E-05	4,20E-05	-1,29E-05	-1,17E-04
300,05595	-4050,375	3,06E-05	4,40E-05	-1,34E-05	-1,22E-04
300,0471	-4232,26563	3,23E-05	4,58E-05	-1,36E-05	-1,23E-04
300,03673	-4418,49023	3,35E-05	4,79E-05	-1,43E-05	-1,30E-04
300,03024	-4608,31494	3,52E-05	4,99E-05	-1,47E-05	-1,34E-04
300,02379	-4802,31494	3,66E-05	5,20E-05	-1,53E-05	-1,40E-04
300,02298	-5000,36719	3,82E-05	5,41E-05	-1,59E-05	-1,45E-04
300,01427	-5500,31348	4,22E-05	5,94E-05	-1,73E-05	-1,57E-04
300,01338	-5600,44434	4,27E-05	6,02E-05	-1,75E-05	-1,59E-04
300,00934	-8400,28809	6,54E-05	9,05E-05	-2,51E-05	-2,28E-04
300,01399	-11200,19336	8,78E-05	1,20E-04	-3,27E-05	-2,97E-04
300,01276	-14000,3418	1,10E-04	1,51E-04	-4,01E-05	-3,65E-04
300,01028	-16800,55273	1,32E-04	1,81E-04	-4,82E-05	-4,38E-04
300,00899	-19600,29883	1,55E-04	2,11E-04	-5,55E-05	-5,05E-04
300,0081	-22400,32422	1,77E-04	2,41E-04	-6,35E-05	-5,78E-04
300,00508	-25200,41406	2,00E-04	2,71E-04	-7,10E-05	-6,46E-04
300,00475	-28000,37695	2,23E-04	3,01E-04	-7,75E-05	-7,04E-04
300,00375	-30800,23438	2,44E-04	3,31E-04	-8,68E-05	-7,89E-04
300,00203	-33600,26172	2,67E-04	3,61E-04	-9,41E-05	-8,55E-04
300,00276	-36400,30078	2,89E-04	3,91E-04	-1,02E-04	-9,30E-04
300,00311	-39200,33984	3,11E-04	4,21E-04	-1,10E-04	-9,98E-04
300,01457	-42000,29297	3,35E-04	4,51E-04	-1,16E-04	-0,00105
300,01385	-44800,17578	3,56E-04	4,81E-04	-1,25E-04	-0,00114
300,01199	-47600,40625	3,79E-04	5,11E-04	-1,32E-04	-0,0012
300,00862	-50400,38672	4,01E-04	5,41E-04	-1,40E-04	-0,00127

300,00722	-53200,46484	4,24E-04	5,71E-04	-1,47E-04	-0,00134
300,00513	-56000,36719	4,46E-04	6,02E-04	-1,55E-04	-0,00141
300,00351	-58800,24609	4,69E-04	6,32E-04	-1,63E-04	-0,00148
300,00423	-61600,3125	4,90E-04	6,62E-04	-1,72E-04	-0,00156
300,0045	-64400,26563	5,12E-04	6,92E-04	-1,81E-04	-0,00164
300,00925	-67200,19531	5,34E-04	7,23E-04	-1,89E-04	-0,00171
300,00882	-70000,46094	5,56E-04	7,53E-04	-1,97E-04	-0,00179
300,00809	-67200,25	5,36E-04	7,22E-04	-1,86E-04	-0,00169
300,01663	-64400,38672	5,11E-04	6,92E-04	-1,80E-04	-0,00164
300,01372	-61600,49609	4,89E-04	6,61E-04	-1,72E-04	-0,00156
300,01442	-58800,41406	4,66E-04	6,31E-04	-1,65E-04	-0,0015
300,01129	-56000,17578	4,44E-04	6,02E-04	-1,58E-04	-0,00144
300,01215	-53200,47656	4,25E-04	5,71E-04	-1,46E-04	-0,00133
300,0311	-50400,44922	4,00E-04	5,41E-04	-1,40E-04	-0,00128
300,03755	-47600,32422	3,78E-04	5,10E-04	-1,32E-04	-0,0012
300,03247	-44800,36719	3,56E-04	4,80E-04	-1,25E-04	-0,00113
300,04761	-42000,36719	3,33E-04	4,50E-04	-1,17E-04	-0,00106
300,03748	-39200,33984	3,11E-04	4,20E-04	-1,09E-04	-9,89E-04
300,02843	-36400,32813	2,89E-04	3,90E-04	-1,02E-04	-9,23E-04
300,01932	-33600,32422	2,67E-04	3,60E-04	-9,28E-05	-8,44E-04
300,01404	-30800,31836	2,44E-04	3,30E-04	-8,52E-05	-7,75E-04
300,00874	-28000,33203	2,22E-04	3,00E-04	-7,81E-05	-7,10E-04
300,00893	-25200,48633	1,99E-04	2,70E-04	-7,05E-05	-6,41E-04
300,02814	-22400,41016	1,77E-04	2,40E-04	-6,29E-05	-5,72E-04
300,03311	-19600,15039	1,55E-04	2,10E-04	-5,51E-05	-5,01E-04
300,05418	-16800,27148	1,32E-04	1,80E-04	-4,75E-05	-4,32E-04
300,05432	-14000,14648	1,10E-04	1,50E-04	-4,02E-05	-3,66E-04
300,07109	-11200,40039	8,69E-05	1,20E-04	-3,28E-05	-2,98E-04
300,06718	-8400,38574	6,45E-05	8,96E-05	-2,50E-05	-2,27E-04
300,08176	-5600,39551	4,22E-05	5,97E-05	-1,76E-05	-1,60E-04
300,07452	-5500,19141	4,15E-05	5,86E-05	-1,71E-05	-1,56E-04
300,11205	-5000,18408	3,75E-05	5,32E-05	-1,57E-05	-1,43E-04
300,11952	-4802,30273	3,61E-05	5,12E-05	-1,51E-05	-1,37E-04
300,10704	-4608,15625	3,43E-05	4,91E-05	-1,48E-05	-1,35E-04
300,09109	-4418,31934	3,32E-05	4,70E-05	-1,38E-05	-1,26E-04
300,07452	-4232,41211	3,14E-05	4,51E-05	-1,37E-05	-1,24E-04
300,05853	-4050,41162	3,10E-05	4,31E-05	-1,21E-05	-1,10E-04
300,04553	-3872,20703	2,85E-05	4,12E-05	-1,27E-05	-1,16E-04
300,03554	-3698,33643	2,73E-05	3,94E-05	-1,21E-05	-1,10E-04
300,03267	-3528,00537	2,57E-05	3,76E-05	-1,19E-05	-1,08E-04
300,04834	-3362,14136	2,44E-05	3,58E-05	-1,14E-05	-1,04E-04
300,04741	-3199,91577	2,31E-05	3,41E-05	-1,10E-05	-9,98E-05
300,04034	-3041,88892	2,19E-05	3,24E-05	-1,04E-05	-9,49E-05
300,0394	-2888,18311	2,06E-05	3,09E-05	-1,03E-05	-9,32E-05
300,0563	-2737,9563	1,95E-05	2,92E-05	-9,70E-06	-8,82E-05
300,05887	-2592,1604	1,82E-05	2,77E-05	-9,48E-06	-8,62E-05
300,07625	-2449,68481	1,73E-05	2,62E-05	-8,90E-06	-8,09E-05
300,07127	-2311,76221	1,61E-05	2,47E-05	-8,66E-06	-7,88E-05

300,06721	-2177,8313	1,49E-05	2,33E-05	-8,38E-06	-7,62E-05
300,08992	-2047,55005	1,39E-05	2,19E-05	-7,97E-06	-7,25E-05
300,11687	-1921,76074	1,31E-05	2,06E-05	-7,55E-06	-6,86E-05
300,10318	-1799,74353	1,20E-05	1,91E-05	-7,09E-06	-6,44E-05
300,0882	-1681,62	1,12E-05	1,79E-05	-6,77E-06	-6,15E-05
300,07469	-1567,68359	1,04E-05	1,68E-05	-6,46E-06	-5,87E-05
300,06326	-1457,65308	9,32E-06	1,56E-05	-6,23E-06	-5,67E-05
300,07039	-1351,83398	8,54E-06	1,44E-05	-5,81E-06	-5,29E-05
300,07323	-1249,77441	7,73E-06	1,36E-05	-5,85E-06	-5,32E-05
300,07866	-1151,77966	7,18E-06	1,27E-05	-5,52E-06	-5,02E-05
300,07225	-1057,95959	6,45E-06	1,17E-05	-5,23E-06	-4,75E-05
300,05989	-967,77716	5,68E-06	1,06E-05	-4,92E-06	-4,48E-05
300,04712	-882,06232	5,30E-06	9,69E-06	-4,39E-06	-3,99E-05
300,03847	-799,88739	4,45E-06	9,00E-06	-4,55E-06	-4,13E-05
300,03775	-721,76501	4,01E-06	8,41E-06	-4,40E-06	-4,00E-05
300,03592	-647,95166	3,54E-06	7,24E-06	-3,69E-06	-3,36E-05
300,04132	-578,10535	3,89E-06	6,72E-06	-2,83E-06	-2,57E-05
300,03748	-511,88446	1,43E-06	6,14E-06	-4,72E-06	-4,29E-05
300,0332	-450,1922	2,26E-06	5,59E-06	-3,33E-06	-3,03E-05
300,02913	-392,11313	2,11E-06	4,75E-06	-2,64E-06	-2,40E-05
300,02434	-338,35519	3,12E-06	4,16E-06	-1,04E-06	-9,48E-06
300,02325	-288,1738	1,52E-06	3,70E-06	-2,18E-06	-1,98E-05
300,02786	-241,98398	1,32E-06	3,34E-06	-2,02E-06	-1,84E-05
300,03511	-200,04204	1,28E-06	2,61E-06	-1,33E-06	-1,21E-05
300,05176	-161,93298	7,27E-07	2,33E-06	-1,61E-06	-1,46E-05
300,05392	-128,02299	9,14E-07	1,91E-06	-1,00E-06	-9,10E-06
300,0515	-97,99471	5,47E-07	1,61E-06	-1,07E-06	-9,69E-06
300,0419	-71,958	4,85E-07	1,32E-06	-8,31E-07	-7,55E-06
300,037	-49,87624	3,38E-07	1,10E-06	-7,64E-07	-6,94E-06
300,03758	-31,72499	5,31E-07	6,11E-07	-8,06E-08	-7,32E-07
300,02881	-17,61415	2,45E-07	4,35E-07	-1,90E-07	-1,73E-06
300,01945	-7,59252	4,98E-08	2,36E-07	-1,86E-07	-1,69E-06
300,01212	-1,58686	-1,04E-07	5,23E-08	-1,56E-07	-1,42E-06
300,00688	-0,42723	-5,99E-08	-1,83E-07	1,24E-07	1,12E-06
300,00346	2,08733	-1,24E-07	-1,95E-07	7,14E-08	6,49E-07
300,00653	8,09299	-1,20E-07	-2,77E-07	1,56E-07	1,42E-06
300,00865	18,11462	-1,10E-08	-3,65E-07	3,54E-07	3,21E-06
300,00905	32,11561	8,42E-08	-3,42E-07	4,27E-07	3,88E-06
300,0061	49,9983	5,08E-08	-5,41E-07	5,91E-07	5,38E-06
300,00638	72,00683	1,12E-07	-8,40E-07	9,52E-07	8,66E-06
300,01009	98,06796	-3,68E-07	-1,09E-06	7,20E-07	6,54E-06
300,01297	128,04741	-2,72E-07	-1,63E-06	1,35E-06	1,23E-05
300,01833	162,18932	-2,17E-07	-1,97E-06	1,75E-06	1,59E-05
300,02589	200,10306	-9,30E-07	-2,60E-06	1,67E-06	1,52E-05
300,02904	242,13045	-1,17E-06	-3,29E-06	2,12E-06	1,92E-05
300,02826	288,186	-1,03E-06	-3,59E-06	2,56E-06	2,33E-05
300,02551	337,98898	-1,52E-06	-4,28E-06	2,76E-06	2,50E-05
300,02368	391,8934	-1,91E-06	-4,63E-06	2,72E-06	2,48E-05

300,02609	450,15561	-2,18E-06	-5,25E-06	3,08E-06	2,80E-05
300,02818	512,00653	-2,36E-06	-6,08E-06	3,72E-06	3,38E-05
300,03024	578,33728	-3,03E-06	-7,31E-06	4,28E-06	3,89E-05
300,0331	648,24457	-3,78E-06	-7,73E-06	3,95E-06	3,59E-05
300,04657	722,10681	-4,16E-06	-8,50E-06	4,34E-06	3,95E-05
300,04716	800,35126	-4,96E-06	-9,55E-06	4,59E-06	4,17E-05
300,04501	882,22101	-5,34E-06	-1,02E-05	4,88E-06	4,44E-05
300,03957	968,16779	-6,50E-06	-1,15E-05	5,02E-06	4,57E-05
300,03897	1058,41125	-6,44E-06	-1,25E-05	6,07E-06	5,52E-05
300,04715	1152,15808	-7,27E-06	-1,31E-05	5,88E-06	5,34E-05
300,0455	1250,18945	-8,29E-06	-1,45E-05	6,18E-06	5,62E-05
300,04306	1352,18799	-8,91E-06	-1,51E-05	6,22E-06	5,66E-05
300,04794	1458,17798	-1,00E-05	-1,64E-05	6,41E-06	5,83E-05
300,04576	1568,31824	-1,06E-05	-1,76E-05	6,91E-06	6,28E-05
300,05251	1682,18164	-1,10E-05	-1,88E-05	7,83E-06	7,12E-05
300,06789	1799,81677	-1,26E-05	-2,01E-05	7,57E-06	6,88E-05
300,06503	1922,18799	-1,37E-05	-2,14E-05	7,76E-06	7,05E-05
300,05678	2047,97717	-1,47E-05	-2,24E-05	7,65E-06	6,95E-05
300,05299	2178,3562	-1,57E-05	-2,40E-05	8,32E-06	7,56E-05
300,07661	2312,18945	-1,68E-05	-2,55E-05	8,67E-06	7,88E-05
300,09369	2450,03882	-1,78E-05	-2,70E-05	9,20E-06	8,37E-05
300,09593	2592,1604	-1,90E-05	-2,83E-05	9,30E-06	8,45E-05
300,11142	2738,07813	-2,01E-05	-3,00E-05	9,91E-06	9,00E-05
300,11279	2888,28076	-2,14E-05	-3,12E-05	9,75E-06	8,87E-05
300,13445	3042,12085	-2,26E-05	-3,32E-05	1,05E-05	9,59E-05
300,14389	3200,33057	-2,37E-05	-3,50E-05	1,13E-05	1,03E-04
300,13007	3362,27588	-2,51E-05	-3,66E-05	1,15E-05	1,04E-04
300,11215	3528,1272	-2,64E-05	-3,85E-05	1,21E-05	1,10E-04
300,09119	3698,44604	-2,78E-05	-4,01E-05	1,24E-05	1,12E-04
300,0743	3872,34155	-2,93E-05	-4,22E-05	1,29E-05	1,17E-04
300,05956	4050,39966	-3,06E-05	-4,39E-05	1,33E-05	1,21E-04
300,05927	4232,3877	-3,20E-05	-4,60E-05	1,41E-05	1,28E-04
300,07234	4418,2334	-3,35E-05	-4,80E-05	1,45E-05	1,31E-04
300,06665	4608,46191	-3,50E-05	-4,99E-05	1,49E-05	1,36E-04
300,05701	4802,29053	-3,67E-05	-5,20E-05	1,52E-05	1,39E-04
300,05377	5000,31836	-3,84E-05	-5,42E-05	1,58E-05	1,44E-04
300,03624	5500,49658	-4,21E-05	-5,95E-05	1,74E-05	1,58E-04
300,03314	5600,23682	-4,29E-05	-6,03E-05	1,74E-05	1,59E-04
300,03586	8400,37402	-6,54E-05	-9,05E-05	2,51E-05	2,28E-04
300,03806	11200,4375	-8,76E-05	-1,21E-04	3,29E-05	2,99E-04
300,0495	14000,47656	-1,11E-04	-1,51E-04	4,00E-05	3,64E-04
300,04475	16800,34375	-1,32E-04	-1,81E-04	4,82E-05	4,39E-04
300,04042	19600,35938	-1,55E-04	-2,10E-04	5,58E-05	5,07E-04
300,0481	22400,39844	-1,78E-04	-2,41E-04	6,26E-05	5,69E-04
300,04671	25200,47461	-2,00E-04	-2,71E-04	7,06E-05	6,42E-04
300,05869	28000,35352	-2,22E-04	-3,01E-04	7,84E-05	7,13E-04
300,06554	30800,33203	-2,45E-04	-3,31E-04	8,62E-05	7,84E-04
300,05371	33600,32422	-2,67E-04	-3,61E-04	9,35E-05	8,50E-04

300,0464	36400,42188	-2,89E-04	-3,91E-04	1,02E-04	9,24E-04
300,03661	39200,31641	-3,13E-04	-4,21E-04	1,08E-04	9,81E-04
300,03011	42000,36719	-3,35E-04	-4,51E-04	1,15E-04	0,00105
300,03441	44800,23438	-3,60E-04	-4,81E-04	1,21E-04	0,0011
300,0515	47600,39844	-3,78E-04	-5,12E-04	1,33E-04	0,00121
300,0466	50400,33984	-4,00E-04	-5,41E-04	1,41E-04	0,00128
300,04013	53200,22266	-4,24E-04	-5,72E-04	1,48E-04	0,00134
300,04077	56000,25781	-4,45E-04	-6,02E-04	1,57E-04	0,00143
300,0354	58800,33594	-4,68E-04	-6,32E-04	1,64E-04	0,00149
300,0276	61600,37109	-4,91E-04	-6,63E-04	1,72E-04	0,00156
300,02602	64400,34766	-5,14E-04	-6,92E-04	1,78E-04	0,00162
300,0244	67200,39844	-5,35E-04	-7,23E-04	1,88E-04	0,00171
300,02065	70000,35938	-5,58E-04	-7,53E-04	1,95E-04	0,00177

Tabela 16: Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO₂ dopado com 4% de Fe.

Temperatura (K)	H (Oe)	M _{SnO₂-Fe4%} (e.m.u.)	M _{vidro}	(M _{SnO₂-Fe4%})-(M _{vidro})=M _{final}	M _{final} /Área
300,02518	-0,34179	-1,94E-07	-8,95E-08	-1,04E-07	-3,48E-07
300,02666	1,91644	-1,58E-07	-7,86E-08	-7,91E-08	-2,64E-07
300,03191	7,97092	2,05E-07	-7,02E-08	2,75E-07	9,16E-07
300,03233	17,96814	5,79E-07	-8,51E-08	6,64E-07	2,21E-06
300,03053	32,11561	1,32E-06	-2,64E-07	1,58E-06	5,28E-06
300,03157	50,08375	2,09E-06	-4,49E-07	2,54E-06	8,46E-06
300,04466	72,08007	3,15E-06	-6,56E-07	3,81E-06	1,27E-05
300,05899	98,08016	4,46E-06	-9,53E-07	5,42E-06	1,81E-05
300,08888	128,07181	5,84E-06	-1,25E-06	7,09E-06	2,36E-05
300,09708	162,03062	7,40E-06	-1,57E-06	8,97E-06	2,99E-05
300,08858	200,02983	8,97E-06	-1,93E-06	1,09E-05	3,64E-05
300,07576	242,10603	1,06E-05	-2,27E-06	1,29E-05	4,29E-05
300,06528	288,10056	1,22E-05	-2,69E-06	1,49E-05	4,98E-05
300,05563	337,95239	1,39E-05	-3,16E-06	1,71E-05	5,69E-05
300,05211	391,90561	1,55E-05	-3,68E-06	1,91E-05	6,38E-05
300,04274	449,9603	1,70E-05	-4,30E-06	2,13E-05	7,10E-05
300,03607	511,83566	1,84E-05	-4,89E-06	2,33E-05	7,75E-05
300,03572	578,0199	1,99E-05	-5,00E-06	2,49E-05	8,29E-05
300,04535	648,1347	2,14E-05	-6,19E-06	2,76E-05	9,21E-05
300,04408	722,0824	2,25E-05	-6,94E-06	2,94E-05	9,81E-05
300,03792	800,25354	2,37E-05	-7,78E-06	3,15E-05	1,05E-04
300,03267	882,12335	2,47E-05	-8,49E-06	3,32E-05	1,11E-04
300,02527	967,9115	2,57E-05	-9,36E-06	3,50E-05	1,17E-04
300,01988	1058,17944	2,64E-05	-1,02E-05	3,66E-05	1,22E-04
300,01485	1152,09705	2,71E-05	-1,13E-05	3,84E-05	1,28E-04
300,01291	1250,00635	2,75E-05	-1,21E-05	3,96E-05	1,32E-04
300,0144	1352,02917	2,81E-05	-1,29E-05	4,10E-05	1,37E-04
300,03912	1457,84839	2,86E-05	-1,43E-05	4,29E-05	1,43E-04

300,05188	1568,0741	2,88E-05	-1,54E-05	4,42E-05	1,47E-04
300,07124	1682,02283	2,89E-05	-1,66E-05	4,55E-05	1,52E-04
300,07768	1799,64587	2,90E-05	-1,79E-05	4,69E-05	1,56E-04
300,0928	1922,01721	2,92E-05	-1,93E-05	4,85E-05	1,62E-04
300,09161	2047,57434	2,90E-05	-2,05E-05	4,94E-05	1,65E-04
300,08771	2177,8313	2,88E-05	-2,20E-05	5,09E-05	1,70E-04
300,09274	2311,5791	2,87E-05	-2,34E-05	5,21E-05	1,74E-04
300,08205	2449,69702	2,85E-05	-2,48E-05	5,33E-05	1,78E-04
300,06987	2591,72095	2,83E-05	-2,64E-05	5,47E-05	1,82E-04
300,05757	2737,66333	2,78E-05	-2,80E-05	5,58E-05	1,86E-04
300,04726	2887,89014	2,74E-05	-2,97E-05	5,71E-05	1,90E-04
300,04161	3041,79126	2,70E-05	-3,14E-05	5,83E-05	1,94E-04
300,05009	3199,95239	2,64E-05	-3,29E-05	5,93E-05	1,98E-04
300,04688	3361,67798	2,60E-05	-3,48E-05	6,07E-05	2,02E-04
300,03859	3527,65112	2,54E-05	-3,64E-05	6,18E-05	2,06E-04
300,04657	3698,33643	2,48E-05	-3,82E-05	6,30E-05	2,10E-04
300,07738	3872,18286	2,43E-05	-4,01E-05	6,43E-05	2,14E-04
300,08836	4050,42383	2,34E-05	-4,20E-05	6,54E-05	2,18E-04
300,08267	4232,3999	2,28E-05	-4,39E-05	6,68E-05	2,23E-04
300,06924	4418,19678	2,21E-05	-4,60E-05	6,81E-05	2,27E-04
300,05554	4608,16846	2,13E-05	-4,79E-05	6,92E-05	2,31E-04
300,05338	4802,37549	2,05E-05	-5,01E-05	7,06E-05	2,35E-04
300,06694	5000,25732	1,96E-05	-5,21E-05	7,17E-05	2,39E-04
300,0574	5500,3623	1,76E-05	-5,74E-05	7,50E-05	2,50E-04
300,05794	5600,44434	1,74E-05	-5,82E-05	7,56E-05	2,52E-04
300,0607	8400,27637	4,54E-06	-9,05E-05	9,51E-05	3,17E-04
300,05145	11200,30273	-8,58E-06	-1,21E-04	1,12E-04	3,73E-04
300,0453	14000,28125	-2,21E-05	-1,51E-04	1,28E-04	4,28E-04
300,05991	16800,33203	-3,55E-05	-1,81E-04	1,45E-04	4,84E-04
300,05278	19600,35938	-4,90E-05	-2,11E-04	1,62E-04	5,39E-04
300,04538	22400,44727	-6,23E-05	-2,41E-04	1,78E-04	5,94E-04
300,03539	25200,38867	-7,58E-05	-2,71E-04	1,95E-04	6,49E-04
300,02667	28000,28125	-8,96E-05	-3,01E-04	2,11E-04	7,03E-04
300,02232	30800,30664	-1,03E-04	-3,31E-04	2,28E-04	7,59E-04
300,04532	33600,27344	-1,17E-04	-3,61E-04	2,44E-04	8,13E-04
300,05037	36400,41016	-1,31E-04	-3,91E-04	2,60E-04	8,67E-04
300,04619	39200,46094	-1,44E-04	-4,21E-04	2,77E-04	9,22E-04
300,05826	42000,47656	-1,58E-04	-4,51E-04	2,93E-04	9,77E-04
300,05101	44800,19922	-1,72E-04	-4,81E-04	3,09E-04	0,00103
300,05284	47600,30859	-1,85E-04	-5,11E-04	3,26E-04	0,00109
300,04475	50400,3125	-1,99E-04	-5,41E-04	3,42E-04	0,00114
300,03561	53200,27734	-2,13E-04	-5,71E-04	3,58E-04	0,00119
300,02612	56000,29297	-2,27E-04	-6,02E-04	3,75E-04	0,00125
300,01956	58800,21094	-2,40E-04	-6,32E-04	3,92E-04	0,00131
300,01462	61600,43359	-2,54E-04	-6,62E-04	4,08E-04	0,00136
300,01215	64400,29297	-2,68E-04	-6,93E-04	4,24E-04	0,00141
300,01439	67200,49219	-2,82E-04	-7,23E-04	4,41E-04	0,00147
300,03452	70000,21875	-2,95E-04	-7,53E-04	4,58E-04	0,00153

300,03246	67200,42969	-2,81E-04	-7,22E-04	4,41E-04	0,00147
300,03419	64400,41016	-2,67E-04	-6,92E-04	4,25E-04	0,00142
300,0582	61600,35547	-2,53E-04	-6,61E-04	4,08E-04	0,00136
300,06432	58800,34766	-2,40E-04	-6,31E-04	3,91E-04	0,0013
300,05075	56000,36719	-2,26E-04	-6,01E-04	3,75E-04	0,00125
300,04123	53200,30078	-2,12E-04	-5,71E-04	3,59E-04	0,0012
300,04788	50400,30078	-1,99E-04	-5,41E-04	3,42E-04	0,00114
300,03828	47600,40625	-1,85E-04	-5,11E-04	3,26E-04	0,00109
300,02882	44800,19922	-1,71E-04	-4,80E-04	3,09E-04	0,00103
300,02065	42000,29297	-1,57E-04	-4,50E-04	2,93E-04	9,77E-04
300,01424	39200,4375	-1,44E-04	-4,20E-04	2,76E-04	9,22E-04
300,01138	36400,23828	-1,30E-04	-3,90E-04	2,61E-04	8,69E-04
300,00757	33600,11719	-1,16E-04	-3,60E-04	2,43E-04	8,11E-04
299,99942	30800,39453	-1,02E-04	-3,30E-04	2,28E-04	7,59E-04
299,99843	28000,45313	-8,87E-05	-3,00E-04	2,11E-04	7,03E-04
299,99699	25200,38867	-7,51E-05	-2,70E-04	1,95E-04	6,49E-04
299,99097	22400,22656	-6,15E-05	-2,40E-04	1,78E-04	5,95E-04
299,99306	19600,38477	-4,80E-05	-2,10E-04	1,62E-04	5,39E-04
299,99236	16800,19727	-3,44E-05	-1,80E-04	1,45E-04	4,85E-04
299,99318	14000,21973	-2,10E-05	-1,50E-04	1,29E-04	4,29E-04
299,9938	11200,46191	-7,51E-06	-1,20E-04	1,12E-04	3,74E-04
299,99298	8400,17871	5,66E-06	-8,96E-05	9,53E-05	3,18E-04
299,9957	5600,37109	1,83E-05	-5,97E-05	7,80E-05	2,60E-04
300,00124	5500,26465	1,86E-05	-5,87E-05	7,74E-05	2,58E-04
300,00241	5000,26953	2,07E-05	-5,33E-05	7,40E-05	2,47E-04
300,00348	4802,37549	2,15E-05	-5,12E-05	7,27E-05	2,42E-04
300,00917	4608,27832	2,24E-05	-4,89E-05	7,13E-05	2,38E-04
300,03081	4418,34326	2,32E-05	-4,72E-05	7,04E-05	2,35E-04
300,03764	4232,44873	2,39E-05	-4,52E-05	6,91E-05	2,30E-04
300,0399	4050,33813	2,45E-05	-4,32E-05	6,77E-05	2,26E-04
300,0448	3872,32935	2,53E-05	-4,13E-05	6,66E-05	2,22E-04
300,05396	3698,48267	2,59E-05	-3,94E-05	6,54E-05	2,18E-04
300,05229	3528,22485	2,65E-05	-3,77E-05	6,42E-05	2,14E-04
300,04309	3362,41016	2,71E-05	-3,59E-05	6,30E-05	2,10E-04
300,03635	3200,14771	2,76E-05	-3,42E-05	6,18E-05	2,06E-04
300,0377	3042,16968	2,81E-05	-3,25E-05	6,06E-05	2,02E-04
300,03578	2888,24414	2,85E-05	-3,08E-05	5,93E-05	1,98E-04
300,03159	2738,15161	2,89E-05	-2,93E-05	5,82E-05	1,94E-04
300,02501	2592,38013	2,92E-05	-2,77E-05	5,69E-05	1,90E-04
300,01991	2450,09985	2,96E-05	-2,61E-05	5,56E-05	1,85E-04
300,02354	2311,90869	2,98E-05	-2,48E-05	5,46E-05	1,82E-04
300,04749	2178,34399	3,00E-05	-2,33E-05	5,32E-05	1,77E-04
300,06816	2048,12378	3,00E-05	-2,19E-05	5,19E-05	1,73E-04
300,06802	1922,32239	3,01E-05	-2,06E-05	5,07E-05	1,69E-04
300,06255	1799,95105	3,00E-05	-1,92E-05	4,92E-05	1,64E-04
300,04758	1682,18164	3,00E-05	-1,81E-05	4,81E-05	1,60E-04
300,0347	1568,26941	3,00E-05	-1,68E-05	4,68E-05	1,56E-04
300,02565	1458,16577	2,96E-05	-1,57E-05	4,53E-05	1,51E-04

300,02393	1352,17578	2,93E-05	-1,47E-05	4,40E-05	1,47E-04
300,01949	1250,33594	2,89E-05	-1,32E-05	4,22E-05	1,41E-04
300,01826	1152,48767	2,84E-05	-1,25E-05	4,09E-05	1,36E-04
300,02103	1058,27698	2,79E-05	-1,17E-05	3,95E-05	1,32E-04
300,02353	968,14337	2,71E-05	-1,06E-05	3,77E-05	1,26E-04
300,04123	882,33081	2,62E-05	-9,79E-06	3,60E-05	1,20E-04
300,04063	800,14374	2,53E-05	-9,31E-06	3,46E-05	1,15E-04
300,03665	722,0824	2,42E-05	-8,26E-06	3,24E-05	1,08E-04
300,03412	648,17133	2,29E-05	-7,47E-06	3,04E-05	1,01E-04
300,03169	578,0199	2,18E-05	-6,60E-06	2,84E-05	9,47E-05
300,0448	511,88446	2,02E-05	-6,13E-06	2,63E-05	8,78E-05
300,05692	449,98468	1,89E-05	-5,47E-06	2,44E-05	8,13E-05
300,05751	392,11313	1,71E-05	-4,93E-06	2,21E-05	7,36E-05
300,06258	338,34299	1,58E-05	-4,58E-06	2,03E-05	6,78E-05
300,05753	288,186	1,42E-05	-3,97E-06	1,82E-05	6,06E-05
300,05219	242,37457	1,22E-05	-3,50E-06	1,57E-05	5,23E-05
300,04568	200,33499	1,09E-05	-2,75E-06	1,36E-05	4,55E-05
300,03802	162,28697	9,18E-06	-2,34E-06	1,15E-05	3,84E-05
300,03207	128,29153	7,26E-06	-2,01E-06	9,27E-06	3,09E-05
300,02986	98,17781	5,97E-06	-1,67E-06	7,64E-06	2,55E-05
300,02985	72,18993	4,37E-06	-1,23E-06	5,60E-06	1,87E-05
300,02612	50,10816	2,91E-06	-1,00E-06	3,91E-06	1,30E-05
300,03099	31,99354	1,94E-06	-7,65E-07	2,70E-06	9,01E-06
300,06036	18,01697	1,15E-06	-6,21E-07	1,77E-06	5,91E-06
300,06676	8,01975	4,72E-07	-2,85E-07	7,56E-07	2,52E-06
300,08301	1,97747	3,11E-07	-1,32E-07	4,44E-07	1,48E-06
300,09108	-0,06103	2,07E-07	1,51E-07	5,64E-08	1,88E-07
300,08366	-2,01409	1,60E-07	2,01E-07	-4,07E-08	-1,36E-07
300,08026	-8,03195	-2,98E-07	2,37E-07	-5,35E-07	-1,78E-06
300,09904	-17,98035	-1,06E-06	2,60E-07	-1,32E-06	-4,40E-06
300,09512	-31,98133	-1,99E-06	3,55E-07	-2,34E-06	-7,81E-06
300,09143	-49,92506	-3,19E-06	5,65E-07	-3,76E-06	-1,25E-05
300,08336	-71,78711	-4,51E-06	5,99E-07	-5,11E-06	-1,70E-05
300,09325	-97,86044	-6,02E-06	1,09E-06	-7,11E-06	-2,37E-05
300,08815	-127,8521	-7,55E-06	1,58E-06	-9,14E-06	-3,05E-05
300,08232	-161,83533	-9,15E-06	1,99E-06	-1,11E-05	-3,72E-05
300,10901	-199,87114	-1,08E-05	2,57E-06	-1,34E-05	-4,45E-05
300,13202	-241,69101	-1,25E-05	3,21E-06	-1,57E-05	-5,23E-05
300,14265	-287,72214	-1,39E-05	3,62E-06	-1,76E-05	-5,85E-05
300,12889	-338,25754	-1,56E-05	4,63E-06	-2,02E-05	-6,74E-05
300,1122	-392,25961	-1,73E-05	5,03E-06	-2,23E-05	-7,44E-05
300,09529	-450,28989	-1,88E-05	5,79E-06	-2,46E-05	-8,18E-05
300,10475	-512,17743	-2,04E-05	6,39E-06	-2,68E-05	-8,93E-05
300,1368	-578,04431	-2,09E-05	6,93E-06	-2,78E-05	-9,26E-05
300,13701	-648,02484	-2,28E-05	7,88E-06	-3,07E-05	-1,02E-04
300,12636	-721,9115	-2,38E-05	8,62E-06	-3,25E-05	-1,08E-04
300,11073	-800,14374	-2,50E-05	9,45E-06	-3,45E-05	-1,15E-04
300,09189	-882,06232	-2,62E-05	1,01E-05	-3,63E-05	-1,21E-04

300,07692	-967,71613	-2,60E-05	1,10E-05	-3,70E-05	-1,23E-04
300,06538	-1058,05737	-2,72E-05	1,16E-05	-3,88E-05	-1,29E-04
300,04942	-1151,87744	-2,84E-05	1,29E-05	-4,13E-05	-1,38E-04
300,05276	-1249,79883	-2,88E-05	1,40E-05	-4,28E-05	-1,43E-04
300,07649	-1351,80957	-2,92E-05	1,54E-05	-4,46E-05	-1,49E-04
300,07462	-1457,82397	-2,94E-05	1,63E-05	-4,57E-05	-1,52E-04
300,06717	-1568,02527	-2,97E-05	1,73E-05	-4,71E-05	-1,57E-04
300,07422	-1682,02283	-2,98E-05	1,88E-05	-4,86E-05	-1,62E-04
300,10944	-1799,57263	-2,99E-05	2,01E-05	-4,99E-05	-1,66E-04
300,11864	-1921,98071	-2,97E-05	2,14E-05	-5,11E-05	-1,70E-04
300,13824	-2047,78198	-2,92E-05	2,29E-05	-5,22E-05	-1,74E-04
300,14708	-2178,0022	-2,96E-05	2,41E-05	-5,38E-05	-1,79E-04
300,13452	-2311,70142	-2,95E-05	2,55E-05	-5,50E-05	-1,83E-04
300,13213	-2449,6604	-2,80E-05	2,74E-05	-5,54E-05	-1,85E-04
300,13531	-2591,96509	-2,86E-05	2,83E-05	-5,69E-05	-1,90E-04
300,1291	-2738,16382	-2,87E-05	2,98E-05	-5,86E-05	-1,95E-04
300,14482	-2888,41504	-2,80E-05	3,15E-05	-5,94E-05	-1,98E-04
300,13713	-3042,24292	-2,77E-05	3,32E-05	-6,09E-05	-2,03E-04
300,12816	-3200,46484	-2,70E-05	3,43E-05	-6,14E-05	-2,05E-04
300,13736	-3362,26367	-2,67E-05	3,66E-05	-6,33E-05	-2,11E-04
300,1524	-3528,09033	-2,56E-05	3,83E-05	-6,39E-05	-2,13E-04
300,17221	-3698,43384	-2,55E-05	4,05E-05	-6,60E-05	-2,20E-04
300,17419	-3872,21973	-2,49E-05	4,20E-05	-6,70E-05	-2,23E-04
300,18999	-4050,41162	-2,41E-05	4,40E-05	-6,80E-05	-2,27E-04
300,1727	-4232,4248	-2,34E-05	4,58E-05	-6,93E-05	-2,31E-04
300,14682	-4418,31934	-2,26E-05	4,79E-05	-7,05E-05	-2,35E-04
300,11865	-4608,37598	-2,20E-05	4,99E-05	-7,18E-05	-2,39E-04
300,09523	-4802,33936	-2,11E-05	5,20E-05	-7,31E-05	-2,44E-04
300,0761	-5000,37939	-2,03E-05	5,41E-05	-7,44E-05	-2,48E-04
300,04518	-5500,06934	-1,82E-05	5,94E-05	-7,76E-05	-2,59E-04
300,0354	-5600,17578	-1,80E-05	6,02E-05	-7,82E-05	-2,61E-04
300,02599	-8400,34961	-4,94E-06	9,05E-05	-9,55E-05	-3,18E-04
300,01965	-11200,46191	8,19E-06	1,20E-04	-1,12E-04	-3,74E-04
300,02495	-14000,45117	2,17E-05	1,51E-04	-1,29E-04	-4,29E-04
300,0584	-16800,39258	3,51E-05	1,81E-04	-1,45E-04	-4,85E-04
300,06131	-19600,4082	4,87E-05	2,11E-04	-1,62E-04	-5,40E-04
300,08466	-22400,43359	6,23E-05	2,41E-04	-1,78E-04	-5,95E-04
300,10246	-25200,40039	7,62E-05	2,71E-04	-1,94E-04	-6,48E-04
300,08986	-28000,35352	8,97E-05	3,01E-04	-2,11E-04	-7,03E-04
300,07481	-30800,35742	1,03E-04	3,31E-04	-2,27E-04	-7,58E-04
300,07169	-33600,26172	1,17E-04	3,61E-04	-2,44E-04	-8,12E-04
300,05727	-36400,3125	1,31E-04	3,91E-04	-2,60E-04	-8,67E-04
300,04222	-39200,16797	1,44E-04	4,21E-04	-2,76E-04	-9,21E-04
300,03288	-42000,36719	1,58E-04	4,51E-04	-2,93E-04	-9,76E-04
300,02402	-44800,26172	1,72E-04	4,81E-04	-3,09E-04	-0,00103
300,01776	-47600,34766	1,86E-04	5,11E-04	-3,26E-04	-0,00109
300,01172	-50400,44922	1,99E-04	5,41E-04	-3,42E-04	-0,00114
300,00963	-53200,23828	2,13E-04	5,71E-04	-3,58E-04	-0,00119

300,00648	-56000,35547	2,27E-04	6,02E-04	-3,75E-04	-0,00125
300,00548	-58800,49219	2,40E-04	6,32E-04	-3,92E-04	-0,00131
300,00386	-61600,1875	2,55E-04	6,62E-04	-4,07E-04	-0,00136
300,0016	-64400,24219	2,68E-04	6,92E-04	-4,24E-04	-0,00141
300,00916	-67200,375	2,82E-04	7,23E-04	-4,40E-04	-0,00147
300,00974	-70000,42188	2,96E-04	7,53E-04	-4,57E-04	-0,00152
300,01202	-67200,375	2,82E-04	7,22E-04	-4,40E-04	-0,00147
300,01874	-64400,41016	2,68E-04	6,92E-04	-4,24E-04	-0,00141
300,0405	-61600,49609	2,55E-04	6,61E-04	-4,07E-04	-0,00136
300,03555	-58800,40234	2,40E-04	6,31E-04	-3,91E-04	-0,0013
300,02747	-56000,41797	2,26E-04	6,02E-04	-3,76E-04	-0,00125
300,01703	-53200,47656	2,13E-04	5,71E-04	-3,58E-04	-0,00119
300,0114	-50400,375	1,99E-04	5,41E-04	-3,42E-04	-0,00114
300,00806	-47600,39844	1,85E-04	5,10E-04	-3,26E-04	-0,00109
300,00905	-44800,36719	1,71E-04	4,80E-04	-3,09E-04	-0,00103
300,03073	-42000,44141	1,48E-04	4,50E-04	-3,02E-04	-0,00101
300,05353	-39200,26953	1,43E-04	4,20E-04	-2,77E-04	-9,22E-04
300,06194	-36400,25	1,30E-04	3,90E-04	-2,60E-04	-8,68E-04
300,05428	-33600,39453	1,16E-04	3,60E-04	-2,44E-04	-8,13E-04
300,04327	-30800,17188	1,03E-04	3,30E-04	-2,27E-04	-7,57E-04
300,03342	-28000,18359	8,90E-05	3,00E-04	-2,11E-04	-7,03E-04
300,02597	-25200,35156	7,51E-05	2,70E-04	-1,94E-04	-6,48E-04
300,01927	-22400,14258	6,18E-05	2,40E-04	-1,78E-04	-5,93E-04
300,02242	-19600,25	4,80E-05	2,10E-04	-1,62E-04	-5,39E-04
300,05283	-16800,25781	3,43E-05	1,80E-04	-1,45E-04	-4,85E-04
300,07375	-14000,25586	2,10E-05	1,50E-04	-1,29E-04	-4,29E-04
300,07239	-11200,36426	7,66E-06	1,20E-04	-1,12E-04	-3,73E-04
300,06114	-8400,44727	-5,52E-06	8,96E-05	-9,51E-05	-3,17E-04
300,05135	-5600,41992	-1,83E-05	5,97E-05	-7,80E-05	-2,60E-04
300,06023	-5500,39893	-1,86E-05	5,86E-05	-7,72E-05	-2,57E-04
300,0407	-5000,36719	-2,08E-05	5,32E-05	-7,40E-05	-2,47E-04
300,03185	-4802,49805	-2,15E-05	5,12E-05	-7,28E-05	-2,43E-04
300,03093	-4608,19287	-2,24E-05	4,91E-05	-7,15E-05	-2,38E-04
300,04562	-4418,34326	-2,32E-05	4,70E-05	-7,02E-05	-2,34E-04
300,04132	-4232,31445	-2,39E-05	4,51E-05	-6,90E-05	-2,30E-04
300,04254	-4050,39966	-2,44E-05	4,31E-05	-6,75E-05	-2,25E-04
300,06938	-3872,21973	-2,51E-05	4,12E-05	-6,63E-05	-2,21E-04
300,07086	-3698,21411	-2,59E-05	3,94E-05	-6,53E-05	-2,18E-04
300,08051	-3528,22485	-2,65E-05	3,76E-05	-6,42E-05	-2,14E-04
300,07149	-3362,44678	-2,70E-05	3,58E-05	-6,29E-05	-2,10E-04
300,06439	-3200,44043	-2,76E-05	3,41E-05	-6,17E-05	-2,06E-04
300,07297	-3042,45044	-2,81E-05	3,24E-05	-6,05E-05	-2,02E-04
300,08417	-2888,42725	-2,85E-05	3,09E-05	-5,94E-05	-1,98E-04
300,08437	-2738,2981	-2,90E-05	2,92E-05	-5,82E-05	-1,94E-04
300,07547	-2592,38013	-2,93E-05	2,77E-05	-5,70E-05	-1,90E-04
300,08522	-2450,44165	-2,96E-05	2,62E-05	-5,58E-05	-1,86E-04
300,08501	-2312,18945	-2,98E-05	2,47E-05	-5,46E-05	-1,82E-04
300,10364	-2178,47827	-3,00E-05	2,33E-05	-5,34E-05	-1,78E-04

300,10217	-2048,3313	-3,01E-05	2,19E-05	-5,20E-05	-1,73E-04
300,09364	-1922,2124	-3,02E-05	2,06E-05	-5,08E-05	-1,69E-04
300,07753	-1800,18311	-3,02E-05	1,91E-05	-4,93E-05	-1,64E-04
300,06456	-1682,20605	-3,02E-05	1,79E-05	-4,81E-05	-1,60E-04
300,05087	-1568,4281	-3,00E-05	1,68E-05	-4,68E-05	-1,56E-04
300,04256	-1458,26343	-2,97E-05	1,56E-05	-4,53E-05	-1,51E-04
300,03343	-1352,38318	-2,93E-05	1,44E-05	-4,37E-05	-1,46E-04
300,02736	-1250,39697	-2,90E-05	1,36E-05	-4,26E-05	-1,42E-04
300,0229	-1152,1825	-2,84E-05	1,27E-05	-4,11E-05	-1,37E-04
300,01938	-1058,32581	-2,77E-05	1,17E-05	-3,94E-05	-1,31E-04
300,02655	-968,28979	-2,70E-05	1,06E-05	-3,76E-05	-1,25E-04
300,02664	-882,3186	-2,62E-05	9,69E-06	-3,59E-05	-1,20E-04
300,02483	-800,33905	-2,52E-05	9,00E-06	-3,42E-05	-1,14E-04
300,02246	-722,37537	-2,41E-05	8,41E-06	-3,25E-05	-1,08E-04
300,02264	-648,36664	-2,30E-05	7,24E-06	-3,02E-05	-1,01E-04
300,03503	-578,23962	-2,17E-05	6,72E-06	-2,84E-05	-9,48E-05
300,03612	-512,34833	-2,02E-05	6,14E-06	-2,63E-05	-8,77E-05
300,03369	-450,3143	-1,88E-05	5,59E-06	-2,44E-05	-8,14E-05
300,03517	-392,27182	-1,75E-05	4,75E-06	-2,23E-05	-7,43E-05
300,04706	-338,15991	-1,56E-05	4,16E-06	-1,97E-05	-6,58E-05
300,04712	-288,27145	-1,38E-05	3,70E-06	-1,75E-05	-5,84E-05
300,05928	-242,42339	-1,23E-05	3,34E-06	-1,56E-05	-5,21E-05
300,05553	-200,1763	-1,08E-05	2,61E-06	-1,34E-05	-4,46E-05
300,04802	-162,42123	-8,86E-06	2,33E-06	-1,12E-05	-3,73E-05
300,03726	-128,48685	-7,46E-06	1,91E-06	-9,37E-06	-3,12E-05
300,03058	-98,40974	-5,78E-06	1,61E-06	-7,40E-06	-2,47E-05
300,02373	-72,38524	-4,58E-06	1,32E-06	-5,89E-06	-1,96E-05
300,02832	-50,3645	-3,06E-06	1,10E-06	-4,16E-06	-1,39E-05
300,05502	-32,23767	-2,07E-06	6,11E-07	-2,68E-06	-8,92E-06
300,07059	-18,28551	-1,07E-06	4,35E-07	-1,50E-06	-5,01E-06
300,06505	-8,23947	-5,32E-07	2,36E-07	-7,68E-07	-2,56E-06
300,05835	-2,2216	-1,42E-07	5,23E-08	-1,94E-07	-6,48E-07
300,06793	-0,34179	-2,44E-07	-1,83E-07	-6,08E-08	-2,03E-07
300,06087	1,90423	2,15E-08	-1,95E-07	2,16E-07	7,22E-07
300,05093	7,95871	4,89E-07	-2,77E-07	7,66E-07	2,55E-06
300,03735	17,94373	1,16E-06	-3,65E-07	1,53E-06	5,09E-06
300,03044	31,88368	2,26E-06	-3,42E-07	2,60E-06	8,67E-06
300,01945	49,93727	3,31E-06	-5,41E-07	3,85E-06	1,28E-05
300,01463	71,88477	4,58E-06	-8,40E-07	5,42E-06	1,81E-05
300,01297	97,92148	6,01E-06	-1,09E-06	7,10E-06	2,37E-05
300,01202	128,01079	7,59E-06	-1,63E-06	9,22E-06	3,07E-05
300,00964	162,03062	9,47E-06	-1,97E-06	1,14E-05	3,81E-05
300,00769	200,09087	1,09E-05	-2,60E-06	1,35E-05	4,51E-05
300,00755	241,89851	1,24E-05	-3,29E-06	1,57E-05	5,23E-05
300,0078	287,91745	1,85E-05	-3,59E-06	2,21E-05	7,38E-05
300,00861	337,92798	1,57E-05	-4,28E-06	1,99E-05	6,64E-05
300,00803	391,91785	1,74E-05	-4,63E-06	2,21E-05	7,35E-05
300,01472	449,77719	1,90E-05	-5,25E-06	2,43E-05	8,09E-05

300,03857	511,82339	2,02E-05	-6,08E-06	2,63E-05	8,77E-05
300,05283	577,95886	2,19E-05	-7,31E-06	2,92E-05	9,72E-05
300,05463	647,91498	2,33E-05	-7,73E-06	3,10E-05	1,03E-04
300,06064	721,67957	2,40E-05	-8,50E-06	3,25E-05	1,08E-04
300,07887	800,07043	2,53E-05	-9,55E-06	3,49E-05	1,16E-04
300,08469	881,98914	2,62E-05	-1,02E-05	3,65E-05	1,22E-04
300,11043	967,76495	2,67E-05	-1,15E-05	3,83E-05	1,28E-04
300,1427	1057,99622	2,82E-05	-1,25E-05	4,07E-05	1,36E-04
300,14284	1151,93848	2,83E-05	-1,31E-05	4,15E-05	1,38E-04
300,13066	1249,79883	2,90E-05	-1,45E-05	4,35E-05	1,45E-04
300,11281	1351,78516	2,92E-05	-1,51E-05	4,43E-05	1,48E-04
300,09511	1457,82397	2,94E-05	-1,64E-05	4,59E-05	1,53E-04
300,08565	1568,06189	2,97E-05	-1,76E-05	4,72E-05	1,57E-04
300,11366	1681,92517	2,98E-05	-1,88E-05	4,87E-05	1,62E-04
300,13057	1799,63354	2,98E-05	-2,01E-05	5,00E-05	1,67E-04
300,11839	1921,9563	3,00E-05	-2,14E-05	5,14E-05	1,71E-04
300,10486	2047,74524	2,98E-05	-2,24E-05	5,22E-05	1,74E-04
300,08655	2177,96558	2,98E-05	-2,40E-05	5,38E-05	1,79E-04
300,07091	2311,75	2,94E-05	-2,55E-05	5,49E-05	1,83E-04
300,05563	2449,64819	2,92E-05	-2,70E-05	5,62E-05	1,87E-04
300,04411	2591,89185	2,88E-05	-2,83E-05	5,71E-05	1,90E-04
300,04419	2737,72437	2,84E-05	-3,00E-05	5,84E-05	1,95E-04
300,06683	2888,13428	2,83E-05	-3,12E-05	5,94E-05	1,98E-04
300,07097	3041,97437	2,80E-05	-3,32E-05	6,12E-05	2,04E-04
300,09016	3200,02563	2,71E-05	-3,50E-05	6,21E-05	2,07E-04
300,1162	3361,90942	2,68E-05	-3,66E-05	6,34E-05	2,11E-04
300,1136	3527,79761	2,61E-05	-3,85E-05	6,45E-05	2,15E-04
300,09796	3698,21411	2,55E-05	-4,01E-05	6,56E-05	2,19E-04
300,08794	3872,37817	2,49E-05	-4,22E-05	6,71E-05	2,24E-04
300,10938	4050,24072	2,40E-05	-4,39E-05	6,79E-05	2,26E-04
300,13515	4232,4248	2,35E-05	-4,60E-05	6,95E-05	2,32E-04
300,14832	4418,31934	2,26E-05	-4,80E-05	7,06E-05	2,35E-04
300,14468	4608,51074	2,19E-05	-4,99E-05	7,18E-05	2,39E-04
300,12569	4802,40039	2,11E-05	-5,20E-05	7,31E-05	2,44E-04
300,10574	5000,45264	2,03E-05	-5,42E-05	7,45E-05	2,48E-04
300,09157	5500,22803	1,82E-05	-5,95E-05	7,76E-05	2,59E-04
300,09999	5600,33496	1,79E-05	-6,03E-05	7,82E-05	2,61E-04
300,08621	8400,10449	4,93E-06	-9,05E-05	9,54E-05	3,18E-04
300,06943	11200,2666	-8,22E-06	-1,21E-04	1,12E-04	3,74E-04
300,05437	14000,45117	-2,18E-05	-1,51E-04	1,29E-04	4,29E-04
300,0486	16800,32031	-3,53E-05	-1,81E-04	1,45E-04	4,84E-04
300,03818	19600,3457	-4,87E-05	-2,10E-04	1,62E-04	5,39E-04
300,02882	22400,23828	-6,24E-05	-2,41E-04	1,78E-04	5,94E-04
300,02698	25200,52344	-7,60E-05	-2,71E-04	1,95E-04	6,49E-04
300,03688	28000,30664	-8,97E-05	-3,01E-04	2,11E-04	7,03E-04
300,03647	30800,38086	-1,03E-04	-3,31E-04	2,28E-04	7,59E-04
300,0278	33600,37109	-1,17E-04	-3,61E-04	2,44E-04	8,12E-04
300,02174	36400,44922	-1,31E-04	-3,91E-04	2,60E-04	8,67E-04

300,01857	39200,37891	-1,45E-04	-4,21E-04	2,76E-04	9,21E-04
300,04166	42000,17188	-1,57E-04	-4,51E-04	2,94E-04	9,79E-04
300,04083	44800,26172	-1,72E-04	-4,81E-04	3,09E-04	0,00103
300,03941	47600,38672	-1,86E-04	-5,12E-04	3,26E-04	0,00109
300,03233	50400,30078	-1,99E-04	-5,41E-04	3,42E-04	0,00114
300,02261	53200,40234	-2,13E-04	-5,72E-04	3,58E-04	0,00119
300,02213	56000,29297	-2,27E-04	-6,02E-04	3,75E-04	0,00125
300,03177	58800,40234	-2,41E-04	-6,32E-04	3,91E-04	0,0013
300,0287	61600,41797	-2,54E-04	-6,63E-04	4,08E-04	0,00136
300,03064	64400,34766	-2,68E-04	-6,92E-04	4,24E-04	0,00141
300,06616	67200,26563	-2,82E-04	-7,23E-04	4,41E-04	0,00147
300,06575	70000,30469	-2,95E-04	-7,53E-04	4,58E-04	0,00153

Tabela 17: Dados das medições magnéticas do filme fino de SnO₂ dopado com 5% de Fe.

Temperatura (K)	H (Oe)	M _{SnO₂-Fe5%} (e.m.u.)	M _{vidro}	(M _{SnO₂-Fe5%})- (M _{vidro})=M _{final}	M _{final} /Área
300,00037	0,09765	-9,91E-09	-8,95E-08	7,96E-08	3,98E-07
300,00398	2,05071	6,80E-08	-7,86E-08	1,47E-07	7,33E-07
300,00919	7,88547	7,57E-08	-7,02E-08	1,46E-07	7,29E-07
300,01804	18,10241	3,83E-07	-8,51E-08	4,68E-07	2,34E-06
300,04204	32,03016	6,98E-07	-2,64E-07	9,62E-07	4,81E-06
300,05215	49,96168	1,11E-06	-4,49E-07	1,56E-06	7,81E-06
300,0636	72,03124	1,56E-06	-6,56E-07	2,22E-06	1,11E-05
300,06445	98,00692	2,44E-06	-9,53E-07	3,39E-06	1,70E-05
300,05635	128,02299	3,21E-06	-1,25E-06	4,46E-06	2,23E-05
300,05353	161,95738	4,15E-06	-1,57E-06	5,72E-06	2,86E-05
300,0732	200,0054	5,25E-06	-1,93E-06	7,18E-06	3,59E-05
300,06946	242,045	6,24E-06	-2,27E-06	8,50E-06	4,25E-05
300,06326	288,06393	7,31E-06	-2,69E-06	1,00E-05	5,00E-05
300,05675	337,85474	8,47E-06	-3,16E-06	1,16E-05	5,82E-05
300,04692	391,77133	9,39E-06	-3,68E-06	1,31E-05	6,53E-05
300,03683	449,83826	1,02E-05	-4,30E-06	1,45E-05	7,27E-05
300,02966	511,7746	1,09E-05	-4,89E-06	1,58E-05	7,91E-05
300,0248	577,89783	1,16E-05	-5,00E-06	1,66E-05	8,32E-05
300,02055	647,90277	1,21E-05	-6,19E-06	1,83E-05	9,15E-05
300,02061	721,76501	1,26E-05	-6,94E-06	1,95E-05	9,77E-05
300,03299	800,03381	1,27E-05	-7,78E-06	2,05E-05	1,03E-04
300,03339	881,92798	1,28E-05	-8,49E-06	2,13E-05	1,07E-04
300,03326	967,8382	1,29E-05	-9,36E-06	2,23E-05	1,11E-04
300,04692	1057,91077	1,24E-05	-1,02E-05	2,25E-05	1,13E-04
300,05728	1151,8407	1,21E-05	-1,13E-05	2,34E-05	1,17E-04
300,06381	1249,73779	1,19E-05	-1,21E-05	2,40E-05	1,20E-04
300,06094	1351,88281	1,11E-05	-1,29E-05	2,41E-05	1,20E-04
300,05498	1457,73853	1,06E-05	-1,43E-05	2,50E-05	1,25E-04

300,06383	1567,91541	9,84E-06	-1,54E-05	2,52E-05	1,26E-04
300,0603	1681,87634	8,97E-06	-1,66E-05	2,56E-05	1,28E-04
300,05234	1799,5238	8,13E-06	-1,79E-05	2,60E-05	1,30E-04
300,04314	1921,87073	7,27E-06	-1,93E-05	2,66E-05	1,33E-04
300,03661	2047,58667	6,21E-06	-2,05E-05	2,67E-05	1,33E-04
300,02968	2178,0144	5,20E-06	-2,20E-05	2,72E-05	1,36E-04
300,02353	2311,64014	4,08E-06	-2,34E-05	2,75E-05	1,38E-04
300,01826	2449,80688	2,80E-06	-2,48E-05	2,76E-05	1,38E-04
300,01906	2591,76978	1,54E-06	-2,64E-05	2,80E-05	1,40E-04
300,02126	2737,69995	3,16E-07	-2,80E-05	2,83E-05	1,42E-04
300,01958	2888	-1,04E-06	-2,97E-05	2,87E-05	1,43E-04
300,01678	3041,84009	-2,31E-06	-3,14E-05	2,90E-05	1,45E-04
300,01408	3199,97681	-3,77E-06	-3,29E-05	2,91E-05	1,46E-04
300,01144	3362,00708	-5,21E-06	-3,48E-05	2,95E-05	1,48E-04
300,00909	3528,05396	-6,77E-06	-3,64E-05	2,96E-05	1,48E-04
300,00687	3698,31177	-8,18E-06	-3,82E-05	3,00E-05	1,50E-04
300,00531	3872,35352	-9,70E-06	-4,01E-05	3,04E-05	1,52E-04
300,00606	4050,17969	-1,14E-05	-4,20E-05	3,06E-05	1,53E-04
300,0054	4232,48535	-1,31E-05	-4,39E-05	3,09E-05	1,54E-04
300,0087	4418,28223	-1,47E-05	-4,60E-05	3,13E-05	1,56E-04
300,02895	4608,25391	-1,65E-05	-4,79E-05	3,14E-05	1,57E-04
300,03149	4802,46143	-1,82E-05	-5,01E-05	3,19E-05	1,60E-04
300,03212	5000,24512	-2,00E-05	-5,21E-05	3,21E-05	1,61E-04
300,06679	5500,42383	-2,47E-05	-5,74E-05	3,27E-05	1,64E-04
300,06502	5600,33496	-2,52E-05	-5,82E-05	3,30E-05	1,65E-04
300,06351	8400,3252	-5,15E-05	-9,05E-05	3,90E-05	1,95E-04
300,05934	11200,27832	-7,78E-05	-1,21E-04	4,27E-05	2,14E-04
300,04858	14000,37793	-1,04E-04	-1,51E-04	4,64E-05	2,32E-04
300,03786	16800,4043	-1,30E-04	-1,81E-04	5,03E-05	2,52E-04
300,03221	19600,26172	-1,57E-04	-2,11E-04	5,39E-05	2,70E-04
300,05527	22400,42188	-1,83E-04	-2,41E-04	5,76E-05	2,88E-04
300,06601	25200,33984	-2,09E-04	-2,71E-04	6,12E-05	3,06E-04
300,05566	28000,16016	-2,36E-04	-3,01E-04	6,50E-05	3,25E-04
300,0443	30800,28516	-2,62E-04	-3,31E-04	6,86E-05	3,43E-04
300,03577	33600,39453	-2,89E-04	-3,61E-04	7,18E-05	3,59E-04
300,05193	36400,4375	-3,15E-04	-3,91E-04	7,56E-05	3,78E-04
300,0463	39200,44922	-3,42E-04	-4,21E-04	7,90E-05	3,95E-04
300,03699	42000,40234	-3,69E-04	-4,51E-04	8,22E-05	4,11E-04
300,02812	44800,32031	-3,96E-04	-4,81E-04	8,55E-05	4,27E-04
300,02417	47600,23828	-4,22E-04	-5,11E-04	8,91E-05	4,45E-04
300,02161	50400,3125	-4,49E-04	-5,41E-04	9,24E-05	4,62E-04
300,01913	53200,36328	-4,77E-04	-5,71E-04	9,47E-05	4,74E-04
300,01881	56000,35547	-5,03E-04	-6,02E-04	9,87E-05	4,93E-04
300,04724	58800,40234	-5,30E-04	-6,32E-04	1,02E-04	5,09E-04
300,05539	61600,41797	-5,57E-04	-6,62E-04	1,05E-04	5,26E-04
300,05917	64400,41016	-5,84E-04	-6,93E-04	1,08E-04	5,40E-04
300,05249	67200,35156	-6,12E-04	-7,23E-04	1,11E-04	5,53E-04
300,04785	70000,35938	-6,40E-04	-7,53E-04	1,13E-04	5,67E-04

300,03877	67200,39844	-6,11E-04	-7,22E-04	1,11E-04	5,57E-04
300,03525	64400,46094	-5,84E-04	-6,92E-04	1,09E-04	5,43E-04
300,02428	61600,43359	-5,57E-04	-6,61E-04	1,05E-04	5,24E-04
300,01695	58800,41406	-5,29E-04	-6,31E-04	1,02E-04	5,11E-04
300,01593	56000,41797	-5,02E-04	-6,01E-04	9,93E-05	4,96E-04
300,03453	53200,39063	-4,76E-04	-5,71E-04	9,55E-05	4,78E-04
300,05132	50400,35938	-4,48E-04	-5,41E-04	9,30E-05	4,65E-04
300,04114	47600,28516	-4,22E-04	-5,11E-04	8,93E-05	4,46E-04
300,03171	44800,47656	-3,94E-04	-4,80E-04	8,60E-05	4,30E-04
300,0222	42000,23438	-3,68E-04	-4,50E-04	8,24E-05	4,12E-04
300,01581	39200,44922	-3,41E-04	-4,20E-04	7,94E-05	3,97E-04
300,01468	36400,46094	-3,14E-04	-3,90E-04	7,63E-05	3,82E-04
300,0144	33600,35938	-2,88E-04	-3,60E-04	7,22E-05	3,61E-04
300,02275	30800,20898	-2,61E-04	-3,30E-04	6,93E-05	3,46E-04
300,02109	28000,10938	-2,35E-04	-3,00E-04	6,49E-05	3,24E-04
300,01433	25200,24219	-2,08E-04	-2,70E-04	6,16E-05	3,08E-04
300,00842	22400,41016	-1,82E-04	-2,40E-04	5,82E-05	2,91E-04
300,00742	19600,4707	-1,56E-04	-2,10E-04	5,42E-05	2,71E-04
300,00418	16800,30859	-1,29E-04	-1,80E-04	5,06E-05	2,53E-04
300,00974	14000,45117	-1,03E-04	-1,50E-04	4,66E-05	2,33E-04
300,01862	11200,20508	-7,67E-05	-1,20E-04	4,29E-05	2,14E-04
300,0164	8400,27637	-5,07E-05	-8,96E-05	3,89E-05	1,94E-04
300,01389	5600,12695	-2,47E-05	-5,97E-05	3,50E-05	1,75E-04
300,01068	5500,39893	-2,39E-05	-5,87E-05	3,49E-05	1,74E-04
300,03217	5000,37939	-1,92E-05	-5,33E-05	3,41E-05	1,70E-04
300,05074	4802,36377	-1,74E-05	-5,12E-05	3,37E-05	1,69E-04
300,04996	4608,21729	-1,58E-05	-4,89E-05	3,31E-05	1,66E-04
300,05351	4418,20947	-1,41E-05	-4,72E-05	3,32E-05	1,66E-04
300,05016	4232,27832	-1,23E-05	-4,52E-05	3,29E-05	1,65E-04
300,04071	4050,11865	-1,07E-05	-4,32E-05	3,25E-05	1,62E-04
300,03793	3872,427	-9,13E-06	-4,13E-05	3,22E-05	1,61E-04
300,05113	3698,22607	-7,56E-06	-3,94E-05	3,19E-05	1,59E-04
300,05766	3528,17603	-6,04E-06	-3,77E-05	3,16E-05	1,58E-04
300,07863	3362,34912	-4,49E-06	-3,59E-05	3,14E-05	1,57E-04
300,0836	3200,25732	-3,08E-06	-3,42E-05	3,11E-05	1,55E-04
300,07523	3042,05957	-1,29E-06	-3,25E-05	3,12E-05	1,56E-04
300,07004	2888,39063	-3,37E-07	-3,08E-05	3,05E-05	1,52E-04
300,08055	2738,10254	8,62E-07	-2,93E-05	3,02E-05	1,51E-04
300,07953	2592,39233	1,68E-06	-2,77E-05	2,93E-05	1,47E-04
300,07506	2450,24634	3,39E-06	-2,61E-05	2,94E-05	1,47E-04
300,08162	2311,9209	4,41E-06	-2,48E-05	2,92E-05	1,46E-04
300,07487	2178,31934	5,43E-06	-2,33E-05	2,87E-05	1,44E-04
300,06461	2048,17261	6,53E-06	-2,19E-05	2,84E-05	1,42E-04
300,05107	1922,35913	7,54E-06	-2,06E-05	2,81E-05	1,41E-04
300,04251	1800,45154	8,42E-06	-1,92E-05	2,77E-05	1,38E-04
300,03239	1682,47449	9,27E-06	-1,81E-05	2,74E-05	1,37E-04
300,02669	1568,26941	1,01E-05	-1,68E-05	2,69E-05	1,35E-04
300,02013	1458,20239	1,07E-05	-1,57E-05	2,64E-05	1,32E-04

300,01563	1352,39539	1,15E-05	-1,47E-05	2,62E-05	1,31E-04
300,0116	1250,33594	1,13E-05	-1,32E-05	2,45E-05	1,23E-04
300,02356	1152,14587	1,24E-05	-1,25E-05	2,48E-05	1,24E-04
300,05241	1058,22815	1,27E-05	-1,17E-05	2,44E-05	1,22E-04
300,0562	968,43634	1,27E-05	-1,06E-05	2,33E-05	1,17E-04
300,06041	882,37964	1,29E-05	-9,79E-06	2,26E-05	1,13E-04
300,0862	800,44885	1,27E-05	-9,31E-06	2,20E-05	1,10E-04
300,08665	722,38757	1,24E-05	-8,26E-06	2,07E-05	1,03E-04
300,08818	648,37885	1,21E-05	-7,47E-06	1,96E-05	9,78E-05
300,07968	578,22742	1,18E-05	-6,60E-06	1,84E-05	9,20E-05
300,07584	512,22626	1,12E-05	-6,13E-06	1,74E-05	8,69E-05
300,09041	450,38751	1,03E-05	-5,47E-06	1,58E-05	7,91E-05
300,10155	392,30844	9,82E-06	-4,93E-06	1,47E-05	7,37E-05
300,09064	338,20871	8,68E-06	-4,58E-06	1,33E-05	6,63E-05
300,07535	288,43011	8,03E-06	-3,97E-06	1,20E-05	6,00E-05
300,06024	242,42339	6,92E-06	-3,50E-06	1,04E-05	5,21E-05
300,05069	200,22513	6,15E-06	-2,75E-06	8,90E-06	4,45E-05
300,03964	162,32358	5,13E-06	-2,34E-06	7,48E-06	3,74E-05
300,03436	128,2061	4,21E-06	-2,01E-06	6,22E-06	3,11E-05
300,0419	98,21444	3,29E-06	-1,67E-06	4,96E-06	2,48E-05
300,04916	72,37303	2,83E-06	-1,23E-06	4,06E-06	2,03E-05
300,04562	50,30347	1,51E-06	-1,00E-06	2,51E-06	1,26E-05
300,04132	32,37195	1,08E-06	-7,65E-07	1,85E-06	9,23E-06
300,03494	18,24889	7,57E-07	-6,21E-07	1,38E-06	6,89E-06
300,0323	8,26388	4,42E-07	-2,85E-07	7,27E-07	3,63E-06
300,0535	2,24602	3,22E-07	-1,32E-07	4,54E-07	2,27E-06
300,05423	-0,04883	4,45E-07	1,51E-07	2,94E-07	1,47E-06
300,04797	-1,97747	3,74E-07	2,01E-07	1,72E-07	8,62E-07
300,04448	-8,03195	1,27E-07	2,37E-07	-1,10E-07	-5,51E-07
300,04298	-17,82166	-2,50E-07	2,60E-07	-5,11E-07	-2,55E-06
300,07243	-31,98133	-8,99E-07	3,55E-07	-1,25E-06	-6,27E-06
300,10699	-49,92506	-1,59E-06	5,65E-07	-2,15E-06	-1,08E-05
300,11835	-71,83594	-2,51E-06	5,99E-07	-3,11E-06	-1,55E-05
300,14188	-97,60411	-2,88E-06	1,09E-06	-3,98E-06	-1,99E-05
300,13094	-127,60796	-3,73E-06	1,58E-06	-5,31E-06	-2,66E-05
300,12459	-161,57898	-4,83E-06	1,99E-06	-6,83E-06	-3,41E-05
300,1385	-199,65141	-5,91E-06	2,57E-06	-8,48E-06	-4,24E-05
300,12953	-241,76425	-7,52E-06	3,21E-06	-1,07E-05	-5,37E-05
300,1163	-287,72214	-7,91E-06	3,62E-06	-1,15E-05	-5,77E-05
300,11928	-337,7937	-9,24E-06	4,63E-06	-1,39E-05	-6,94E-05
300,11006	-391,80798	-1,02E-05	5,03E-06	-1,52E-05	-7,61E-05
300,1145	-449,86264	-1,06E-05	5,79E-06	-1,64E-05	-8,20E-05
300,11247	-511,67694	-1,12E-05	6,39E-06	-1,76E-05	-8,78E-05
300,10278	-577,87341	-1,20E-05	6,93E-06	-1,89E-05	-9,46E-05
300,11369	-647,86615	-1,24E-05	7,88E-06	-2,03E-05	-1,01E-04
300,105	-721,63074	-1,27E-05	8,62E-06	-2,13E-05	-1,07E-04
300,08908	-799,80188	-1,28E-05	9,45E-06	-2,23E-05	-1,11E-04
300,07391	-881,86694	-1,24E-05	1,01E-05	-2,25E-05	-1,13E-04

300,0576	-967,58191	-1,29E-05	1,10E-05	-2,39E-05	-1,20E-04
300,04842	-1057,89856	-1,26E-05	1,16E-05	-2,42E-05	-1,21E-04
300,04187	-1151,73083	-1,20E-05	1,29E-05	-2,49E-05	-1,24E-04
300,03223	-1249,67676	-1,12E-05	1,40E-05	-2,52E-05	-1,26E-04
300,02435	-1351,67529	-1,09E-05	1,54E-05	-2,63E-05	-1,31E-04
300,02084	-1457,7019	-1,04E-05	1,63E-05	-2,67E-05	-1,34E-04
300,0175	-1567,97644	-9,65E-06	1,73E-05	-2,70E-05	-1,35E-04
300,01485	-1681,81543	-8,77E-06	1,88E-05	-2,76E-05	-1,38E-04
300,02136	-1799,60913	-7,97E-06	2,01E-05	-2,80E-05	-1,40E-04
300,04379	-1921,84631	-6,95E-06	2,14E-05	-2,84E-05	-1,42E-04
300,04486	-2047,56226	-6,03E-06	2,29E-05	-2,90E-05	-1,45E-04
300,04239	-2177,84326	-4,86E-06	2,41E-05	-2,90E-05	-1,45E-04
300,04285	-2311,56689	-3,82E-06	2,55E-05	-2,93E-05	-1,47E-04
300,05844	-2449,79468	-2,76E-06	2,74E-05	-3,01E-05	-1,51E-04
300,05774	-2591,74536	-5,42E-07	2,83E-05	-2,89E-05	-1,44E-04
300,04968	-2737,49243	-7,07E-08	2,98E-05	-2,99E-05	-1,50E-04
300,03857	-2887,95117	1,05E-06	3,15E-05	-3,04E-05	-1,52E-04
300,02951	-3041,77881	2,56E-06	3,32E-05	-3,06E-05	-1,53E-04
300,0244	-3199,80566	3,92E-06	3,43E-05	-3,04E-05	-1,52E-04
300,02573	-3361,75098	5,24E-06	3,66E-05	-3,14E-05	-1,57E-04
300,03343	-3527,54126	6,44E-06	3,83E-05	-3,19E-05	-1,59E-04
300,03625	-3698,3606	8,24E-06	4,05E-05	-3,22E-05	-1,61E-04
300,04306	-3872,21973	9,78E-06	4,20E-05	-3,23E-05	-1,61E-04
300,03932	-4050,39966	1,14E-05	4,40E-05	-3,26E-05	-1,63E-04
300,03096	-4232,32715	1,31E-05	4,58E-05	-3,27E-05	-1,64E-04
300,02812	-4418,16064	1,49E-05	4,79E-05	-3,30E-05	-1,65E-04
300,02991	-4608,47363	1,66E-05	4,99E-05	-3,33E-05	-1,66E-04
300,02733	-4802,16846	1,83E-05	5,20E-05	-3,36E-05	-1,68E-04
300,02153	-5000,19629	2,01E-05	5,41E-05	-3,41E-05	-1,70E-04
300,01564	-5500,33789	2,47E-05	5,94E-05	-3,47E-05	-1,74E-04
300,01782	-5600,31006	2,54E-05	6,02E-05	-3,48E-05	-1,74E-04
300,02773	-8400,4834	5,17E-05	9,05E-05	-3,89E-05	-1,94E-04
300,0251	-11200,35156	7,81E-05	1,20E-04	-4,24E-05	-2,12E-04
300,0197	-14000,3418	1,04E-04	1,51E-04	-4,61E-05	-2,31E-04
300,0179	-16800,47852	1,31E-04	1,81E-04	-4,99E-05	-2,50E-04
300,02411	-19600,33594	1,57E-04	2,11E-04	-5,34E-05	-2,67E-04
300,0284	-22400,38672	1,84E-04	2,41E-04	-5,71E-05	-2,86E-04
300,04395	-25200,30469	2,10E-04	2,71E-04	-6,06E-05	-3,03E-04
300,04512	-28000,26953	2,37E-04	3,01E-04	-6,38E-05	-3,19E-04
300,05721	-30800,39453	2,63E-04	3,31E-04	-6,75E-05	-3,37E-04
300,06181	-33600,34766	2,90E-04	3,61E-04	-7,03E-05	-3,51E-04
300,05478	-36400,27734	3,17E-04	3,91E-04	-7,41E-05	-3,71E-04
300,04256	-39200,39063	3,44E-04	4,21E-04	-7,72E-05	-3,86E-04
300,03296	-42000,36719	3,70E-04	4,51E-04	-8,06E-05	-4,03E-04
300,02548	-44800,26172	3,97E-04	4,81E-04	-8,39E-05	-4,20E-04
300,02251	-47600,26172	4,24E-04	5,11E-04	-8,69E-05	-4,34E-04
300,03304	-50400,34766	4,52E-04	5,41E-04	-8,97E-05	-4,49E-04
300,02901	-53200,28906	4,79E-04	5,71E-04	-9,29E-05	-4,65E-04

300,02332	-56000,30469	5,06E-04	6,02E-04	-9,60E-05	-4,80E-04
300,01788	-58800,29688	5,33E-04	6,32E-04	-9,91E-05	-4,95E-04
300,01373	-61600,45703	5,60E-04	6,62E-04	-1,02E-04	-5,11E-04
300,00804	-64400,47266	5,87E-04	6,92E-04	-1,05E-04	-5,26E-04
300,00543	-67200,4375	6,15E-04	7,23E-04	-1,08E-04	-5,38E-04
300,00285	-70000,19531	6,44E-04	7,53E-04	-1,09E-04	-5,46E-04
300,00171	-67200,21094	6,14E-04	7,22E-04	-1,08E-04	-5,38E-04
300,00175	-64400,38672	5,87E-04	6,92E-04	-1,05E-04	-5,23E-04
300,00363	-61600,26172	5,59E-04	6,61E-04	-1,02E-04	-5,12E-04
300,02225	-58800,40234	5,32E-04	6,31E-04	-9,92E-05	-4,96E-04
300,02245	-56000,42969	5,05E-04	6,02E-04	-9,69E-05	-4,84E-04
300,01717	-53200,40234	4,78E-04	5,71E-04	-9,31E-05	-4,66E-04
300,01462	-50400,46094	4,51E-04	5,41E-04	-8,99E-05	-4,50E-04
300,01585	-47600,37109	4,23E-04	5,10E-04	-8,71E-05	-4,36E-04
300,02966	-44800,33203	3,96E-04	4,80E-04	-8,38E-05	-4,19E-04
300,02911	-42000,32031	3,70E-04	4,50E-04	-8,01E-05	-4,01E-04
300,01917	-39200,28906	3,43E-04	4,20E-04	-7,72E-05	-3,86E-04
300,01494	-36400,35938	3,16E-04	3,90E-04	-7,43E-05	-3,72E-04
300,01425	-33600,28516	2,89E-04	3,60E-04	-7,08E-05	-3,54E-04
300,02354	-30800,47852	2,63E-04	3,30E-04	-6,71E-05	-3,36E-04
300,02281	-28000,17188	2,36E-04	3,00E-04	-6,37E-05	-3,19E-04
300,01775	-25200,4375	2,09E-04	2,70E-04	-6,02E-05	-3,01E-04
300,01352	-22400,36133	1,83E-04	2,40E-04	-5,67E-05	-2,83E-04
300,02281	-19600,31055	1,56E-04	2,10E-04	-5,35E-05	-2,67E-04
300,02042	-16800,32031	1,30E-04	1,80E-04	-4,98E-05	-2,49E-04
300,01479	-14000,18262	1,03E-04	1,50E-04	-4,63E-05	-2,31E-04
300,01176	-11200,37598	7,72E-05	1,20E-04	-4,25E-05	-2,12E-04
300,00819	-8400,45898	5,10E-05	8,96E-05	-3,85E-05	-1,93E-04
300,00702	-5600,28613	2,50E-05	5,97E-05	-3,48E-05	-1,74E-04
300,01027	-5500,27686	2,40E-05	5,86E-05	-3,46E-05	-1,73E-04
300,02791	-5000,26953	1,94E-05	5,32E-05	-3,38E-05	-1,69E-04
300,02515	-4802,42432	1,77E-05	5,12E-05	-3,36E-05	-1,68E-04
300,02264	-4608,2417	1,59E-05	4,91E-05	-3,33E-05	-1,66E-04
300,0177	-4418,34326	1,41E-05	4,70E-05	-3,29E-05	-1,64E-04
300,01474	-4232,47363	1,24E-05	4,51E-05	-3,27E-05	-1,63E-04
300,01231	-4050,48462	1,06E-05	4,31E-05	-3,25E-05	-1,62E-04
300,00964	-3872,21973	9,11E-06	4,12E-05	-3,21E-05	-1,61E-04
300,00885	-3698,42188	7,52E-06	3,94E-05	-3,19E-05	-1,59E-04
300,00876	-3528,23682	6,01E-06	3,76E-05	-3,16E-05	-1,58E-04
300,02881	-3362,44678	4,57E-06	3,58E-05	-3,13E-05	-1,56E-04
300,04039	-3200,15967	3,16E-06	3,41E-05	-3,09E-05	-1,55E-04
300,03688	-3042,1084	1,70E-06	3,24E-05	-3,07E-05	-1,53E-04
300,03418	-2888,26855	4,12E-07	3,09E-05	-3,05E-05	-1,52E-04
300,02693	-2737,99292	-8,25E-07	2,92E-05	-3,00E-05	-1,50E-04
300,02318	-2592,22144	-2,16E-06	2,77E-05	-2,99E-05	-1,49E-04
300,02121	-2450,14868	-3,33E-06	2,62E-05	-2,95E-05	-1,47E-04
300,02916	-2311,85986	-4,37E-06	2,47E-05	-2,91E-05	-1,46E-04
300,02638	-2178,22168	-5,49E-06	2,33E-05	-2,88E-05	-1,44E-04

300,02177	-2047,84314	-6,54E-06	2,19E-05	-2,84E-05	-1,42E-04
300,01819	-1922,26123	-7,52E-06	2,06E-05	-2,81E-05	-1,41E-04
300,01617	-1799,87781	-8,44E-06	1,91E-05	-2,76E-05	-1,38E-04
300,01355	-1681,94958	-9,35E-06	1,79E-05	-2,73E-05	-1,36E-04
300,01381	-1568,17188	-1,02E-05	1,68E-05	-2,70E-05	-1,35E-04
300,01703	-1457,99487	-1,08E-05	1,56E-05	-2,64E-05	-1,32E-04
300,01837	-1352,16357	-1,14E-05	1,44E-05	-2,58E-05	-1,29E-04
300,01622	-1250,07959	-1,19E-05	1,36E-05	-2,54E-05	-1,27E-04
300,01945	-1151,87744	-1,23E-05	1,27E-05	-2,50E-05	-1,25E-04
300,0408	-1058,20374	-1,27E-05	1,17E-05	-2,43E-05	-1,22E-04
300,04607	-968,04572	-1,28E-05	1,06E-05	-2,34E-05	-1,17E-04
300,05598	-882,29419	-1,30E-05	9,69E-06	-2,27E-05	-1,13E-04
300,0509	-800,10712	-1,28E-05	9,00E-06	-2,18E-05	-1,09E-04
300,04305	-721,85046	-1,27E-05	8,41E-06	-2,11E-05	-1,05E-04
300,03406	-648,17133	-1,22E-05	7,24E-06	-1,94E-05	-9,71E-05
300,02577	-578,08093	-1,17E-05	6,72E-06	-1,84E-05	-9,20E-05
300,02345	-511,89667	-1,10E-05	6,14E-06	-1,72E-05	-8,58E-05
300,02434	-450,16782	-1,06E-05	5,59E-06	-1,62E-05	-8,10E-05
300,02083	-392,12534	-9,66E-06	4,75E-06	-1,44E-05	-7,21E-05
300,01639	-338,12326	-9,29E-06	4,16E-06	-1,35E-05	-6,73E-05
300,01302	-287,92966	-7,94E-06	3,70E-06	-1,16E-05	-5,82E-05
300,02353	-241,75204	-7,24E-06	3,34E-06	-1,06E-05	-5,29E-05
300,04782	-200,01761	-6,02E-06	2,61E-06	-8,63E-06	-4,31E-05
300,05286	-161,89635	-4,69E-06	2,33E-06	-7,03E-06	-3,51E-05
300,0717	-127,93755	-4,07E-06	1,91E-06	-5,98E-06	-2,99E-05
300,07164	-97,76279	-3,22E-06	1,61E-06	-4,83E-06	-2,42E-05
300,08133	-71,7627	-2,24E-06	1,32E-06	-3,55E-06	-1,78E-05
300,10432	-49,86403	-1,80E-06	1,10E-06	-2,90E-06	-1,45E-05
300,09732	-31,77382	-1,24E-06	6,11E-07	-1,85E-06	-9,26E-06
300,08276	-17,76063	-8,06E-07	4,35E-07	-1,24E-06	-6,20E-06
300,06947	-7,76341	-4,23E-07	2,36E-07	-6,59E-07	-3,29E-06
300,05284	-1,98968	-3,02E-07	5,23E-08	-3,54E-07	-1,77E-06
300,04196	0,12207	-2,78E-07	-1,83E-07	-9,51E-08	-4,75E-07
300,03307	1,97747	-3,54E-07	-1,95E-07	-1,59E-07	-7,96E-07
300,0304	7,90989	-6,19E-08	-2,77E-07	2,15E-07	1,07E-06
300,02771	18,00476	3,05E-07	-3,65E-07	6,70E-07	3,35E-06
300,03975	31,95692	1,03E-06	-3,42E-07	1,37E-06	6,87E-06
300,05154	50,08375	1,53E-06	-5,41E-07	2,07E-06	1,04E-05
300,08113	71,958	2,43E-06	-8,40E-07	3,27E-06	1,64E-05
300,10829	97,79941	3,03E-06	-1,09E-06	4,12E-06	2,06E-05
300,11775	127,81548	4,17E-06	-1,63E-06	5,80E-06	2,90E-05
300,13669	161,90855	5,25E-06	-1,97E-06	7,21E-06	3,61E-05
300,16214	200,01761	6,37E-06	-2,60E-06	8,97E-06	4,48E-05
300,1859	242,0694	7,25E-06	-3,29E-06	1,05E-05	5,27E-05
300,179	288,05173	8,22E-06	-3,59E-06	1,18E-05	5,90E-05
300,15804	337,86694	9,18E-06	-4,28E-06	1,35E-05	6,73E-05
300,13371	391,79575	9,85E-06	-4,63E-06	1,45E-05	7,24E-05
300,1064	449,83826	1,06E-05	-5,25E-06	1,59E-05	7,94E-05

300,08707	511,71356	1,11E-05	-6,08E-06	1,72E-05	8,59E-05
300,06882	578,09314	1,21E-05	-7,31E-06	1,94E-05	9,68E-05
300,05611	647,86615	1,23E-05	-7,73E-06	2,01E-05	1,00E-04
300,04866	721,77722	1,24E-05	-8,50E-06	2,09E-05	1,04E-04
300,03934	800,0094	1,28E-05	-9,55E-06	2,23E-05	1,12E-04
300,03203	882,01349	1,27E-05	-1,02E-05	2,30E-05	1,15E-04
300,03293	967,80157	1,26E-05	-1,15E-05	2,42E-05	1,21E-04
300,04295	1058,03284	1,24E-05	-1,25E-05	2,49E-05	1,25E-04
300,05103	1152,0116	1,29E-05	-1,31E-05	2,61E-05	1,30E-04
300,07396	1249,88428	1,15E-05	-1,45E-05	2,59E-05	1,30E-04
300,07205	1351,8584	1,06E-05	-1,51E-05	2,58E-05	1,29E-04
300,07085	1457,88501	1,01E-05	-1,64E-05	2,66E-05	1,33E-04
300,08488	1568,11072	9,45E-06	-1,76E-05	2,70E-05	1,35E-04
300,10175	1682,05957	8,72E-06	-1,88E-05	2,75E-05	1,38E-04
300,09633	1799,49939	7,50E-06	-2,01E-05	2,77E-05	1,38E-04
300,09709	1921,80957	6,81E-06	-2,14E-05	2,82E-05	1,41E-04
300,10818	2047,81873	5,94E-06	-2,24E-05	2,83E-05	1,42E-04
300,10123	2178,02661	4,85E-06	-2,40E-05	2,88E-05	1,44E-04
300,0885	2311,79883	3,71E-06	-2,55E-05	2,92E-05	1,46E-04
300,08307	2449,94116	2,53E-06	-2,70E-05	2,95E-05	1,48E-04
300,08392	2592,17261	1,38E-06	-2,83E-05	2,97E-05	1,48E-04
300,10229	2737,94409	1,71E-07	-3,00E-05	3,02E-05	1,51E-04
300,09523	2888,20752	-1,01E-06	-3,12E-05	3,01E-05	1,51E-04
300,08179	3042,08398	-2,53E-06	-3,32E-05	3,07E-05	1,53E-04
300,07254	3200,29419	-4,11E-06	-3,50E-05	3,09E-05	1,54E-04
300,08153	3362,21484	-5,22E-06	-3,66E-05	3,14E-05	1,57E-04
300,10014	3527,96851	-6,77E-06	-3,85E-05	3,17E-05	1,58E-04
300,09782	3698,2749	-8,44E-06	-4,01E-05	3,17E-05	1,58E-04
300,08655	3872,36597	-9,84E-06	-4,22E-05	3,24E-05	1,62E-04
300,07368	4050,28955	-1,14E-05	-4,39E-05	3,25E-05	1,62E-04
300,06821	4232,48535	-1,32E-05	-4,60E-05	3,28E-05	1,64E-04
300,07697	4418,27051	-1,48E-05	-4,80E-05	3,31E-05	1,66E-04
300,0957	4608,27832	-1,65E-05	-4,99E-05	3,34E-05	1,67E-04
300,09464	4802,42432	-1,84E-05	-5,20E-05	3,36E-05	1,68E-04
300,08243	5000,45264	-2,02E-05	-5,42E-05	3,40E-05	1,70E-04
300,07547	5500,26465	-2,47E-05	-5,95E-05	3,47E-05	1,74E-04
300,08124	5600,33496	-2,54E-05	-6,03E-05	3,49E-05	1,75E-04
300,0739	8400,12891	-5,18E-05	-9,05E-05	3,87E-05	1,94E-04
300,07962	11200,24219	-7,81E-05	-1,21E-04	4,24E-05	2,12E-04
300,07089	14000,35449	-1,05E-04	-1,51E-04	4,60E-05	2,30E-04
300,08936	16800,38086	-1,31E-04	-1,81E-04	4,97E-05	2,49E-04
300,1078	19600,37109	-1,57E-04	-2,10E-04	5,32E-05	2,66E-04
300,09317	22400,11719	-1,84E-04	-2,41E-04	5,67E-05	2,84E-04
300,07336	25200,24219	-2,10E-04	-2,71E-04	6,02E-05	3,01E-04
300,05403	28000,31836	-2,37E-04	-3,01E-04	6,38E-05	3,19E-04
300,03903	30800,24805	-2,63E-04	-3,31E-04	6,74E-05	3,37E-04
300,03127	33600,40625	-2,90E-04	-3,61E-04	7,06E-05	3,53E-04
300,02132	36400,3125	-3,17E-04	-3,91E-04	7,42E-05	3,71E-04

300,0191	39200,16797	-3,44E-04	-4,21E-04	7,73E-05	3,87E-04
300,03557	42000,25781	-3,71E-04	-4,51E-04	8,02E-05	4,01E-04
300,03345	44800,47656	-3,97E-04	-4,81E-04	8,42E-05	4,21E-04
300,02634	47600,27344	-4,24E-04	-5,12E-04	8,75E-05	4,37E-04
300,0192	50400,28906	-4,51E-04	-5,41E-04	8,95E-05	4,47E-04
300,01469	53200,33984	-4,78E-04	-5,72E-04	9,35E-05	4,68E-04
300,01355	56000,32031	-5,05E-04	-6,02E-04	9,63E-05	4,81E-04
300,02324	58800,39844	-5,33E-04	-6,32E-04	9,93E-05	4,96E-04
300,01923	61600,35547	-5,61E-04	-6,63E-04	1,02E-04	5,10E-04
300,01552	64400,33594	-5,87E-04	-6,92E-04	1,05E-04	5,26E-04
300,01187	67200,32813	-6,15E-04	-7,23E-04	1,08E-04	5,41E-04
300,00887	70000,39063	-6,43E-04	-7,53E-04	1,10E-04	5,51E-04
