

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

CAROLINE FERNANDA LOPES BATISTA

ENCAPSULAMENTO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

CAROLINE FERNANDA LOPES BATISTA

ENCAPSULAMENTO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Ismael Chiamenti

CURITIBA

2017

CAROLINE FERNANDA LOPES BATISTA

Encapsulamento de Redes de Bragg em Fibra Ótica

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 21 de agosto de 2017

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Ismael Chiamenti, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Ismael Chiamenti, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jean Filipe Kuhne, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Valmir de Oliveira, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

"A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica"

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, responsável por todas as dádivas recorrentes em minha vida.

Gratidão aos meus pais e familiares, que sempre me apoiaram e foram meu alicerce; ao meu amigo Leonardo Santana e colega de laboratório, que me auxiliou e acompanhou todos os experimentos.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Ismael Chiamenti, que se dispôs a me ajudar na realização desse projeto.

RESUMO

BATISTA, Caroline Fernanda Lopes. Encapsulamento de Redes de Bragg em Fibra Ótica. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o processo de encapsulamento de sensores de fibra ótica baseada em redes de Bragg para aplicações em medições de temperaturas, variando de 5°C a 60°C. São propostos o uso de quatro materiais para recobrimento das FBG's: silicone, Super Bonder convencional, Super Bonder Gel e tubo metálico. Foram realizados testes, em laboratório, destes sensores encapsulados e os resultados obtidos do desempenho deles estão apresentados neste trabalho. Foi possível demonstrar que a sensibilidade nos sensores é dada de forma linear, isto é, quanto maior a temperatura maior o comprimento de onda. Ao passo que quanto maior o comprimento de onda, maior o tempo de estabilização e, conseqüente, inércia térmica.

Palavras-chave: Sensores Óticos. Encapsulamento. Redes de Bragg em Fibra. Sensor de Temperatura.

ABSTRACT

BATISTA, Caroline Fernanda Lopes. Encapsulation of Bragg Networks in Optical Fiber. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

This work presents the process of encapsulation of optical fiber sensors in Bragg networks for applications in temperature measurements ranging from 5 ° C to 60 ° C. Four materials for the FBG coating are proposed: Silicone, conventional Super Bonder, Super Bonder Gel and metal tube. The encapsulated sensors performance have been evaluated and the results are shown in this paper. It was possible to demonstrate that the sensitivity in the sensors is given by a linear way, that is, the higher temperatures implies longer wavelengths. Then, the longer wavelengths implies longer stabilization time and, consequently, the thermal inertia.

Keywords: Optical Sensors. Encapsulation. Fiber Bragg Grating. Temperature Sensor.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Reflexão da luz em uma fibra ótica com rede de Bragg.....	19
Figura 2 - Técnica de gravação de redes de Bragg através de uma máscara de fase.	20
Figura 3 - Espectro de reflexão de uma rede de Bragg em função da temperatura evidenciando-se um comportamento aproximadamente linear entre 0°C a 60°C.	21
Figura 4 - <i>Peltier</i> utilizado para os ensaios no Laboratório Foton.	24
Figura 5 - Controlador de temperatura (TED 200) utilizado para os ensaios no Laboratório Foton.	24
Figura 6 - Interrogador ótico SM 125.....	25
Figura 7 - Máquina de fusão Fujikura®.	25
Figura 8 - Agulha anestésica espinhal raquidiana Procure®.....	26

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento.	29
Quadro 2 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® convencional.	30
Quadro 3 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® gel.	31
Quadro 4 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® convencional e um tubo metálico.	32
Quadro 5 - Sensibilidade do sensor com Silicone.	33
Quadro 6 - Sensibilidade das FBG's encapsuladas.	34

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento.....	29
Gráfico 2 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® convencional.	30
Gráfico 3 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® gel.	31
Gráfico 4 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® convencional e um tubo metálico.....	32
Gráfico 5 - Sensibilidade do sensor com Silicone.	33
Gráfico 6 – Comparativo da sensibilidade dos encapsulamentos.	34
Gráfico 7 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 5°C.....	40
Gráfico 8 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 10°C.....	40
Gráfico 9 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 15°C.....	41
Gráfico 10 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 20°C.....	41
Gráfico 11 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 25°C.....	42
Gráfico 12 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 30°C.....	42
Gráfico 13 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 35°C.....	43
Gráfico 14 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 40°C.....	43
Gráfico 15 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 45°C.....	44
Gráfico 16 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 50°C.....	44
Gráfico 17 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 55°C.....	45
Gráfico 18 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 60°C.....	45
Gráfico 19 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 5°C.	46
Gráfico 20 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 10°C.	46
Gráfico 21 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 15°C.	47
Gráfico 22 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 20°C.	47
Gráfico 23 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 25°C.	48
Gráfico 24 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 30°C.	48

Gráfico 25 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 35°C.	49
Gráfico 26 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 40°C.	49
Gráfico 27 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 45°C.	50
Gráfico 28 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 50°C.	50
Gráfico 29 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 55°C.	51
Gráfico 30 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 60°C.	51
Gráfico 31 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 5°C.	52
Gráfico 32 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 10°C.	52
Gráfico 33 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 15°C.	53
Gráfico 34 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 20°C.	53
Gráfico 35 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 25°C.	54
Gráfico 36 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 30°C.	54
Gráfico 37 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 35°C.	55
Gráfico 38 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 40°C.	55
Gráfico 39 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 45°C.	56
Gráfico 40 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 50°C.	56
Gráfico 41 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 55°C.	57

Gráfico 42 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 60°C.	57
Gráfico 43 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 5°C.	58
Gráfico 44 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 10°C.	58
Gráfico 45 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 15°C.	59
Gráfico 46 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 20°C.	59
Gráfico 47 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 25°C.	60
Gráfico 48 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 30°C.	60
Gráfico 49 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 35°C.	61
Gráfico 50 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 40°C.	61
Gráfico 51 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 45°C.	62
Gráfico 52 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 50°C.	62
Gráfico 53 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 55°C.	63
Gráfico 54 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 60°C.	63
Gráfico 55 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 5°C.	64
Gráfico 56 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 10°C.	64
Gráfico 57 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 15°C.	65
Gráfico 58 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 20°C.	65
Gráfico 59 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 25°C.	66
Gráfico 60 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 30°C.	66
Gráfico 61 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 35°C.	67
Gráfico 62 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 40°C.	67

Gráfico 63 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 45°C. .68

Gráfico 64 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 50°C. .68

Gráfico 65 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 55°C. .69

Gráfico 66 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 60°C. .69

LISTA DE SIGLAS

FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> (Rede de Bragg em Fibra)
PVC	Cloreto de Polivinila
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 TEMA.....	14
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 JUSTIFICATIVA.....	16
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 REDES DE BRAGG.....	18
2.2 TÉCNICA DE GRAVAÇÃO: MÁSCARA DE FASE.....	19
2.3 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EMPREGANDO REDES DE BRAGG.....	20
2.4 ENCAPSULAMENTO DA FBG.....	22
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	23
3.1 LOCAL.....	23
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	23
3.3 PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO.....	27
3.4 ESTRUTURA PARA O ENSAIO.....	28
4. RESULTADOS.....	29
5. CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS.....	36
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE DOS SENSORES.....	39

1. INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Em 1958, com a criação do laser e, em seguida, suas posteriores aplicações práticas, impulsionaram pesquisas e o desenvolvimento dos sistemas de comunicação com fibras óticas. Devido a sua fonte luminosa com potência e alta capacidade de transmissão, possibilitou-se o surgimento de sistemas de longo alcance. A utilização das fibras de vidro em sistemas de transmissão, do tipo monomodo, surgiu apenas em 1966, na Inglaterra (Cunha, 2007).

Como resultado de estudos, principalmente em países desenvolvidos, houveram progressos na produção de fibras óticas com baixas perdas. Devido à necessidade de se obter sistemas rápidos e que suportem grandes quantidades de informações, estudos nessa área estão em prosseguimento (Cunha, 2007).

Em 1978, Hill e colaboradores, descobriram a fotossensibilidade em fibras de sílica com núcleo dopado com germânio, permitindo o desenvolvimento de dispositivos como as redes de Bragg inscritas em fibra. Depois de 11 anos, em 1989, validou-se a possibilidade de aplicação dessas redes como sensores de temperatura e deformação (Silva, 2011).

A indústria optoeletrônica, com o surgimento dos sensores de fibra ótica, proporcionou que, se uma grandeza física como a temperatura, atue sobre as propriedades físicas da fibra, as características da radiação que se propaga nela são modificadas, podendo ser determinada as variações dessa grandeza através de um sistema de leitura adequado (Cunha, 2007).

Sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica estão cada vez mais acessíveis no campo de instrumentação. Graças a essa acessibilidade, crê-se que estes dispositivos deixarão de ser uma solução para ensaios especiais e passarão a ser utilizados em aplicações comuns (Silva, 2011).

1.1.1 Delimitação do Tema

Este trabalho de conclusão de curso consiste em apresentar quatro formas de encapsulamentos de redes de Bragg e, em laboratório, verificar a sensibilidade desses sensores encapsulados em determinadas condições de temperatura.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Há uma grande variedade de sensores disponíveis no mercado que permitem monitorar a temperatura em distintas formas de aplicações. A tecnologia evoluiu nos últimos anos, possibilitando melhorias e mostrando que sensores baseados em fibra ótica irão se tornar uma opção viável para substituir os atuais sensores eletrônicos na monitorização de temperatura, pressão e vibração. Devido às vantagens que a própria fibra ótica proporciona, tais como: maior sensibilidade, massa reduzida e imunidade a interferências eletromagnéticas, que essa substituição está ocorrendo (Paixão, 2016).

As fibras óticas de vidro, atualmente com maior aplicação no mercado, quando manuseadas incorretamente ou sujeitas a severas condições de trabalho, podem sofrer danos. Além disso, o próprio processo de gravação das redes de Bragg em fibra ótica (FBG) fragiliza mecanicamente a fibra. Sendo assim, as FBG's necessitam da proteção de um encapsulamento apropriado, deixando-o mais robusto para aplicações em campo e estendendo a sua vida útil, porém, esse recobrimento implica em mudanças na resposta do sensor, sendo fundamental a caracterização do dispositivo em função da variável de interesse (temperatura, torção, vibração, entre outros).

Neste contexto, o recobrimento tem que oferecer o melhor custo x benefício, isto é, apresentar a proteção adequada e preservar a sensibilidade do sensor.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é caracterizar, em temperatura, as FBG's quando recobertas por materiais simples e de baixo custo, avaliando sua sensibilidade térmica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar as redes de Bragg de fibra ótica e suas aplicações;
- Implementar encapsulamentos em sensores de fibra ótica com diferentes materiais e avaliar seu desempenho quando submetido a determinadas temperaturas;
- Verificar se recobrimentos oferecem maior ou menor sensibilidade térmica.

1.4 JUSTIFICATIVA

Tanto na indústria como em laboratórios, monitorizações de diversos parâmetros são constantes, tais como: densidade dos materiais, pressão, condutividade elétrica, índice de refração, rigidez, entre outros. Estes parâmetros citados têm, em sua maioria, dependência com a temperatura dos materiais e do ambiente em que se encontra. Sendo assim, a correta leitura dessa grandeza está ligada com a qualidade da medição e a confiabilidade dos dados coletados (Paixão, 2016).

Os sensores de fibra ótica apresentam algumas vantagens como a capacidade de multiplexação dos sinais de vários sensores, mesmo monitorando grandezas distintas, e a coleta de medidas continuamente ao longo da fibra sensora (Cunha, 2007).

Dependendo do ambiente que o sensor for instalado, é necessária uma proteção adequada, mas é imprescindível manter a sensibilidade da rede de Bragg, sem danificá-la.

Para isso, é proposto, nesse trabalho, o recobrimento dos sensores FBG's com quatro materiais distintos, sendo verificado o comportamento dos sensores quando submetidos a variações de temperaturas de 5°C a 60°C.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização deste trabalho foram definidos os seguintes passos:

- Levantamento da bibliografia relacionada com o assunto, tais como livros, artigos e análise de projetos existentes;
- Estudo dos materiais para encapsulamento;
- Verificação da forma mais prática e viável para aplicação do recobrimento no sensor;
- Realização de testes com os sensores sem e com encapsulamento;
- Verificação da sensibilidade térmica dos sensores com recobrimentos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento desse trabalho apresenta a seguinte estrutura:

- Primeiro capítulo – Aborda a apresentação de uma proposta concisa, delimitando o tema, os objetivos e a justificativa do trabalho desenvolvido;
- Segundo capítulo – Apresenta a revisão bibliográfica e os conceitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho;
- Terceiro capítulo – Delimita os procedimentos experimentais, explicando todo o trabalho prático desenvolvido em laboratório;
- Quarto capítulo – Expõe os resultados obtidos com os ensaios em laboratório, através de quadros e gráficos;
- Quinto capítulo – Contempla as conclusões acerca do projeto elaborado e sugere trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 REDES DE BRAGG

Com o desenvolvimento de sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas (FBG), aumentaram-se as aplicações de monitoramento estrutural, industrial, instrumentação de máquinas elétricas e afins. Estes sensores são aplicados nas medições de temperatura, deformação, pressão, vibração, entre outros (Pereira, 2016).

As primeiras redes de Bragg permanentes inscritas em fibra ótica foram gravadas por Hill *et al.*, em 1978. Uma fibra dopada de germânio foi iluminada com radiação emitida por um *laser* de 480 nm. Posteriormente, demonstraram que a intensidade da radiação refletida, devido ao fenômeno não linear conhecido como fotossensibilidade, aumentou até atingir quase a reflexão total. Em seguida, depois de algumas demonstrações, foi sugerido que a fotossensibilidade seria um resultante do processo de absorção de dois fótons, tendo origem na matriz de sílica (Dias, 2016). Carvalho (2010), diz que Hill e colaboradores, para explicar o comprimento de onda de ressonância do filtro, utilizaram o conhecimento do comprimento de onda de Bragg, dada pela Equação 1:

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (1)$$

onde n_{ef} é o índice de refração efetivo da rede de Bragg no núcleo da fibra e Λ é o período espacial de modulação do índice de refração ao longo da fibra.

A Figura 1 representa, esquematicamente, uma rede de Bragg e os aspectos óticos associados. Devido aos efeitos termo ótico e foto elástico presentes na estrutura da fibra, as redes de Bragg apresentam sensibilidade a grandezas físicas de temperatura e deformação. Isso faz com que tais efeitos provoquem mudanças na periodicidade espacial, Λ , e no índice de refração efetivo, n_{ef} , resultando em um deslocamento do comprimento de onda de Bragg.

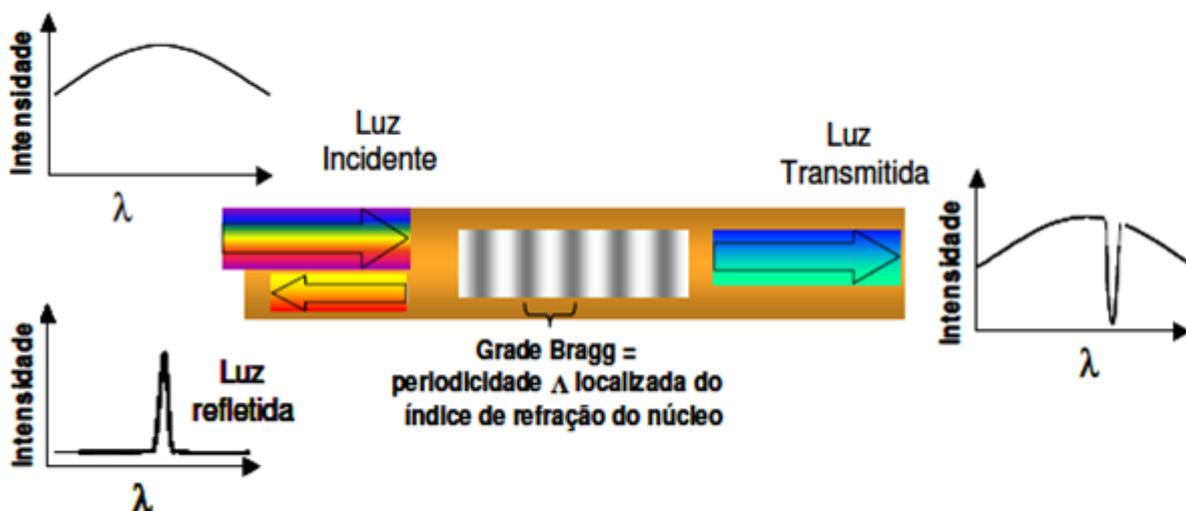


Figura 1 - Reflexão da luz em uma fibra óptica com rede de Bragg.
 Fonte: Cunha (2007) apud Neves (2005).

2.2 TÉCNICA DE GRAVAÇÃO: MÁSCARA DE FASE

Desde que foi descoberta que as FBG podem ser fabricadas por método externo, várias variações deste método foram propostas com o intuito de otimizar as características das redes. Basicamente, existem três técnicas de gravação externa de redes de Bragg em fibra óptica: interferométricas, não-interferométricas e por máscara de fase (Schiller, 2009).

Na década de 80, Meltz *et. al.* apresentaram o método de gravação da FBG onde uma exposição lateral com um padrão de interferência no ultravioleta realiza a modulação do índice de refração no núcleo da fibra, o holográfico. Hill e colaboradores (1993), exibiram o método de gravação por máscara de fase, mais utilizado atualmente devido a reprodutibilidade na fabricação do sensor (Carvalho, 2010).

A máscara de fase é uma rede de difração com depressões longitudinais na superfície da sílica fundida e apresenta vantagens por ser um elemento compacto e o sistema por ela formado não apresenta sensibilidade a vibrações mecânicas. É válido ressaltar que o período da rede gravada depende apenas do período da máscara de fase, e não do comprimento de onda incidente sobre a máscara (Schiller, 2009).

Quando a radiação UV incide sobre a máscara de fase, a sobreposição dos feixes transmitidos forma um padrão de interferência sobre a fibra, correspondentes às ordens +1e -1 de difração, conforme Figura 2.

Na Equação 2, temos que o padrão de interferência dos dois feixes sobre a fibra tem um período da rede de Bragg, Λ , em função do ângulo de difração, $\theta_m/2$, dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2\text{sen}(\frac{\theta_m}{2})} = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (2)$$

onde Λ_{mf} é o período da máscara de fase e λ_{UV} o comprimento de onda da radiação UV.

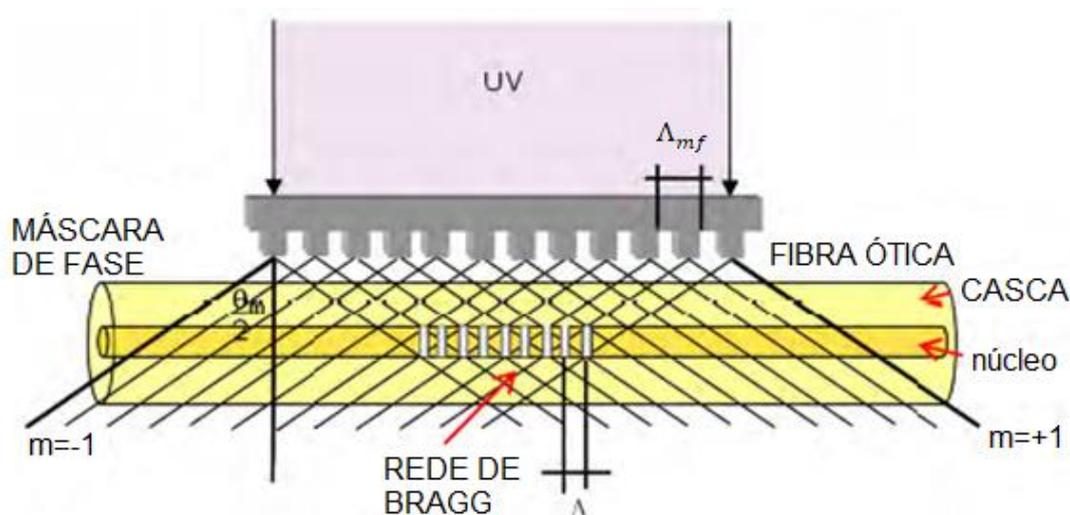


Figura 2 - Técnica de gravação de redes de Bragg através de uma máscara de fase.
Fonte: Schiller (2009).

2.3 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EMPREGANDO REDES DE BRAGG

A sensibilidade da FBG para temperatura, em fibras de sílica, tem um valor de 13,7 pm/°C, aproximadamente. Para medição de grandezas como temperatura e deformação, a rede de Bragg em fibra óptica utilizada como sensor é uma excelente alternativa. Uma grandeza externa, como a temperatura, altera o comprimento de onda de Bragg conforme variação no período de modulação da rede e também pela variação do índice de refração efetivo do modo propagado, provocando um deslocamento espectral do pico refletido da FBG (Kersey *et al.*, 1997).

Temos, então, que a utilização como sensor de temperatura é uma das formas de aplicação da FBG, podendo ser determinada através da diferenciação da expressão do comprimento de onda dada pela Equação 3.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\Delta n_{ef}}{\Delta T} \right) \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T = \beta_T \Delta T \quad (3)$$

Onde:

β_T – sensibilidade térmica do sensor;

α – coeficiente de expansão térmica da fibra;

ζ – coeficiente termo-ótico (dependência do índice de refração na temperatura);

n_{ef} – índice de refração;

ΔT – variação da temperatura;

λ_B – comprimento de onda de Bragg.

A Figura 3 expõe o resultado experimental da resposta de uma rede de Bragg inserida em um forno, com temperatura variando entre 0°C e 60°C, bem próximo do que será desenvolvido nesse trabalho de conclusão de curso. Se submetida a baixas variações térmicas, a FBG apresenta uma resposta quase linear.

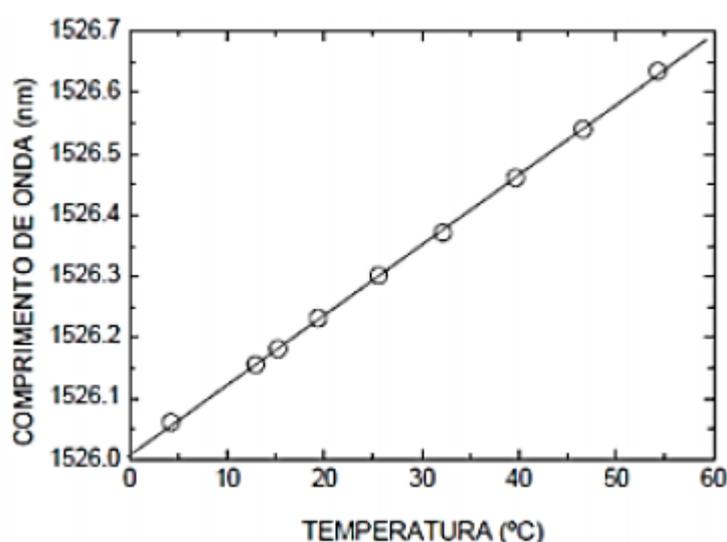


Figura 3 - Espectro de reflexão de uma rede de Bragg em função da temperatura evidenciando-se um comportamento aproximadamente linear entre 0°C a 60°C.

Fonte: Luo *et al.* (2001).

2.4 ENCAPSULAMENTO DA FBG

Quando não encapsulados corretamente, as FBG's apresentam fragilidade a esforços mecânicos, podendo impossibilitar a aplicação onde necessita-se de monitorização (Galvão, 2015). O encapsulamento do sensor por meio de um material compósito polimérico é uma solução viável para problemas desse tipo, pois apresenta elevada estabilidade térmica e mecânica (Rajan, 2014).

Segundo Galvão (2015), a matriz, que é uma fase contínua polimérica dos compósitos poliméricos, é reforçada por uma fase descontínua denominada fibra. Durante o processo de cura do compósito, ambas as fases se unem após o processo de *crosslinking* polimérico. A finalidade da aplicação define a fibra que será utilizada, mas normalmente a fase descontínua é formada por fibra de vidro, fibra de aramida ou fibra de carbono. Esses compósitos poliméricos apresentam baixa densidade com elevada resistência, onde a primeira propriedade se deve a matriz polimérica e a segunda propriedade ao material utilizado como reforço. Para Bradshaw *et al* (1999), o resultado final é um material com alto desempenho térmico e mecânico.

As classificações dos compósitos poliméricos são em termoplásticos e termorrígidos. Cloreto de polivinila (PVC), polietileno, polipropileno, entre outros; são polímeros termoplásticos que, durante o processo de cura, exibem formação de ligações fracas entre as cadeias, resultando em um material flexível. Quando se ultrapassa a temperatura de transição vítrea, o material perde sua rigidez, tornando-se suscetível a deformações plásticas; mas quando retomado a margem abaixo da temperatura de transição vítrea, os termoplásticos retornam para as suas características originais (Tito, 1999). Resinas epóxicas, fenólicas, furânicas, entre outros; são polímeros termorrígidos que durante o processo de cura exibem ligações fortes entre as cadeias, ocasionando em materiais de elevada resistência (Galvão, 2015).

Os estudos de sensores a fibra ótica baseados em redes de Bragg encapsulados tem sido estudada e apresentada em diversos trabalhos de pesquisas, onde o principal objetivo é conhecer o processo de cura dos materiais compósitos poliméricos (Galvão, 2015).

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os detalhes do processo de caracterização térmico da FBG, bem como os materiais escolhidos para recobrimento da fibra e equipamentos utilizados para os testes.

3.1 LOCAL

Realizou-se a parte experimental desse trabalho de conclusão de curso, no Laboratório Foton, localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na sede Centro do campus Curitiba.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Foram previamente selecionados 4 FBG's, operando na região espectral do infra vermelho, de uso genérico do laboratório, para recobrimentos distintos e caracterização térmica. Os recobrimentos escolhidos foram: Super Bonder® convencional, Super Bonder® convencional e um tubo metálico, Super Bonder® gel e silicone.

Os ensaios foram realizados com auxílio de alguns materiais e: equipamentos, e os principais serão listados abaixo com uma breve descrição:

- FBG: Como já foi dito anteriormente, utilizou-se FBG's que estavam disponíveis em laboratório. Porém, assim como qualquer outro sensor ótico baseado em FBG do laboratório, foram produzidas com a técnica máscara de fase;

- Peltier com controlador de temperatura: As células Peltier, também conhecidas como pastilhas termoelétricas, operam utilizando o efeito Peltier, onde há um efeito aquecedor ou resfriador quando uma corrente elétrica passa por dois condutores. A tensão elétrica aplicada aos polos desses dois materiais distintos, cria uma diferença de temperatura (Filho *et al.*, 2010). O Peltier que integrou a construção desses dados, Figura 4, foi construído pelo aluno Leonardo Santana, da própria UTFPR, como parte do seu projeto de iniciação científica.

Com o auxílio do controlador de temperatura, TED 200 da fabricante Profile, da Figura 5, foi possível estabelecer as temperaturas de *set point*, que variaram de 5°C a 60°C, com passos de 5°C, sendo a temperatura ambiente mantida em $21^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$.

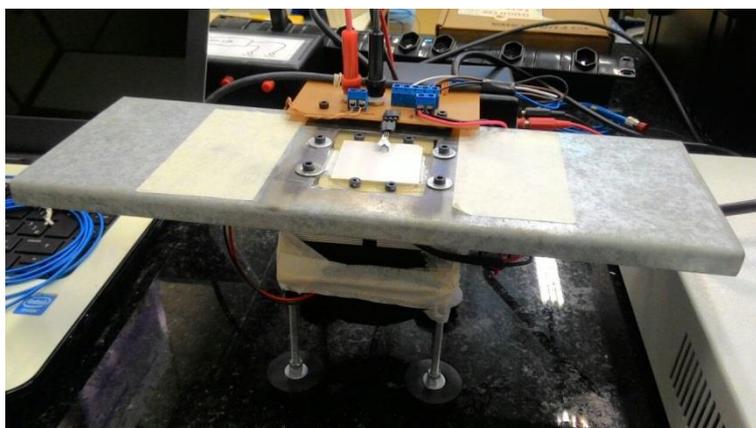


Figura 4 - Peltier utilizado para os ensaios no Laboratório Foton.
Fonte: Autoria própria.



Figura 5 - Controlador de temperatura (TED 200) utilizado para os ensaios no Laboratório Foton.
Fonte: Autoria própria.

- Interrogador SM125: O sensor ótico FBG foi interrogado espectralmente por um interrogador SM 125, conforme a Figura 6 é um gabinete compacto e é construído em cima do núcleo ótico do interrogador da Micron Optics X.25. Pode ser utilizado para medições estáticas e dinâmicas. Todos os ajustes do módulo, visualização dos dados, armazenamento, e tarefas são fornecidas pelo software conectado ao SM125, chamado Micron Optics ENLIGHT (Micron Optics, 2017).



Figura 6 - Interrogador óptico SM 125.

Fonte: Autoria própria.

• Máquina de fusão: A máquina de fusão de fibra óptica utilizada é da fabricante Fujikura®, conforme Figura 7, para realização de todas as fusões necessárias. Este equipamento foi usado para realizar o processo de junção das FBG's com os *pigtails* (cordões óticos), para isso, as fibras foram introduzidas com um alinhamento apropriado na máquina, além de limpas e clivadas. Basicamente, a máquina gera um arco elétrico, que eleva a temperatura nas faces das fibras, derretendo e soldando essas pontas, com o intuito de formar uma única fibra ótica.



Figura 7 - Máquina de fusão Fujikura®.

Fonte: Autoria própria.

• Pasta térmica: Como sabemos, o ar é um isolante térmico. Por isso, é necessário utilizar a pasta térmica: por não ser sólida, ela se espalha e preenche as lacunas entre a superfície do Peltier e a FBG. E, como a condutividade da pasta

térmica é bem melhor do que a do ar, a condutividade térmica do sistema é melhorada. A marca escolhida de pasta térmica foi a IMPLASTEC®, contendo 15g.

- Super Bonder® convencional: Loctite Super Bonder é uma linha de colas instantâneas, em que seu principal componente ativo é o cianocrilato, um polímero acrilato que reage quimicamente para formar longas cadeias poliméricas, e que forma uma adesão quase instantânea quando entra em contato com a umidade das superfícies (Loctite, 2017). A versão líquida convencional serve para aplicações universais.

- Super Bonder® gel: Assim como a versão líquida convencional, seca rapidamente, possui adesão forte e transparente. O grande diferencial é que a Loctite Super Bonder em gel não escorre, sendo útil para aplicações verticais e superfícies com poros (Loctite, 2017).

- Silicone: O silicone Selabond® é um adesivo de cura acética, multiuso com excelente adesão e fácil aplicação. Este adesivo, em contato com o ar, vulcaniza e se transforma em borracha. Apresenta resistência a vibrações, umidade e mantém a flexibilidade ao longo do tempo (Selabond, 2017).

- Tubo metálico: O tubo metálico utilizado foi a agulha anestésica espinhal raquidiana Procare® (tipo *quincke*), da Figura 8, que é fabricada em aço inoxidável, possui canhão com visor translúcido e formato cônico, mandril metálico com encaixe anatômico e é recoberto com uma capa protetora para a agulha, sendo embaladas individualmente, evitando contaminações (Lamedid, 2017).



Figura 8 - Agulha anestésica espinhal raquidiana Procare®.
Fonte: Lamedid, 2017.

3.3 PROCESSO DE ENCAPSULAMENTO

Abaixo serão descritos, brevemente, o processo de recobrimentos das FBG's realizados em laboratório para o desenvolvimento desse trabalho.

- Super Bonder® convencional: Após o processo de fusão, o recobrimento com Super Bonder® foi feito com o auxílio de uma folha sulfite A4, fita adesiva transparente e óleo de soja, de uso culinário. A aplicação dessa cola é extremamente delicada, pois ela escorre e sua fixação é relativamente rápida. Sendo assim, depois de avaliar alguns métodos, foi estabelecido que, fitas adesivas recobertas com uma camada generosa de óleo de cozinha coladas em uma folha sulfite, era a melhor superfície de apoio para o encapsulamento do Super Bonder® na fibra. A camada de óleo impossibilita o contato direto com a superfície, não grudando e mantendo apenas a cura da cola na fibra. O tempo de cura total, para que se tornasse viável o início dos testes foi de 48horas.

- Super Bonder® gel: Após o processo de fusão, o recobrimento do sensor foi realizado com a aplicação na vertical sobre a fibra, sem plano de apoio, pois o Super Bonder® gel não escorre. Fixou-se o *pigtail* na parede, enrolado, permanecendo a fibra na vertical sem contato com nenhuma outra superfície de apoio e, depois de 48horas, os ensaios foram feitos.

- Super Bonder® convencional e um tubo metálico: Após o processo de fusão, se mediu o tamanho da agulha e a rede de Bragg gravada foi posicionada na região central com uma camada de cola nas duas pontas, garantindo a fixação do sensor no tubo metálico. Tempo de cura: 48 horas.

- Silicone: Assim como o Super Bonder® gel, foi possível fazer a aplicação do silicone com a fibra na vertical, sem que escorresse. Fixou-se o *pigtail* na parede, enrolado, permanecendo a fibra na vertical sem contato com nenhuma outra superfície de apoio e, depois de 48horas, os ensaios foram feitos.

3.4 ESTRUTURA PARA O ENSAIO

Em uma mesa ótica, no laboratório, os equipamentos foram postos lado a lado, sempre em uma ordem. Da esquerda para a direita: SM 125, Controlador de temperatura, *Peltier* e netbook com o *software ENLIGHT*. As FBG's encapsuladas eram colocadas sobre o *Peltier* e suas extremidades presas com a fita adesiva. Para aumentar a condutividade térmica, usou-se a pasta térmica entre os sensores e a superfície do equipamento.

Com o controlador de temperatura, regulou-se a temperatura de *set point* de 5°C a 60°C, com passos de 5 em 5°C, com início da aferição em temperatura ambiente. A cada medida, esperava-se de 3 a 5 minutos, para estabilização do sistema e maior confiabilidade dos dados.

4. RESULTADOS

• Sem encapsulamento: Os gráficos de 7 a 18, que estão no APÊNDICE A, mostram os valores do comprimento de onda, em nanômetros, obtidos ao longo de um período de 5 minutos, para temperaturas de 5°C até 60°C. Foram 12 ensaios, ao passo de 5°C, com início da medição em temperatura ambiente variando em 21°C e 22°C.

No tempo em que se iniciou a estabilização do sistema, conforme apresentados, coletou-se os comprimentos de onda, e obteve-se o Quadro 1, referente a sensibilidade da FBG sem encapsulamento, gerando o Gráfico 1.

Quadro 1 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda (nm)
5	1526,904
10	1526,959
15	1527,035
20	1527,1
25	1527,16
30	1527,226
35	1527,315
40	1527,385
45	1527,433
50	1527,518
55	1527,604
60	1527,698

Fonte: Autoria própria.

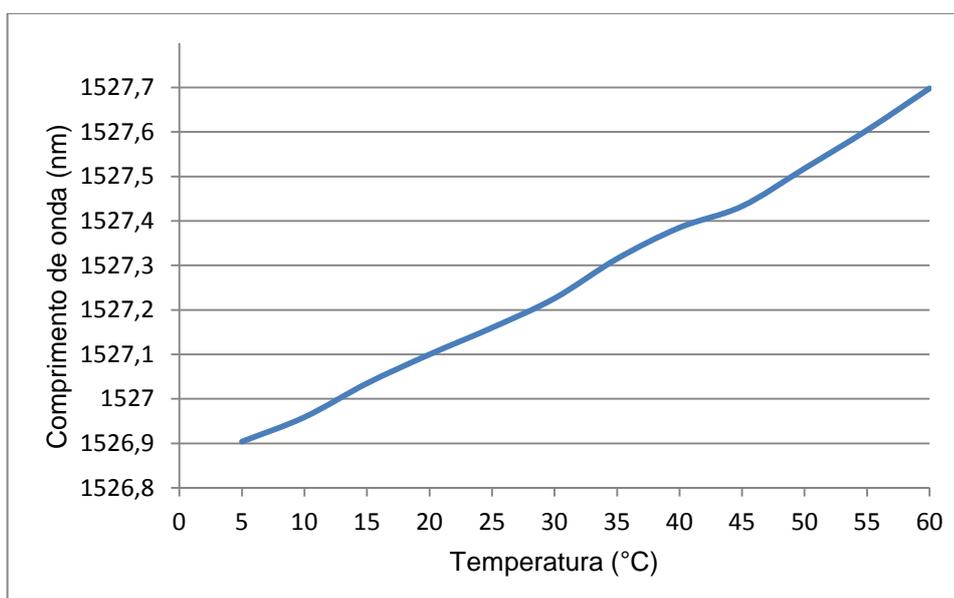


Gráfico 1 – Comprimento de onda versus temperatura do sensor sem encapsulamento.

Fonte: Autoria própria.

• Super Bonder® convencional: Os gráficos de 19 a 30, que estão no APÊNDICE A, mostram os valores do comprimento de onda, em nanômetros, obtidos ao longo de um período de 5 minutos, para temperaturas de 5°C até 60°C. Foram 12 ensaios, ao passo de 5°C, e com temperatura ambiente variando entre 21°C e 22°C.

No tempo em que iniciou a estabilização do sistema, coletou-se os comprimentos de onda, e obteve-se o Quadro 2, referente a sensibilidade da FBG com Super Bonder® convencional, gerando o Gráfico 2.

Quadro 2 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® convencional.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda (nm)
5	1526,041
10	1526,436
15	1526,713
20	1526,945
25	1527,122
30	1527,186
35	1527,265
40	1527,318
45	1527,386
50	1527,494
55	1527,581
60	1527,662

Fonte: Autoria própria.

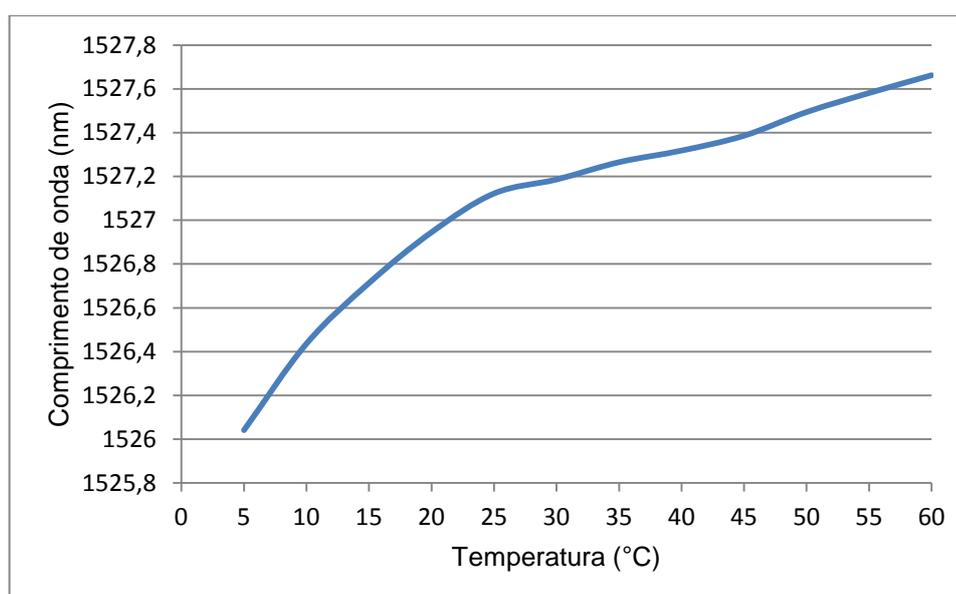


Gráfico 2 - Comprimento de onda versus temperatura do sensor com Super Bonder® convencional.

Fonte: Autoria própria.

• Super Bonder® gel: Os gráficos de 31 a 42, que estão no APÊNDICE A, mostram os valores do comprimento de onda, em nanômetros, obtidos ao longo de um período de 5 minutos, para temperaturas de 5°C até 60°C. Foram 12 ensaios, ao passo de 5°C, e com temperatura ambiente variando entre 21°C e 22°C.

No tempo em que iniciou a estabilização do sistema, coletou-se os comprimentos de onda, e obteve-se o Quadro 3, referente a sensibilidade da FBG com Super Bonder® gel, gerando o Gráfico 3.

Quadro 3 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® gel.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda (nm)
5	1526,588
10	1526,656
15	1526,809
20	1526,917
25	1526,972
30	1527,027
35	1527,105
40	1527,244
45	1527,346
50	1527,323
55	1527,441
60	1527,548

Fonte: Autoria própria.

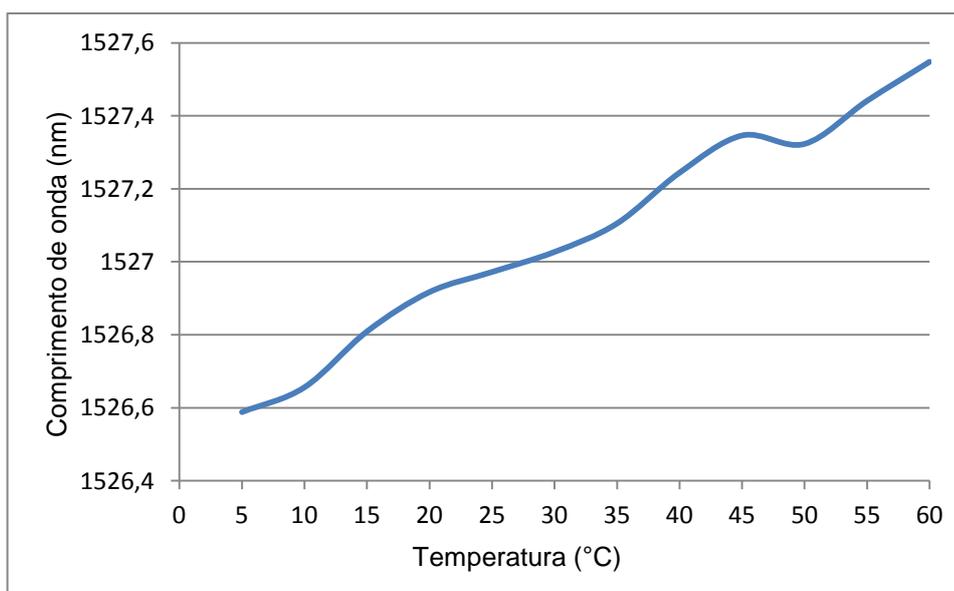


Gráfico 3 - Comprimento de onda versus temperatura do sensor com Super Bonder® gel.
Fonte: Autoria própria.

• Super Bonder® convencional e um tubo metálico: Os gráficos de 43 a 54, que estão no APÊNDICE A, mostram os valores do comprimento de onda, em nanômetros, obtidos ao longo de um período de 5 minutos, para temperaturas de 5°C até 60°C. Foram 12 ensaios, ao passo de 5°C, e com temperatura ambiente variando entre 21°C e 22°C.

No tempo em que iniciou a estabilização do sistema, coletou-se os comprimentos de onda, e obteve-se o Quadro 4, referente a sensibilidade da FBG com Super Bonder® convencional e um tubo metálico, gerando o Gráfico 4.

Quadro 4 - Sensibilidade do sensor com Super Bonder® convencional e um tubo metálico.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda (nm)
5	1540,302
10	1540,422
15	1540,505
20	1540,584
25	1540,667
30	1540,759
35	1540,847
40	1540,863
45	1540,914
50	1541,163
55	1541,28
60	1541,349

Fonte: Autoria própria.

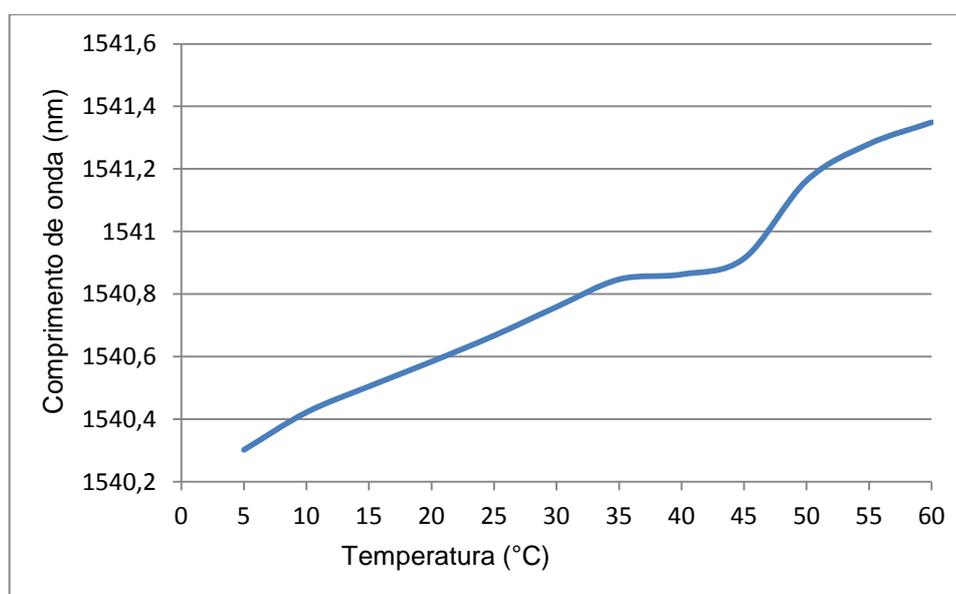


Gráfico 4 - Comprimento de onda versus temperatura do sensor com Super Bonder® convencional e um tubo metálico.

Fonte: Autoria própria.

•Silicone: Os gráficos de 55 a 66, que estão no APÊNDICE A, mostram os valores do comprimento de onda, em nanômetros, obtidos ao longo de um período de 5 minutos, para temperaturas de 5°C até 60°C. Foram 12 ensaios, ao passo de 5°C, e com temperatura ambiente variando entre 21°C e 22°C.

No tempo em que iniciou a estabilização do sistema, coletou-se os comprimentos de onda, e obteve-se o Quadro 5, referente a sensibilidade da FBG com Silicone, gerando o Gráfico 5.

Quadro 5 - Sensibilidade do sensor com Silicone.

Temperatura (°C)	Comprimento de onda (nm)
5	1526,918
10	1526,993
15	1527,057
20	1527,136
25	1527,204
30	1527,276
35	1527,342
40	1527,429
45	1527,478
50	1527,557
55	1527,644
60	1527,686

Fonte: Autoria própria.

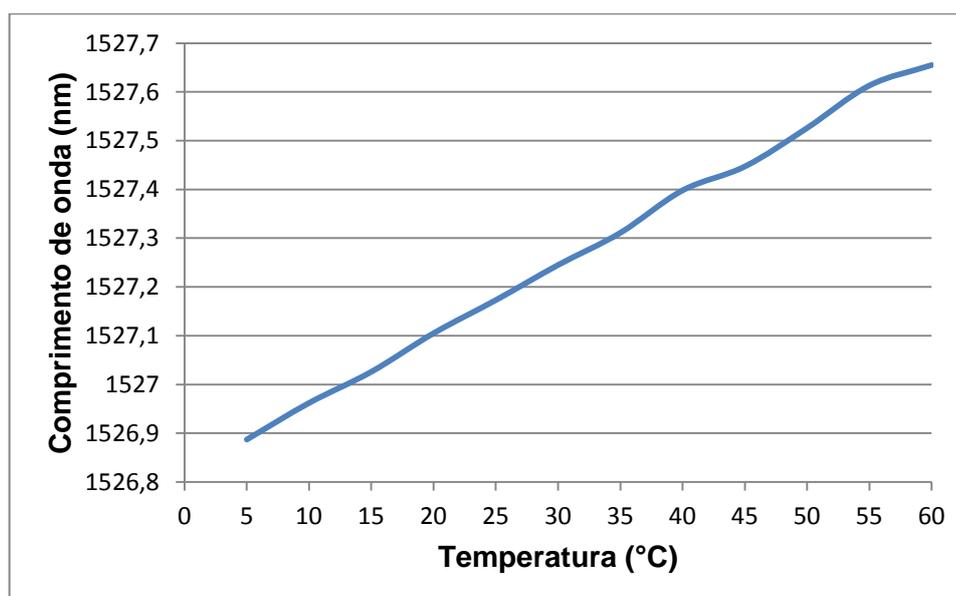


Gráfico 5 - Comprimento de onda versus temperatura do sensor com Silicone.

Fonte: Autoria própria.

Através do *software* de aquisição de dados, *ENLIGHT* da *Micro Optics*, foi possível copilar todos os valores e reunir informações para comparações sobre os encapsulamentos estudados. Foi possível realizar a comparação apresentada no Quadro 6, de forma a também facilitar a visualização, da sensibilidade dos encapsulamentos para cada temperatura avaliada.

Quadro 6 - Sensibilidade das FBG's encapsuladas.

	Sem encapsulamento	Convencional	Gel	Tubo metálico	Silicone
Temperatura (°C)	Comprimento de onda (nm)				
5	1526,904	1526,041	1526,588	1540,302	1526,918
10	1526,959	1526,436	1526,656	1540,422	1526,993
15	1527,035	1526,713	1526,809	1540,505	1527,057
20	1527,1	1526,945	1526,917	1540,584	1527,136
25	1527,16	1527,122	1526,972	1540,667	1527,204
30	1527,226	1527,186	1527,027	1540,759	1527,276
35	1527,315	1527,265	1527,105	1540,847	1527,342
40	1527,385	1527,318	1527,244	1540,863	1527,429
45	1527,433	1527,386	1527,346	1540,914	1527,478
50	1527,518	1527,494	1527,323	1541,163	1527,557
55	1527,604	1527,581	1527,441	1541,28	1527,644
60	1527,698	1527,662	1527,548	1541,349	1527,686

Fonte: Autoria própria.

No Gráfico 6 é apresentado o comparativo da sensibilidade dos encapsulamentos a fim de exemplificar o Quadro 6.

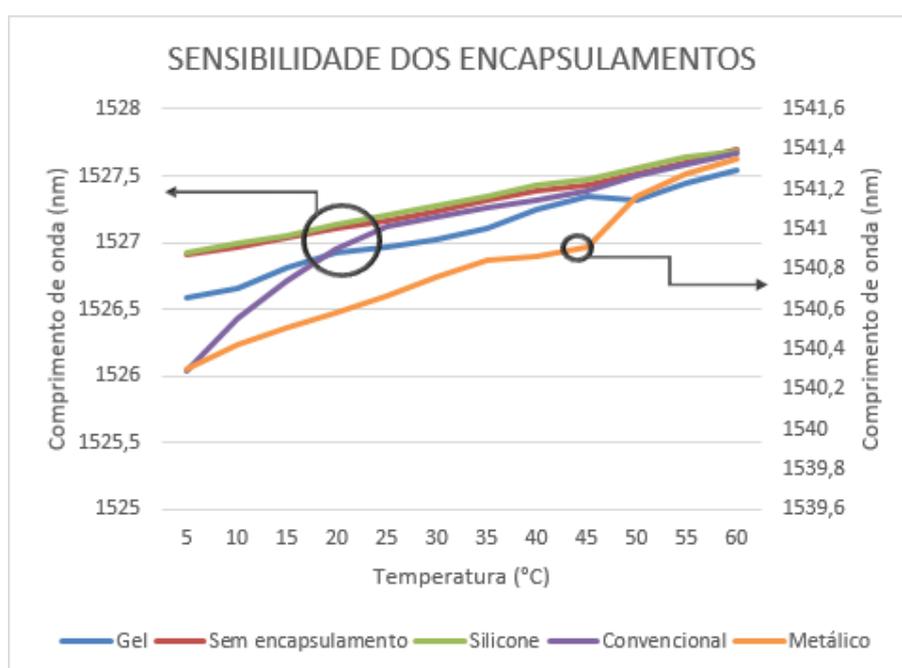


Gráfico 6 – Comparativo do comprimento de onda versus temperatura dos encapsulamentos.
Fonte: Autoria própria.

5. CONCLUSÕES

No trabalho foi proposto caracterizações em temperaturas de 5°C a 60°C das FBG's sem e com encapsulamentos, a fim de avaliar a sensibilidade do sensor quando protegido mecanicamente.

As caracterizações em temperatura das FBG's sem e com encapsulamentos, apresentadas neste trabalho, mostraram que a sensibilidade nos sensores é dada por uma quase reta, isto é, em geral quanto maior a temperatura maior o comprimento de onda.

É de conhecimento prévio que o tubo metálico possui maior resistência mecânica que os outros materiais utilizados para recobrimento. Com os experimentos, detectou-se que ele não perdeu a sensibilidade mesmo sendo mais robusto. Mesmo assim, um ponto relevante ao se considerar um encapsulamento é saber qual é a sua finalidade e prioridade na aplicação do sensor: sensibilidade térmica ou resistência mecânica? Pois isto implica em custos.

Os materiais utilizados para recobrimento das FBG's foram de baixo custo e facilmente encontrados. Os comparativos fornecidos nos quadros, no capítulo anterior, mostram que os demais materiais, apresentam desempenho bem parecido referente a sensibilidade e que, muitas vezes, a sensibilidade é maior para algumas temperaturas quando o sensor está encapsulado.

Os resultados foram considerados satisfatórios, comprovando que a utilização de sensores óticos baseados na técnica de rede de Bragg para medida de temperatura, quando encapsulados, continuam apresentando alta sensibilidade e tendo, como ponto relevante na tomada de decisão no momento de aplicação, a inércia térmica versus resistência mecânica.

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante realizar experimentos com encapsulamentos mais robustos e em temperaturas mais elevadas, acompanhando o comportamento da sensibilidade das FBG's quando submetidas a condições mais extremas.

REFERÊNCIAS

BRADSHAW, R. D.; BRINSON, L. C. **Mechanical response of linear viscoelastic composite laminates incorporating non-isothermal physical aging effects.** *Composites science and technology*, v. 59, n. 9, p. 1411-1427, 1999.

CARVALHO, Marcos de Castro. **Redes de Bragg em fibras ópticas poliméricas (FOP).** 2010. 305 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

CUNHA, José Renato Ferreira Alves da. **Modelo teórico de sensores ópticos baseados em fibras com grade de Bragg.** 2007. 73 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

DIAS, João Miguel Serras. **Monitorização remota com sensores de fibra ótica.** 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2016.

FILHO, J. P. B.; GUERRERO, J. R. H.; FREITAS, P. R.; MARTINS, P. R. L. Aquecimento, resfriamento e controle de temperatura de um ambiente fechado utilizando células Peltier. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6, 2010, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: ABCM, 2010.

GALVÃO, José Rodolfo. **Sensor a fibra ótica encapsulado em resina polimérica com reforço de fibra de vidro para aplicação em gerador de alta potência.** 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

HILL, K. O. *et al.* **Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication.** *Applied Physics Letters*, vol. 32, p 125-157, 1978.

HILL, K. O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., ALBERT, J. **Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask.** *Applied Physics Letters*, vol. 62, p. 1035-1037, 1993.

KERSEY, A. D. DAVIS, M. A. PATRICK, H. J. LEBLANC, M. KOO, K. P. **Fiber gratings sensors.** *Journal of Lightwave Technology*, vol 15, No. 8. 1997.

LAMEDID. **Agulha anestésica espinhal raquidiana.** Disponível em < <https://www.lamedid.com.br/produtos/agulhas/agulha-anestesica-espinhal-raquidiana> > Acesso em 1 de agosto de 2017.

LOCTITE. **Perguntas Frequentes.** Disponível em < <http://www.loctite-consumo.com.br/pt/meta/meta-nav/faq-perguntas-frequentes.html> > Acesso em 1 de agosto de 2017.

LUO, F. *et al.* **Multiplexed fiber-optic Bragg stack sensors (FOBSS) for elevated temperatures.** *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 13. No. 5, 2001.

MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H. **Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method.** *Optics Letters*, vol. 14, pp. 823-825, 1989.

MEZZADRI, Felipe. **Monitoramento de temperatura em turbina de motor diesel de locomotiva com sensor a fibra ótica.** 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MICRON OPTICS. **Produtos - Dispositivo de medição de fibra óptica/aresta de corte/compacto.** Disponível em < <http://www.directindustry.com/pt/prod/micron-optics/product-101517-1107355.html> > Acesso em 1 de agosto de 2017.

OLIVEIRA, André Orlandi de. **Sistema para medida simultânea de temperatura e deformação com redes de Bragg em 800 nm.** 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

OTHONOS, A. **Fiber bragg gratings.** *Review of Scientific Instruments*, AIP, v. 68, n. 12, p. 4309-4341, 1997.

PAIXÃO, Tiago de Brito. **Estabilidade térmica de redes de Bragg fabricadas por laser femtosegundo.** 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2016.

PEREIRA, Joel Gonçalves. **Sensores de vibração baseados em rede de Bragg em fibra ótica afinada: comparação e aplicação no monitoramento de motores elétricos.** 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

RAJAN, Ginu *et al.* **Carbon fibre-foam sandwich composite laminate embedded with fiber Bragg grating sensors.** In: OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2014. P. 91579X-91579X-4.

SCHILLER, Marcelo Weber. **Aplicações das redes de Bragg na biomecânica.** 2009. 298 f. Tese (Doutorado em Física) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

SELABOND. **Produtos – Silicone.** Disponível em < <http://www.selabond.com.br/index.php/ct-menu-item-5/ct-menu-item-55/ct-menu-item-59> > Acesso em 1 de agosto de 2017.

SILVA, Gleison Elias da. **Implementação e caracterização da resposta dinâmica de transdutores de deformação e temperatura a fibras ópticas baseados em redes de Bragg.** 2011. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TITO, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE DOS SENSORES

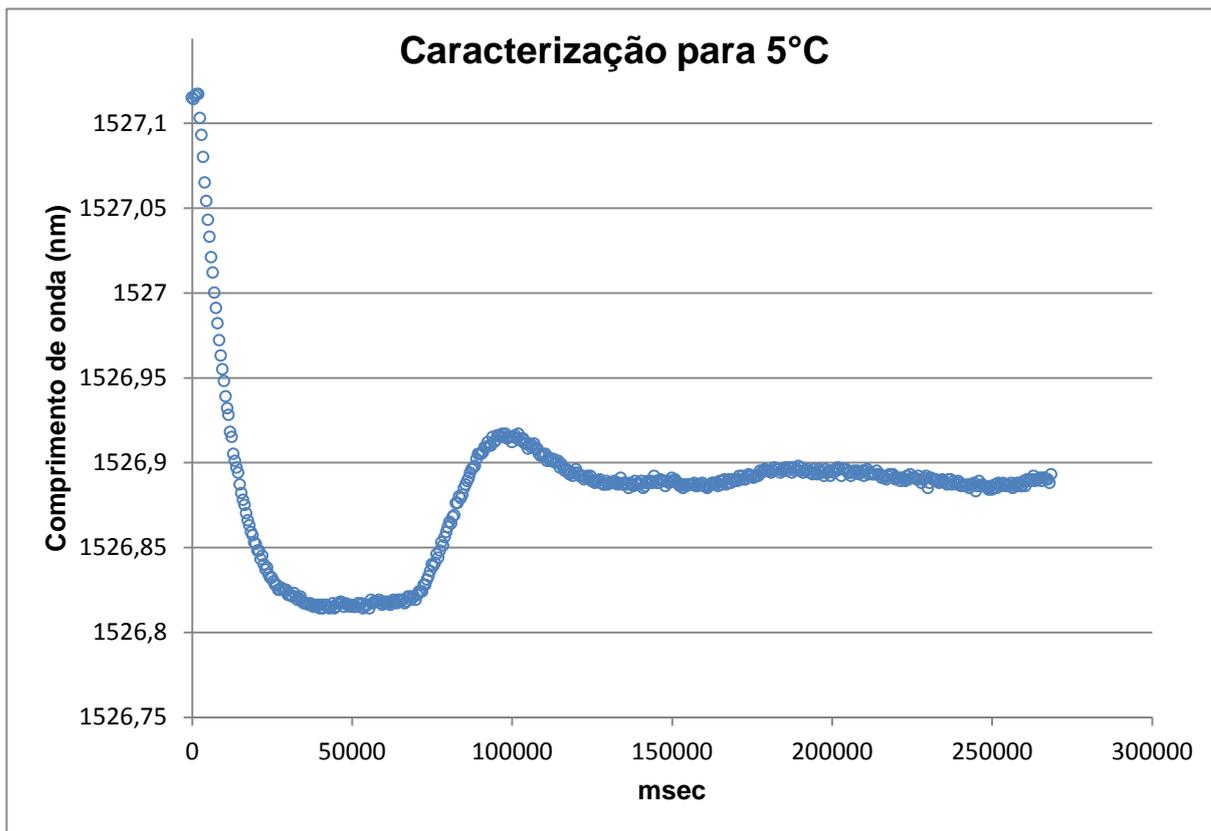


Gráfico 7 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 5°C.
Fonte: Autoria própria.

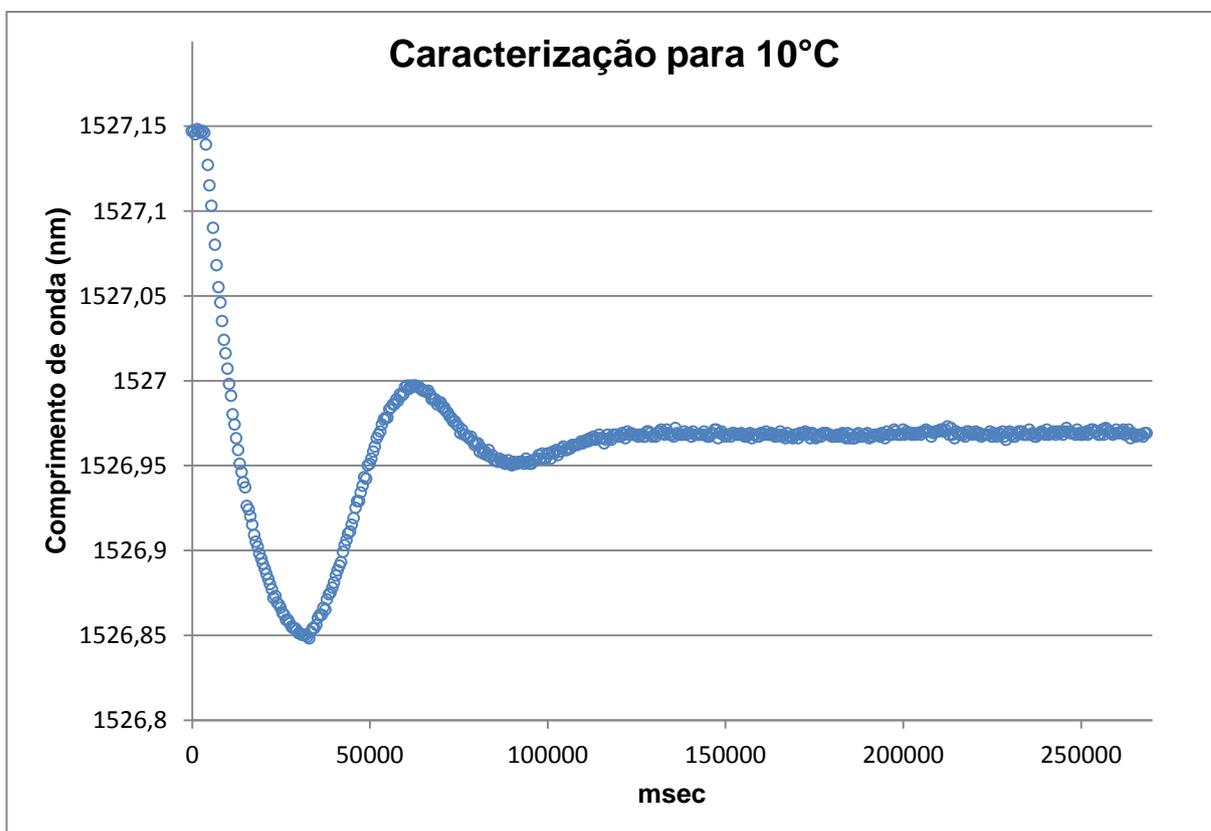


Gráfico 8 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 10°C.
Fonte: Autoria própria.

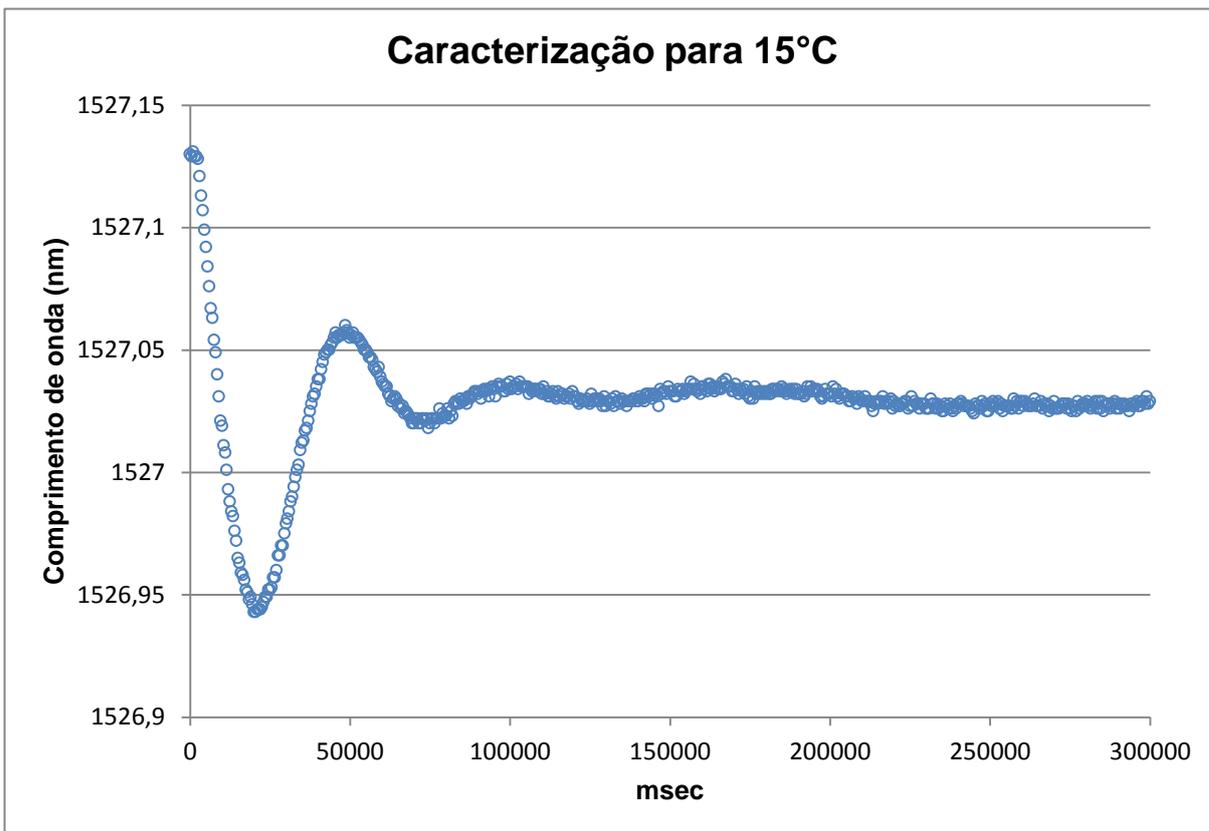


Gráfico 9 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 15°C.
Fonte: Autoria própria.

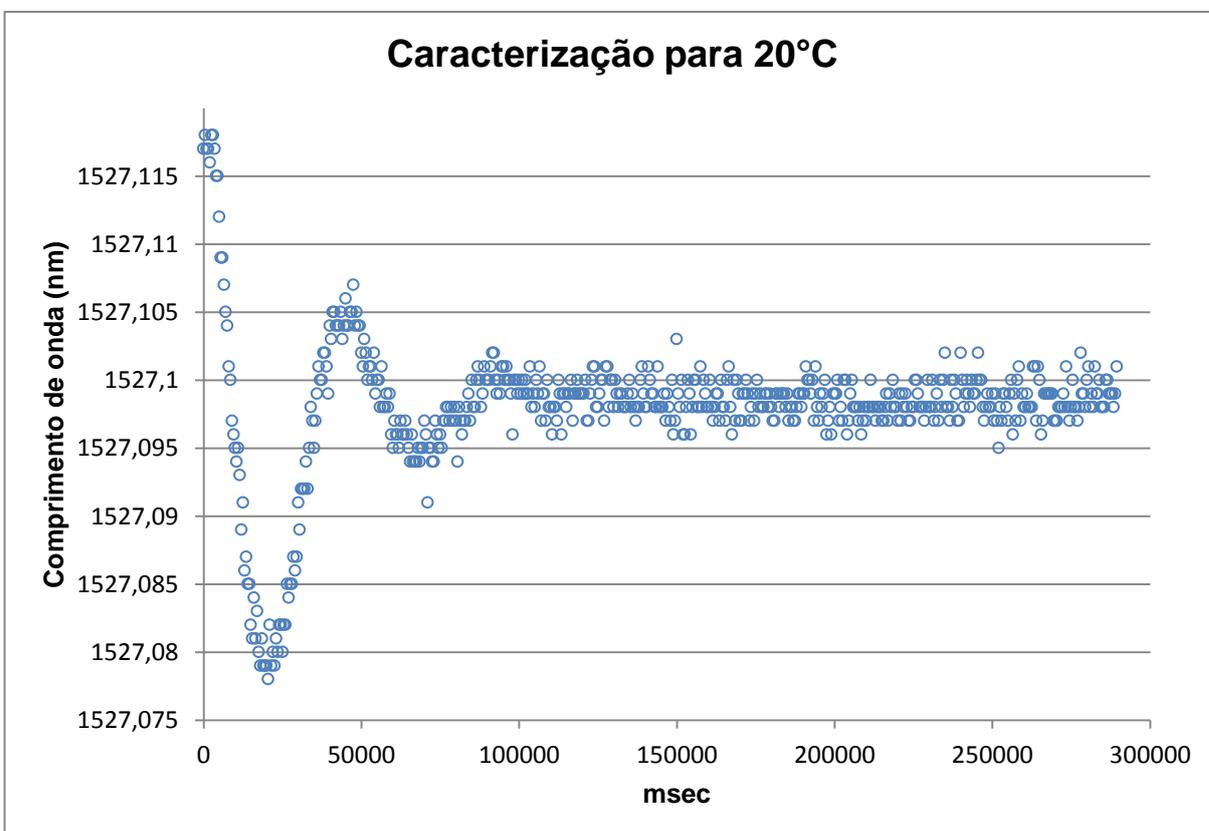


Gráfico 10 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 20°C.
Fonte: Autoria própria.

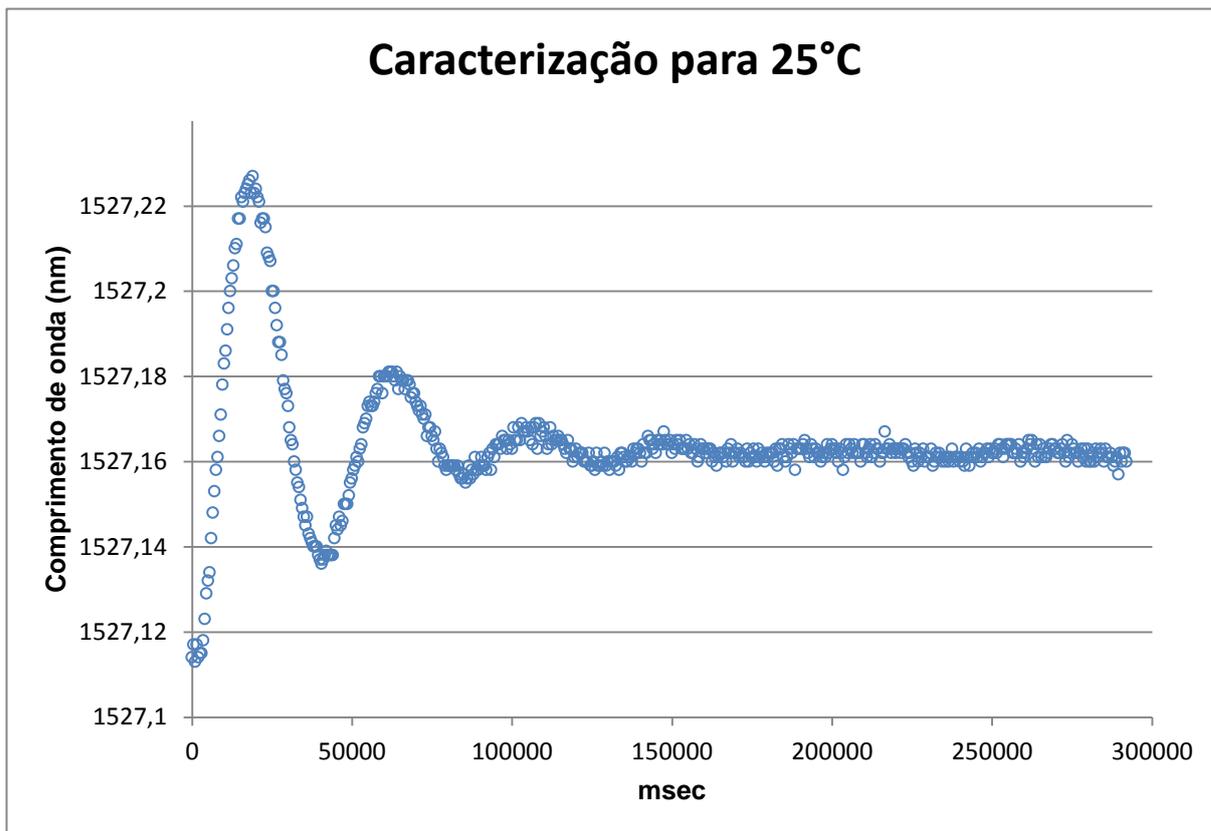


Gráfico 11 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 25°C.
Fonte: Autoria própria.

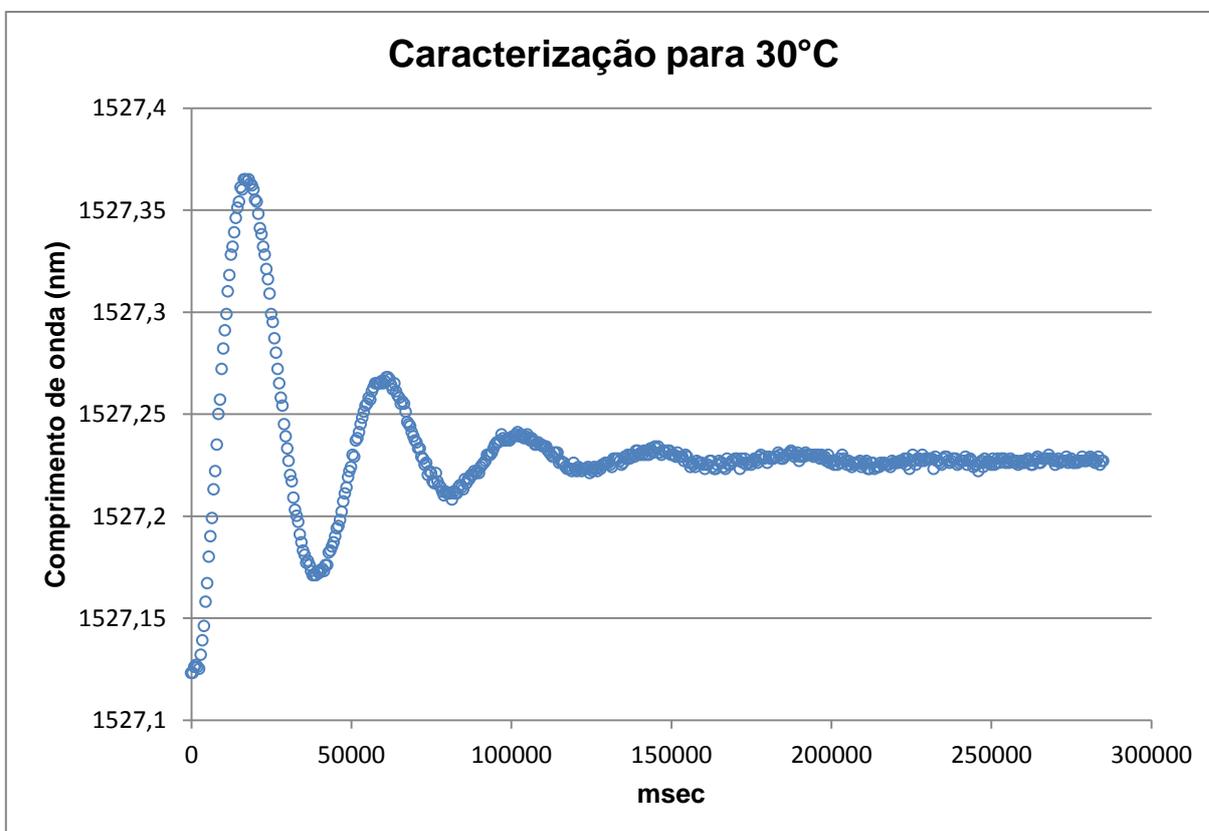


Gráfico 12 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 30°C.
Fonte: Autoria própria.

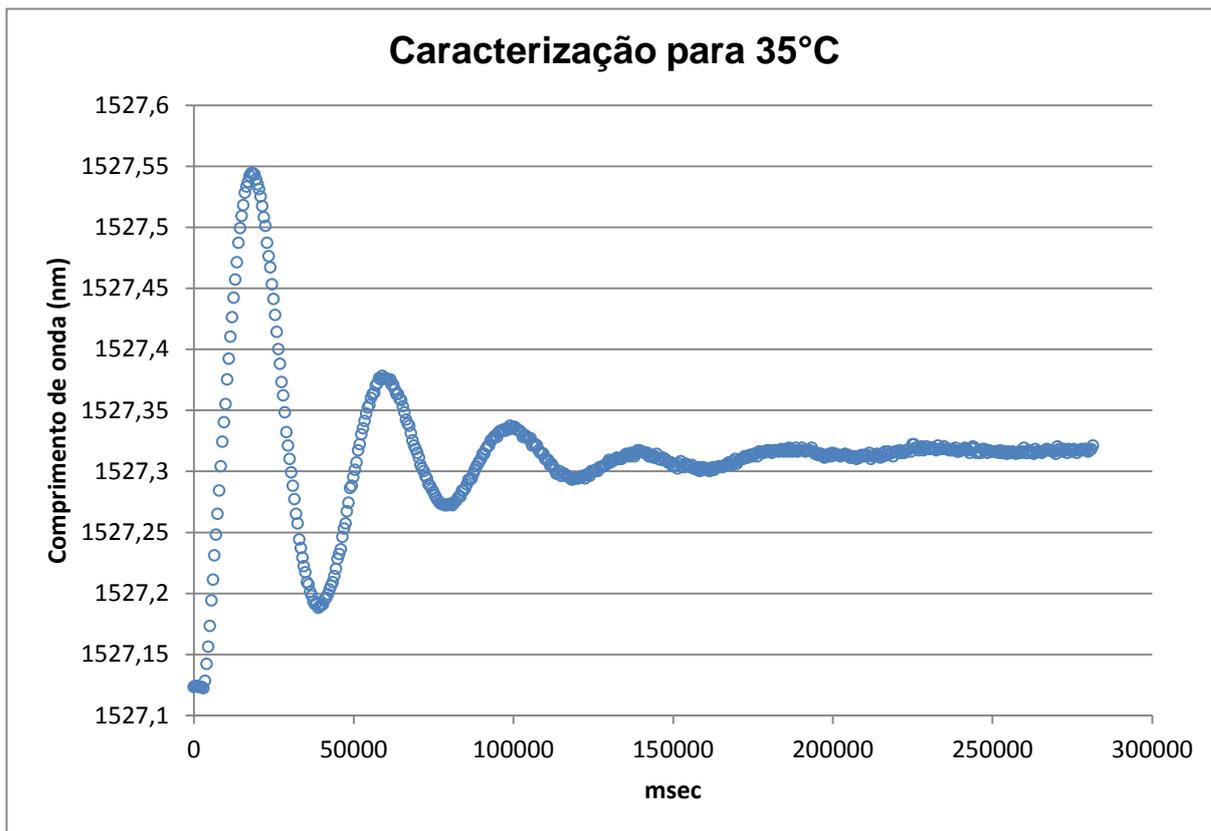


Gráfico 13 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 35°C.
Fonte: Autoria própria.

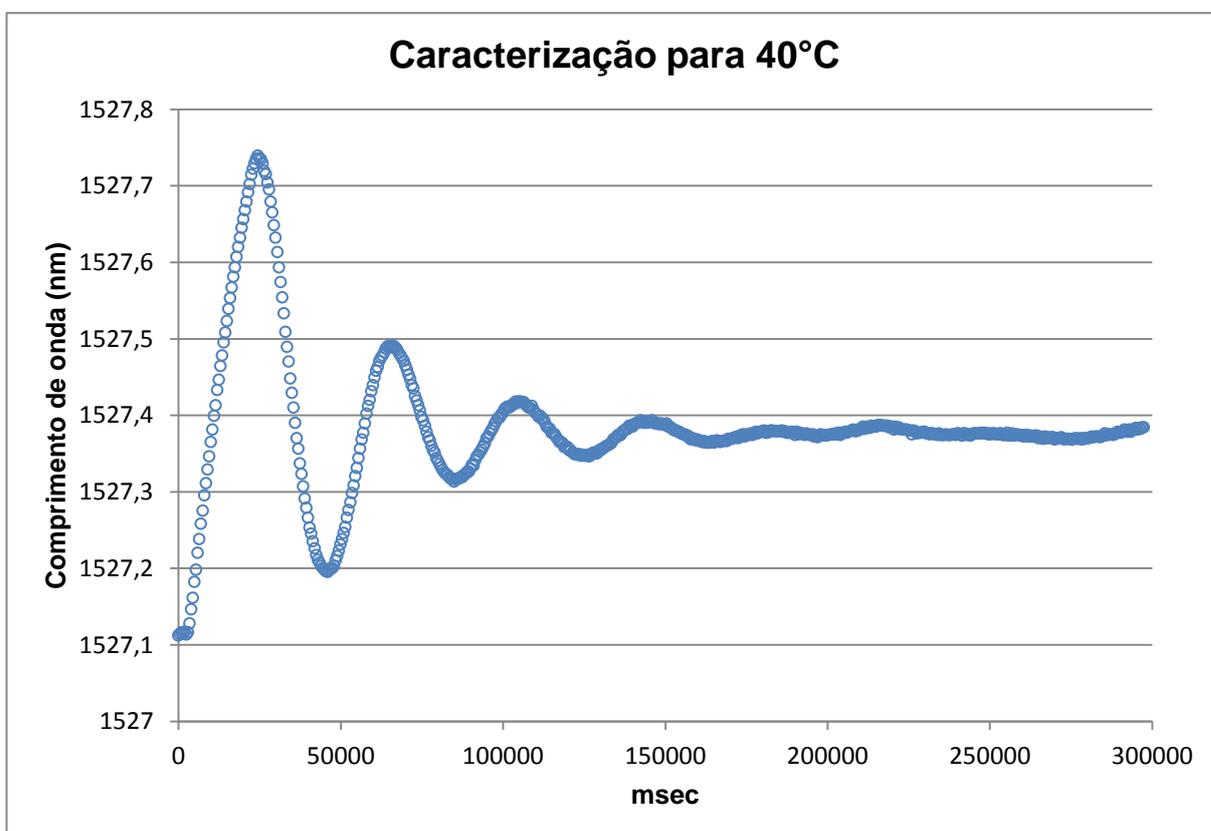


Gráfico 14 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 40°C.
Fonte: Autoria própria.

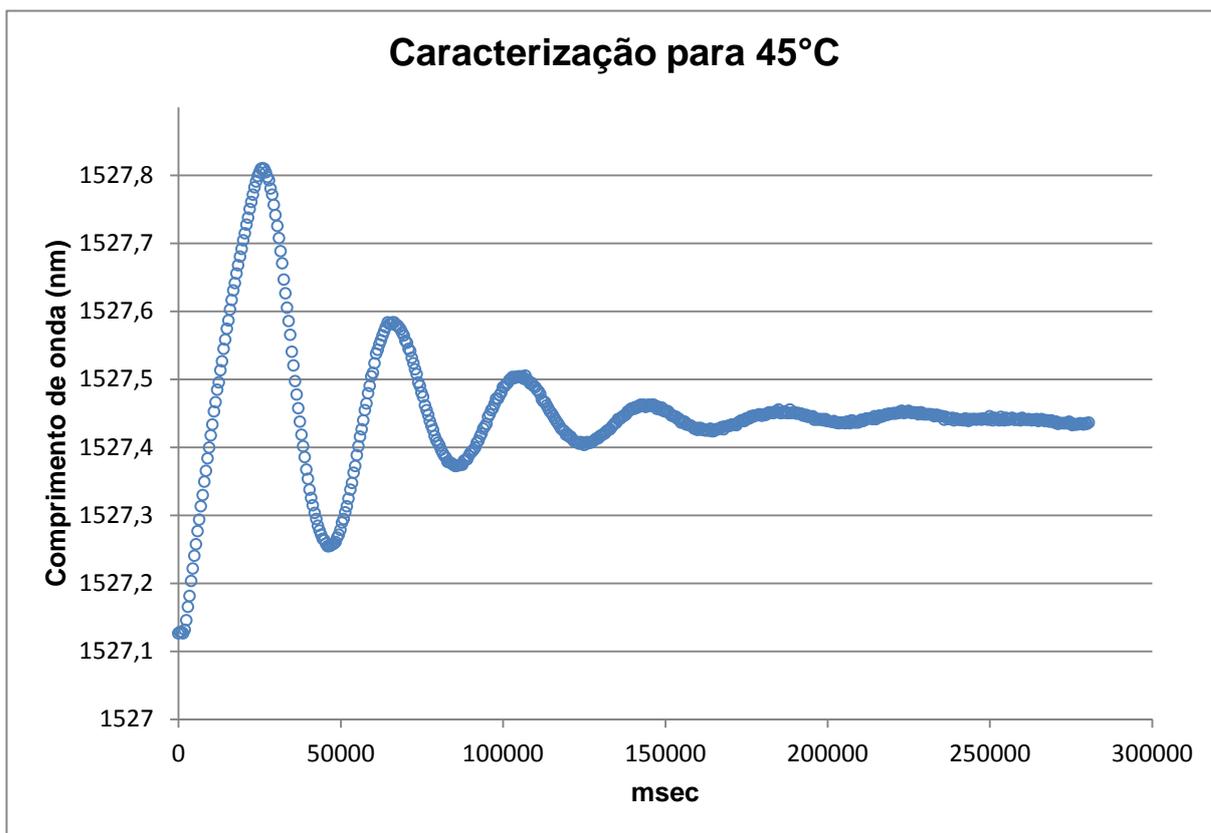


Gráfico 15 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 45°C.
Fonte: Autoria própria.

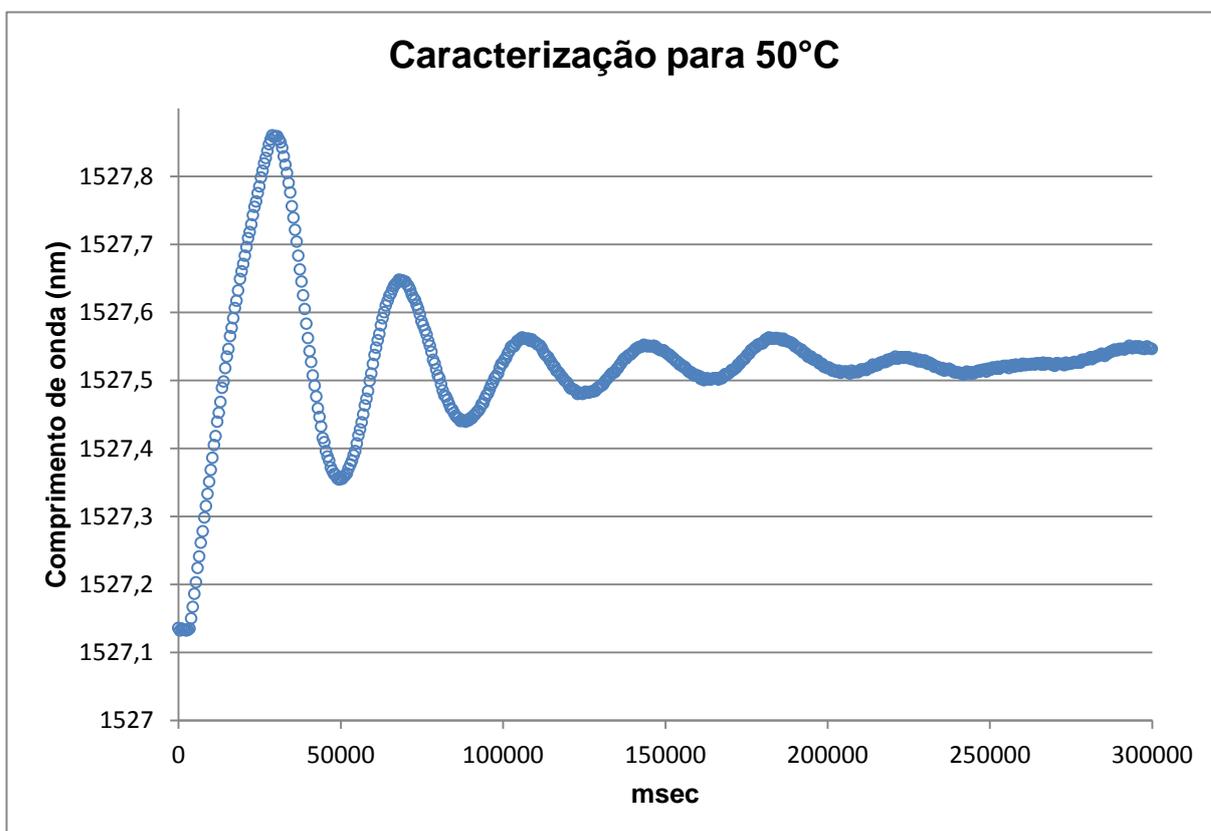


Gráfico 16 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 50°C.
Fonte: Autoria própria.

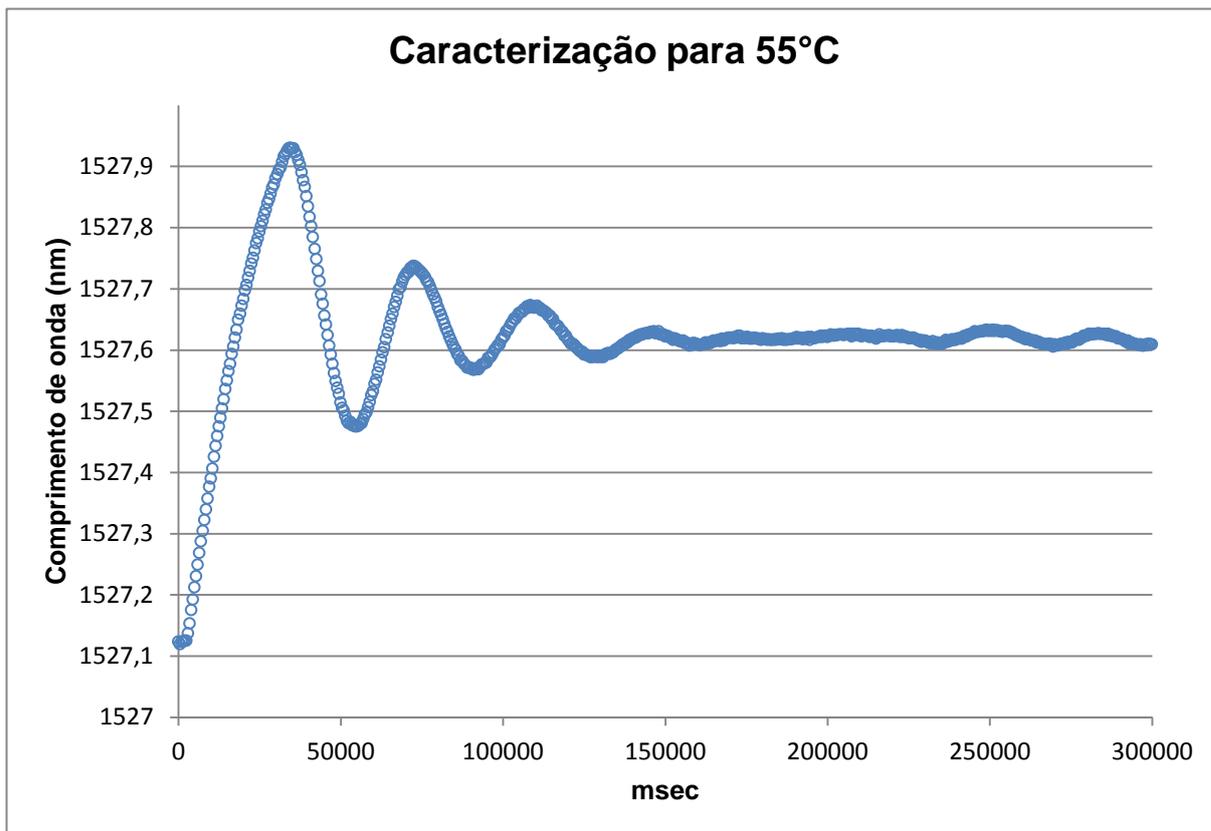


Gráfico 17 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 55°C.
Fonte: Autoria própria.

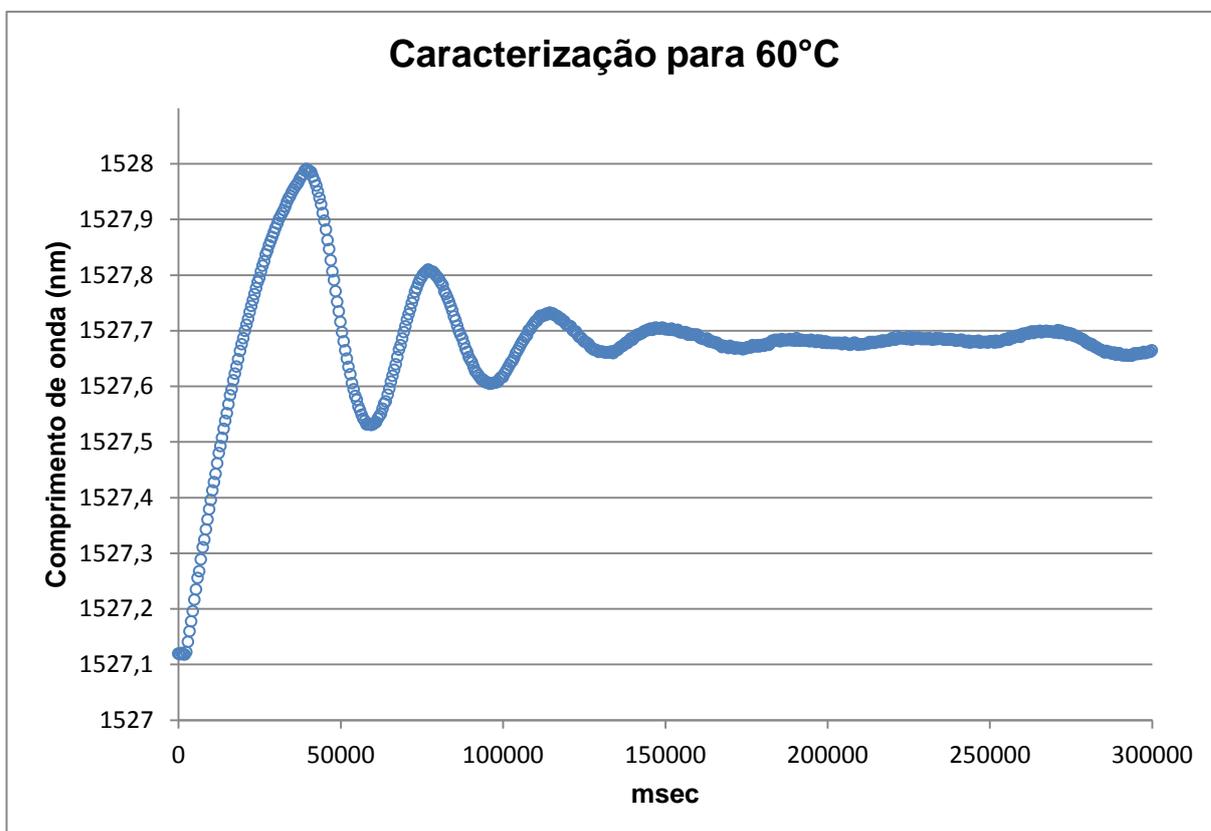


Gráfico 18 - Sensibilidade do sensor sem encapsulamento para 60°C.
Fonte: Autoria própria.

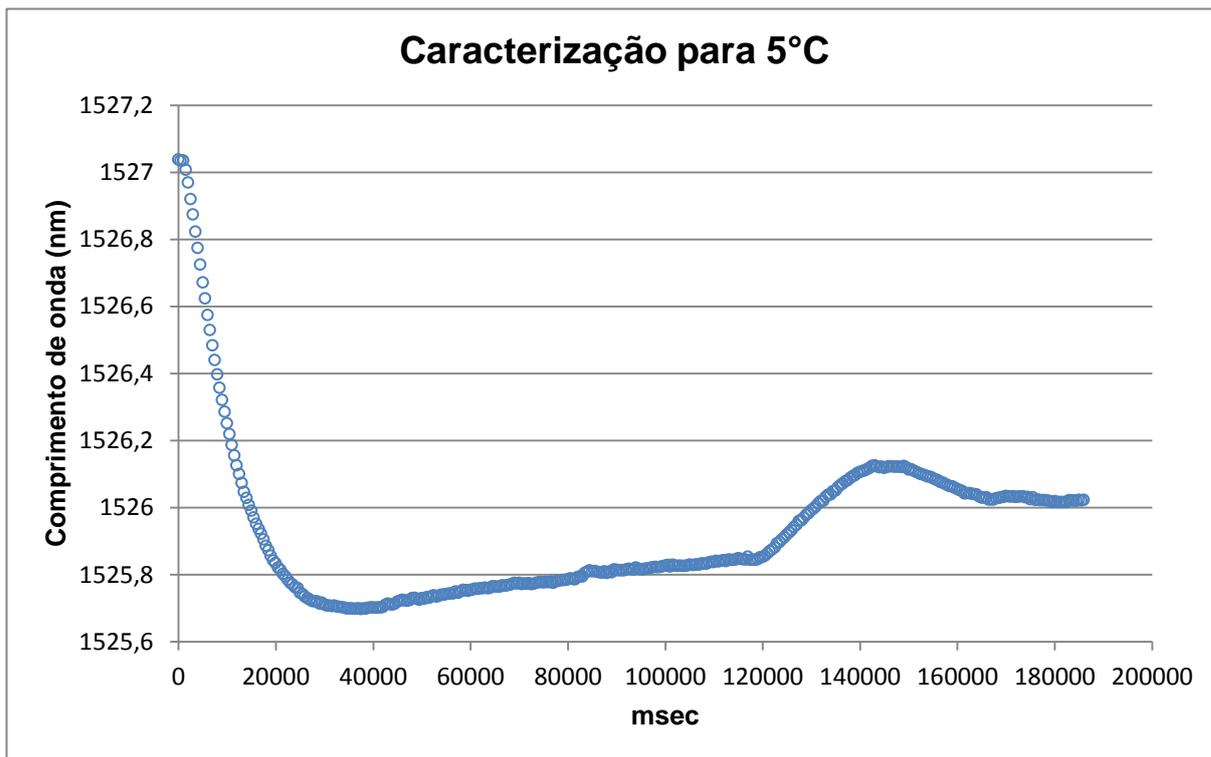


Gráfico 19 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 5°C.

Fonte: Autoria própria.

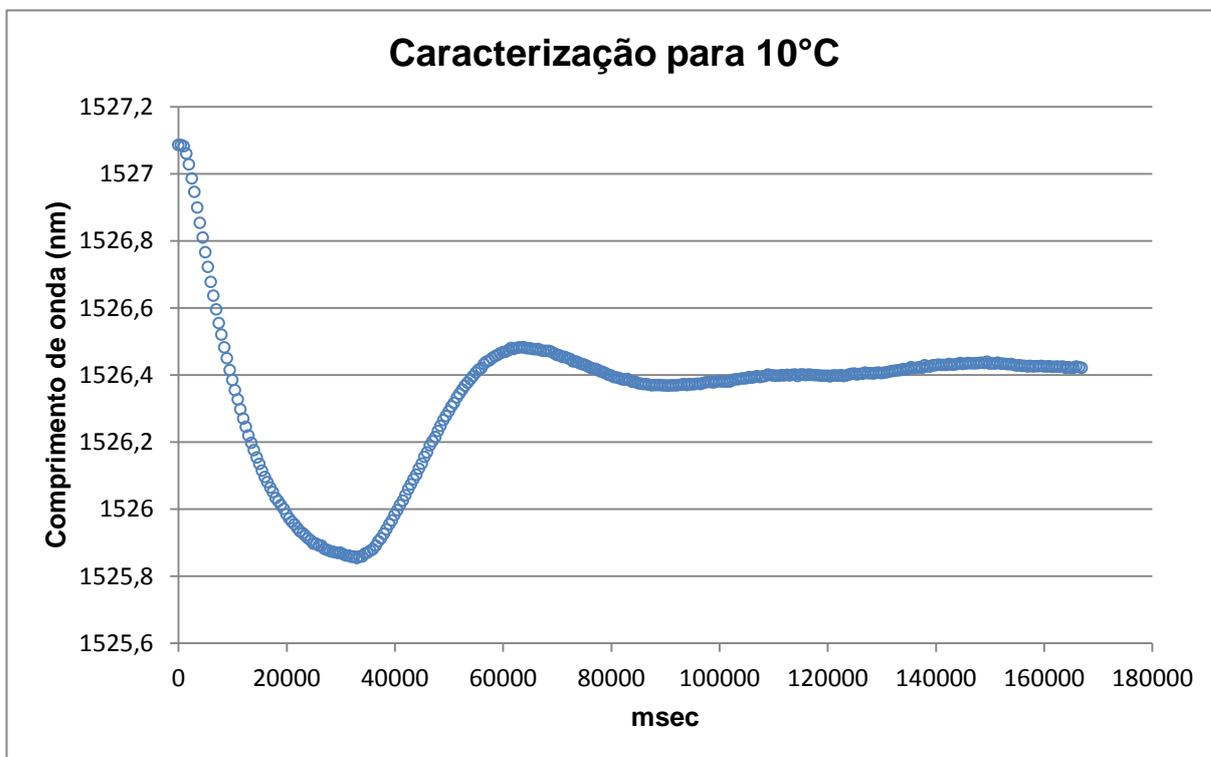


Gráfico 20 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 10°C.

Fonte: Autoria própria.

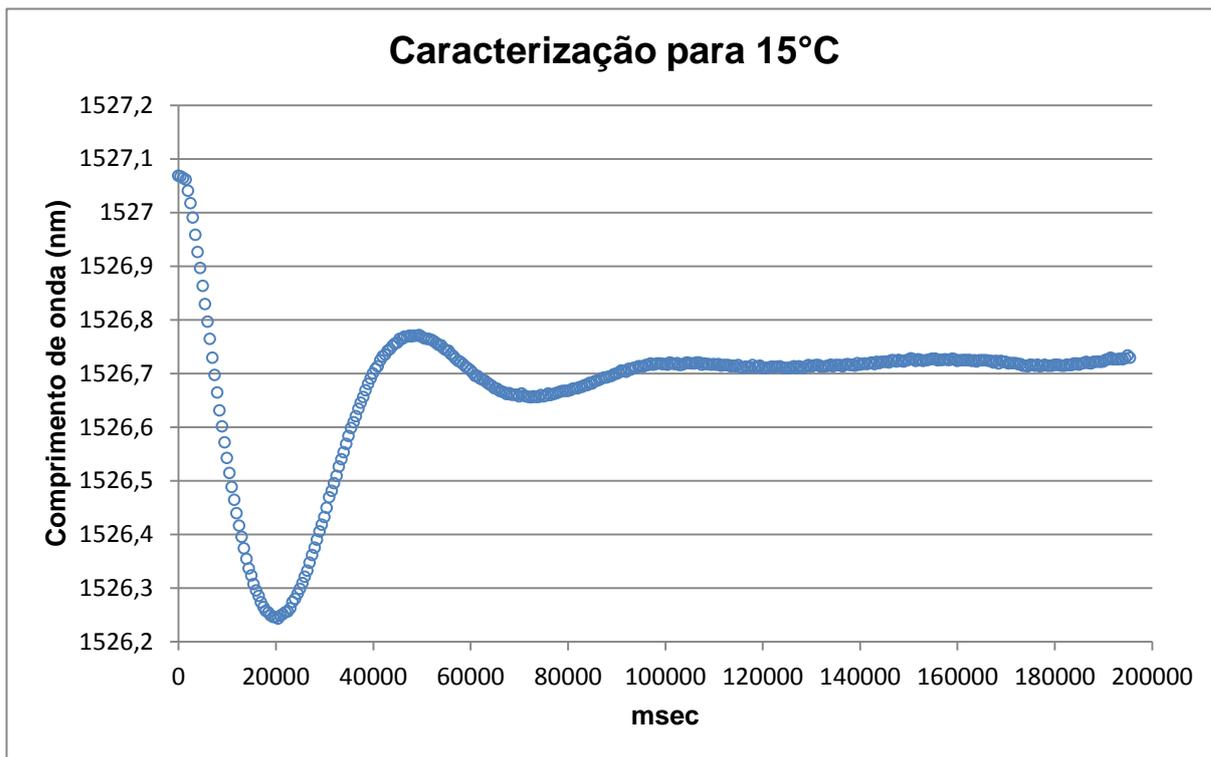


Gráfico 21 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 15°C.

Fonte: Autoria própria.

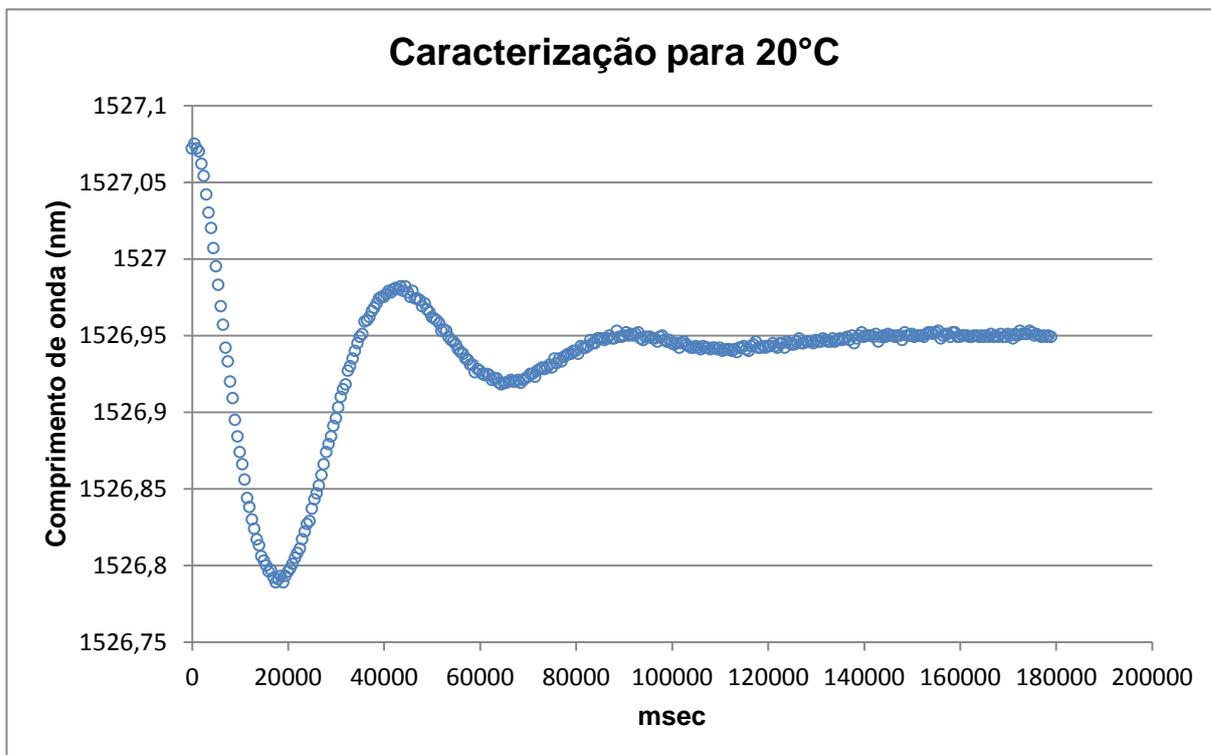


Gráfico 22 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 20°C.

Fonte: Autoria própria.

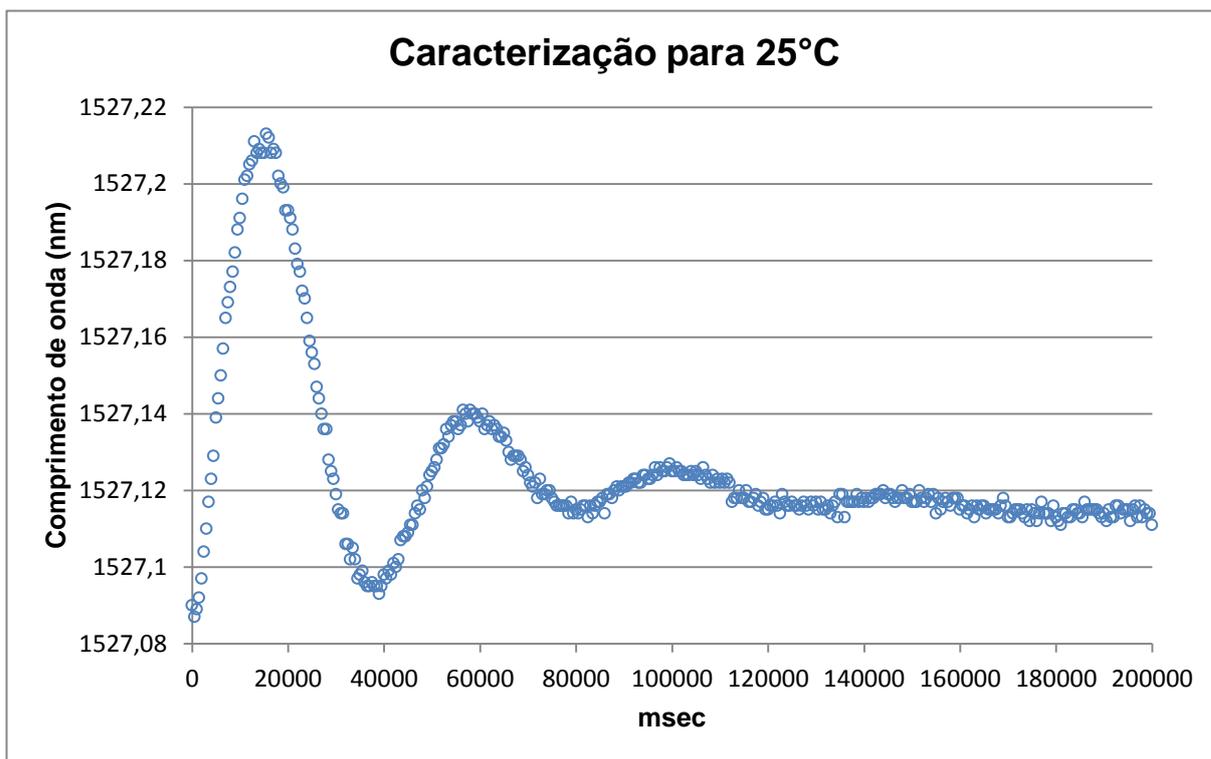


Gráfico 23 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 25°C.

Fonte: Autoria própria.

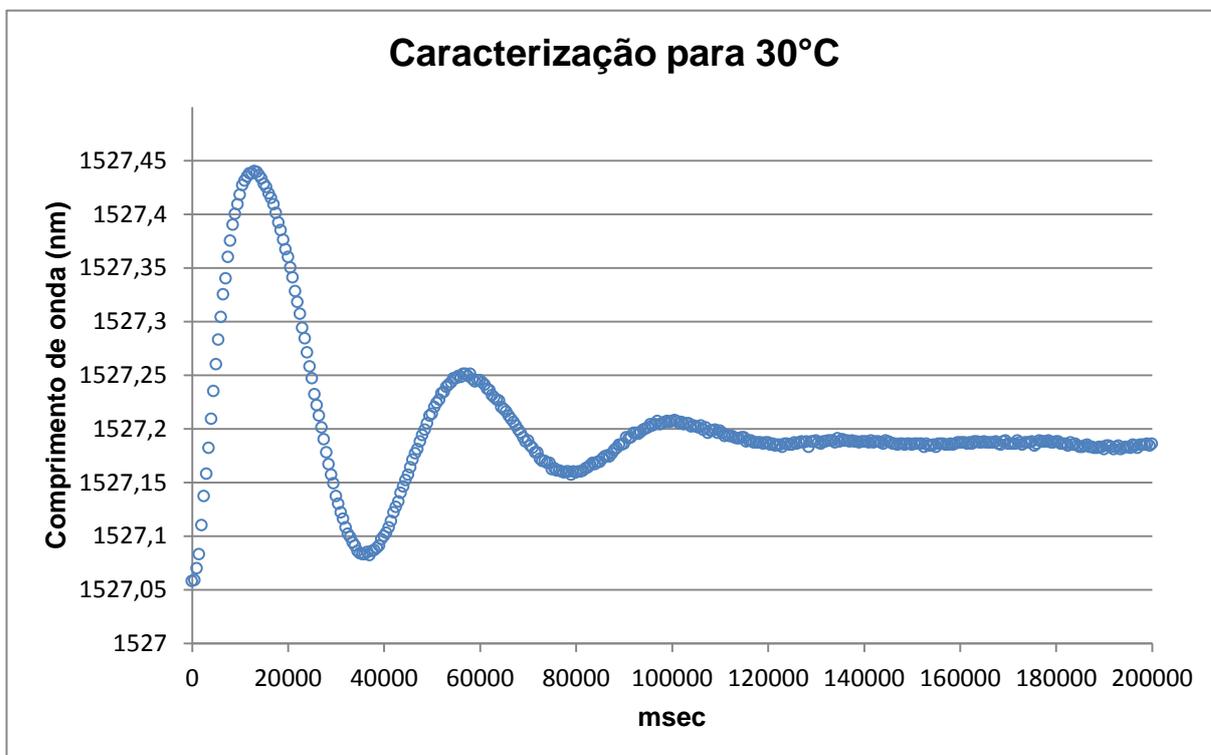


Gráfico 24 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 30°C.

Fonte: Autoria própria.

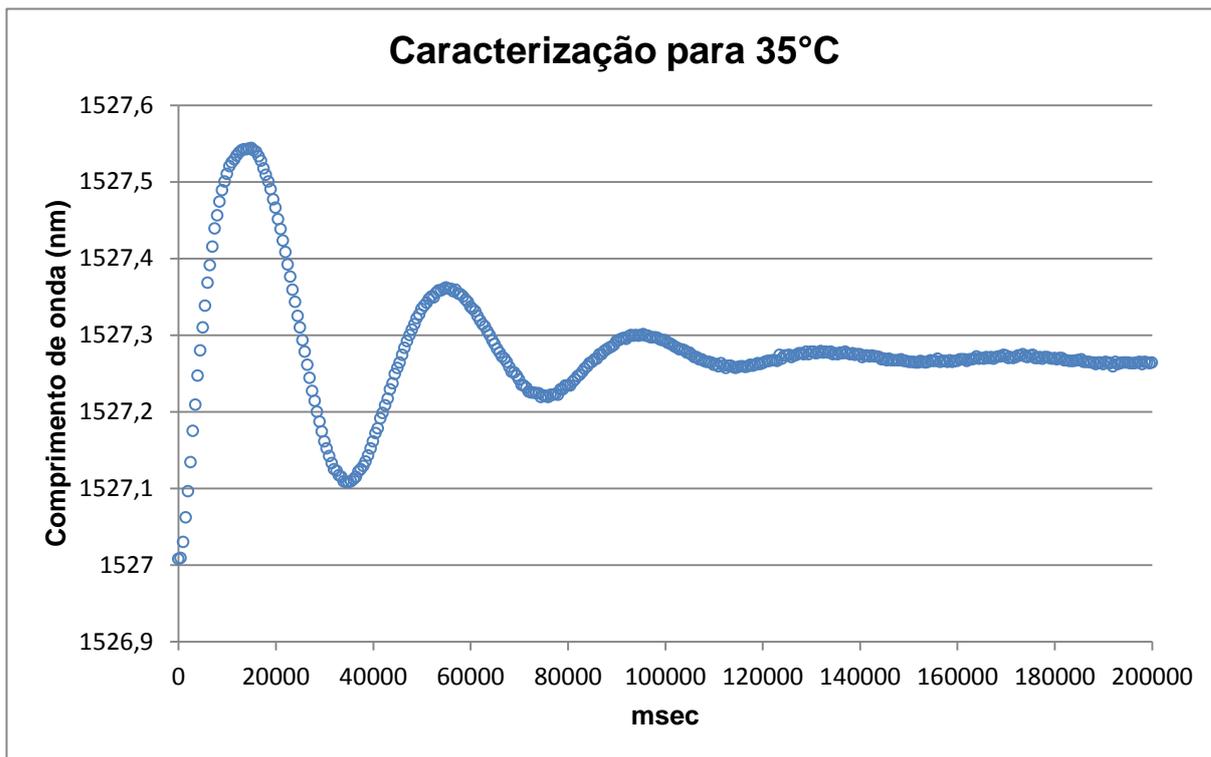


Gráfico 25 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 35°C.

Fonte: Autoria própria.

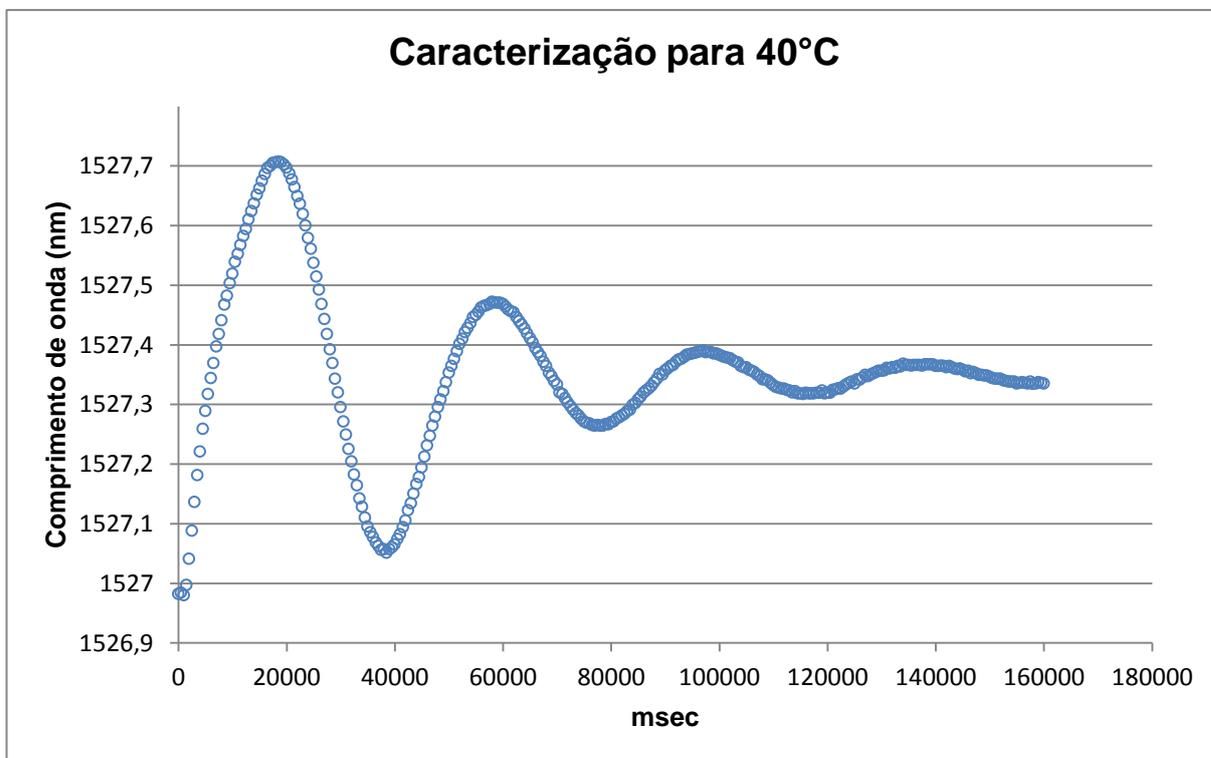


Gráfico 26 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 40°C.

Fonte: Autoria própria.

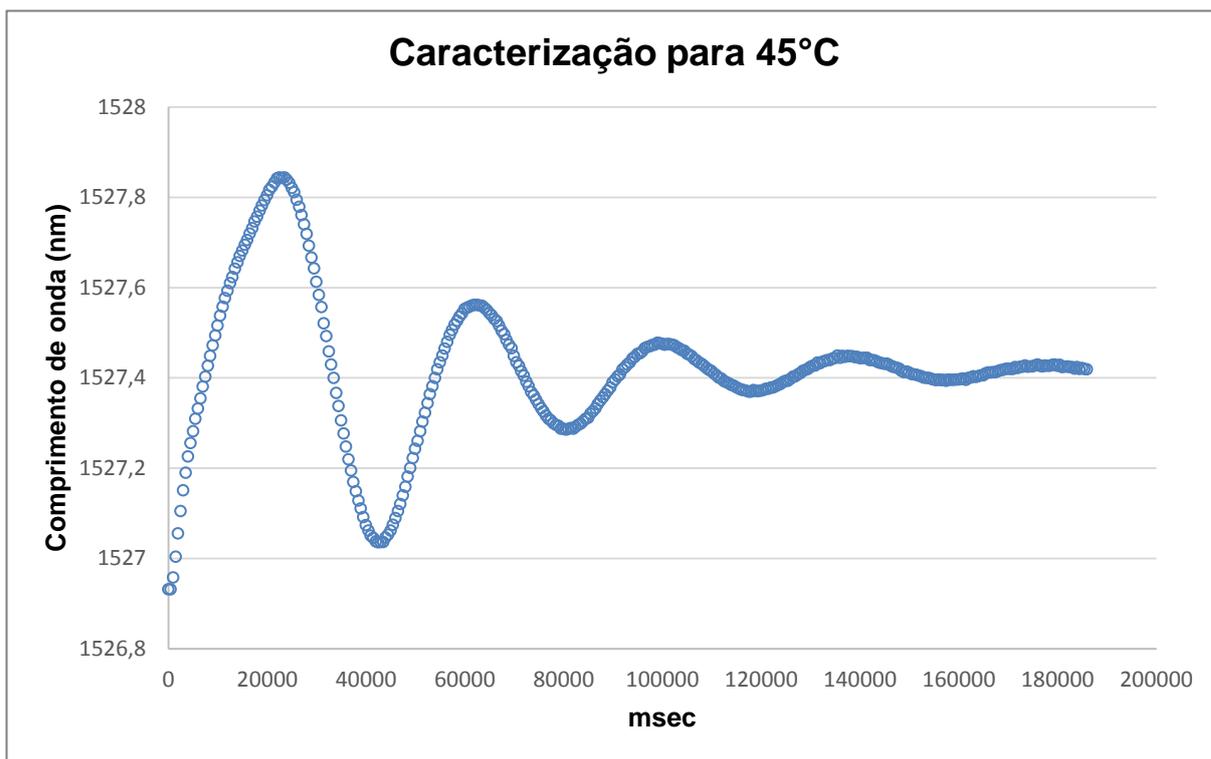


Gráfico 27 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 45°C.

Fonte: Autoria própria.

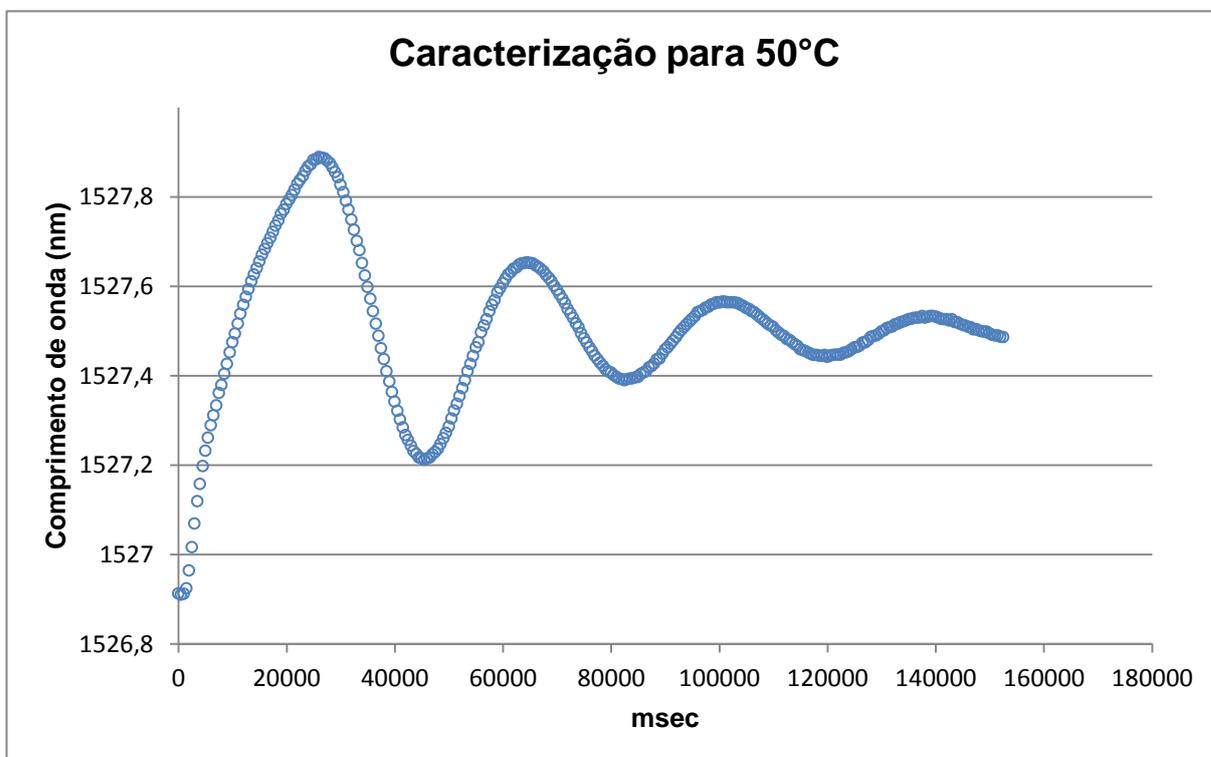


Gráfico 28 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 50°C.

Fonte: Autoria própria.

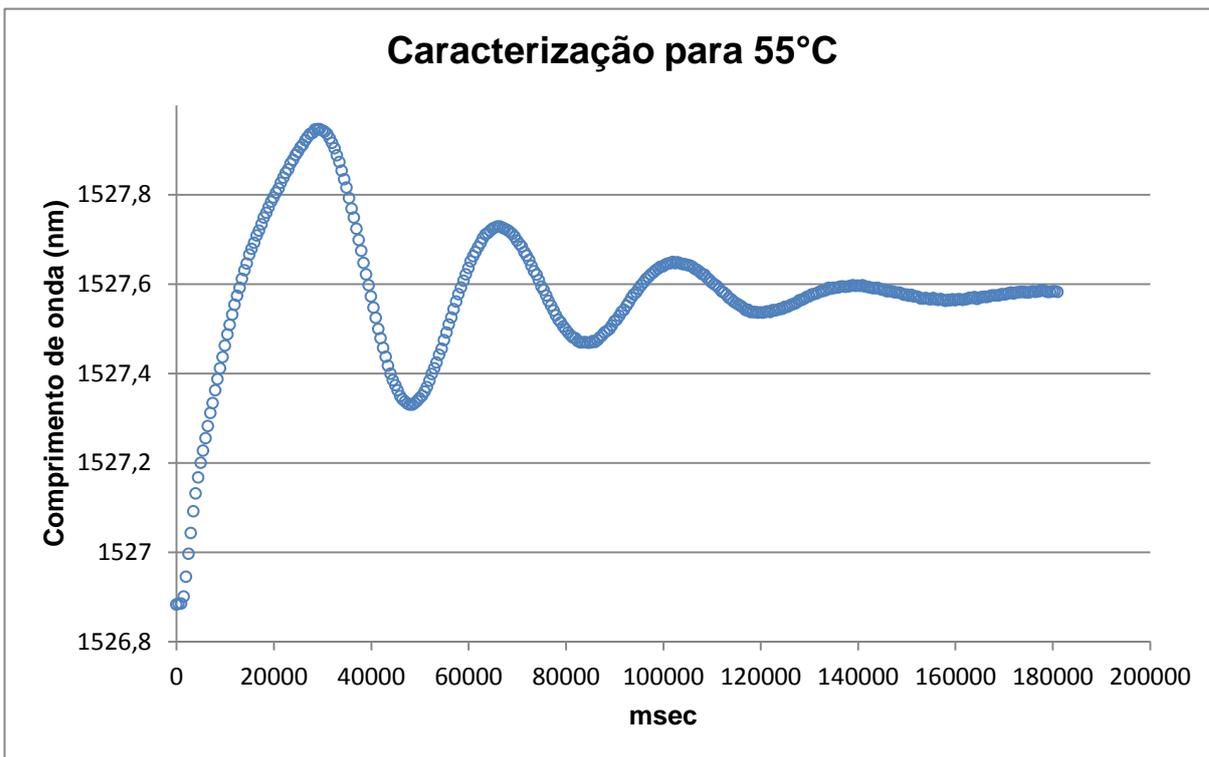


Gráfico 29 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 55°C.

Fonte: Autoria própria.

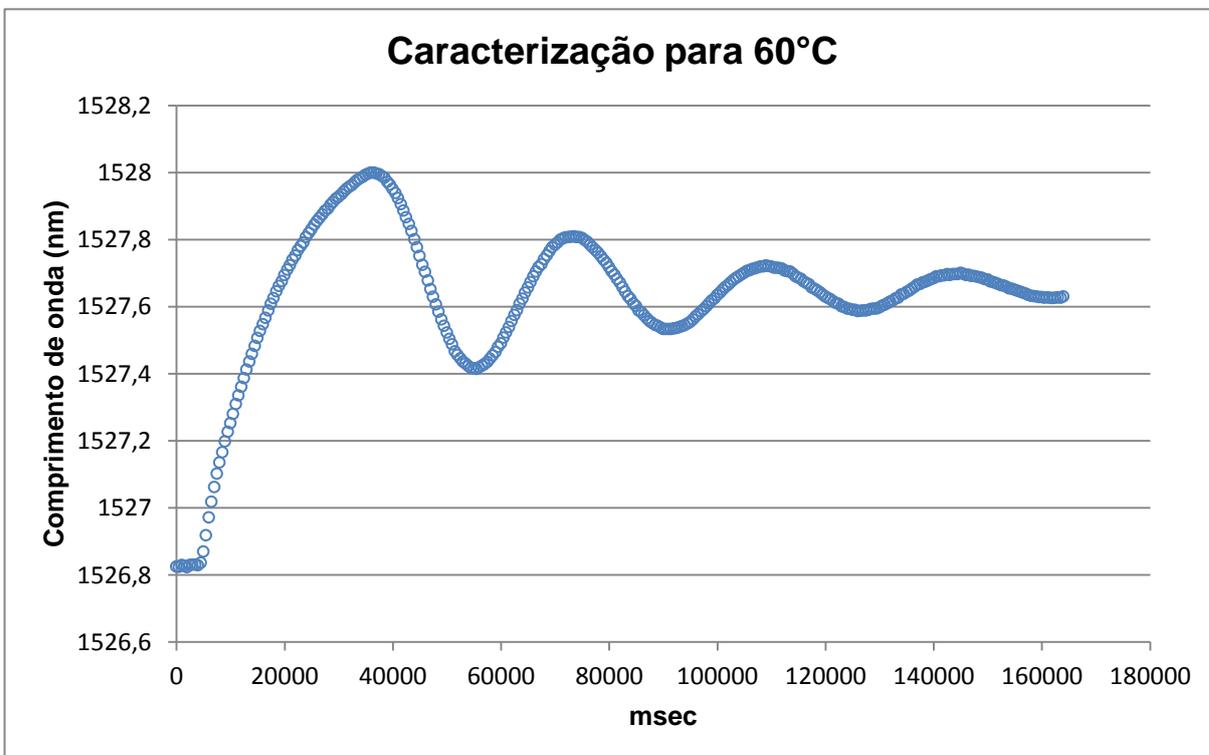


Gráfico 30 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional para 60°C.

Fonte: Autoria própria.

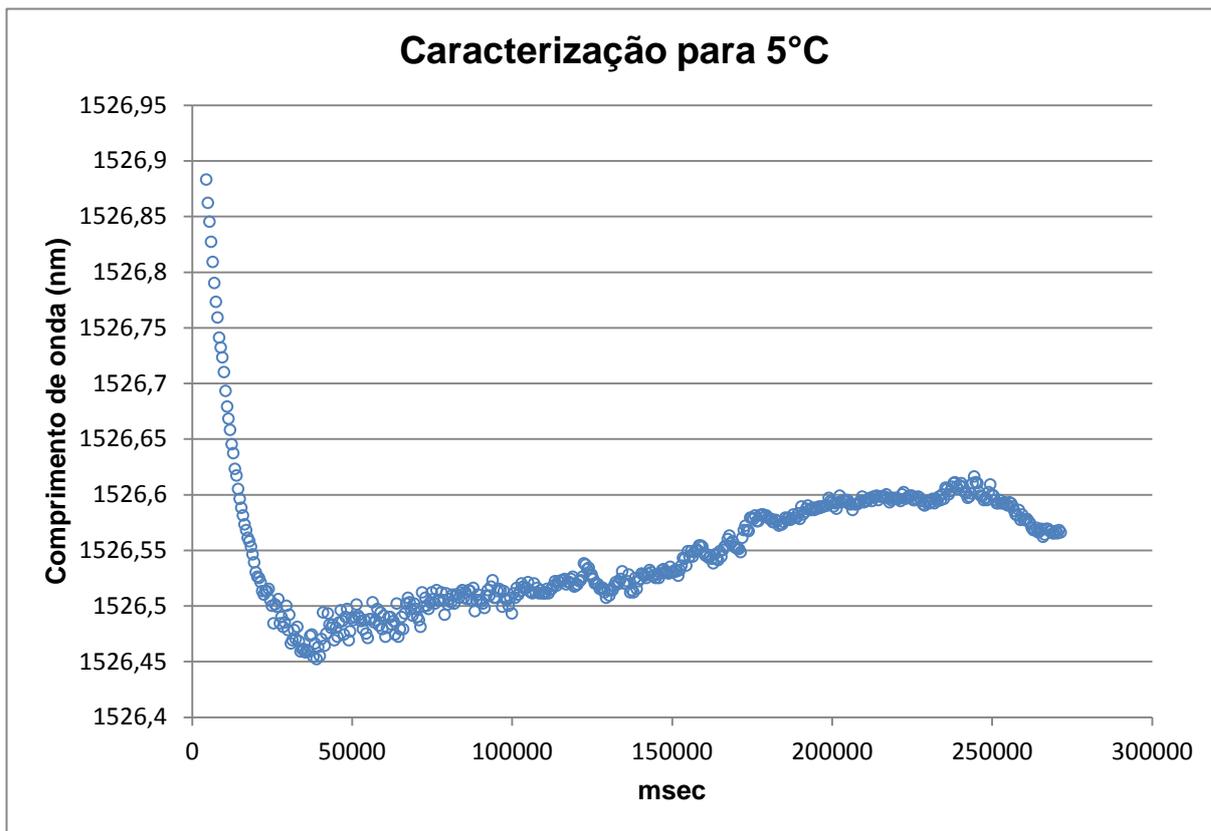


Gráfico 31 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 5°C.
Fonte: Autoria própria.

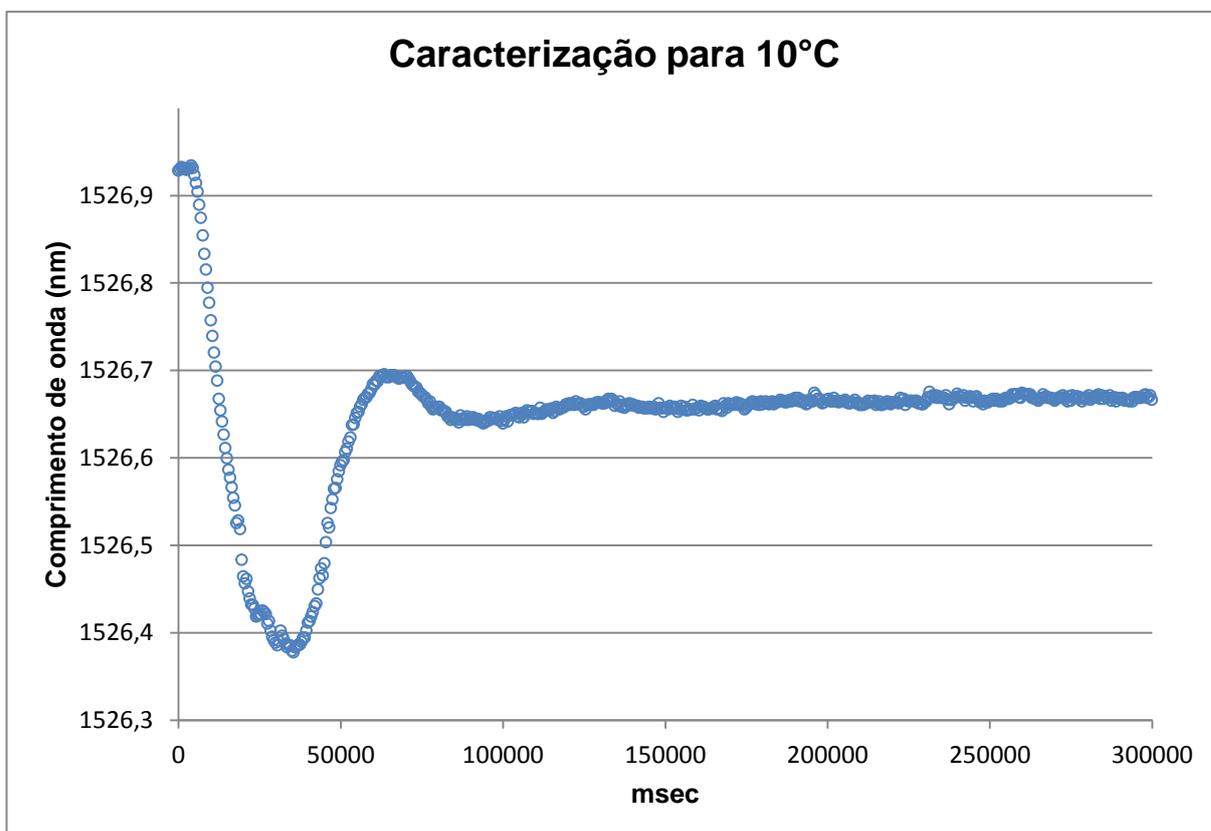


Gráfico 32 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 10°C.
Fonte: Autoria própria.

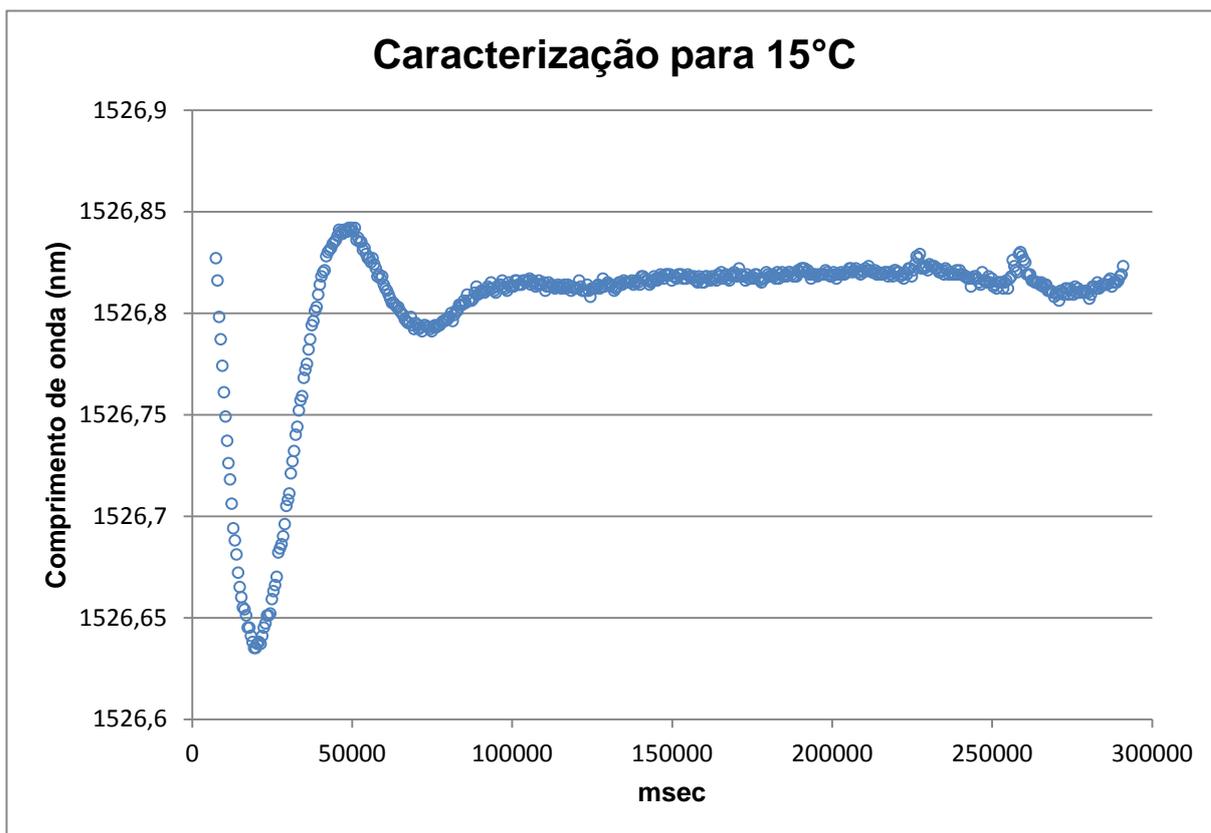


Gráfico 33 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 15°C.
Fonte: Autoria própria.

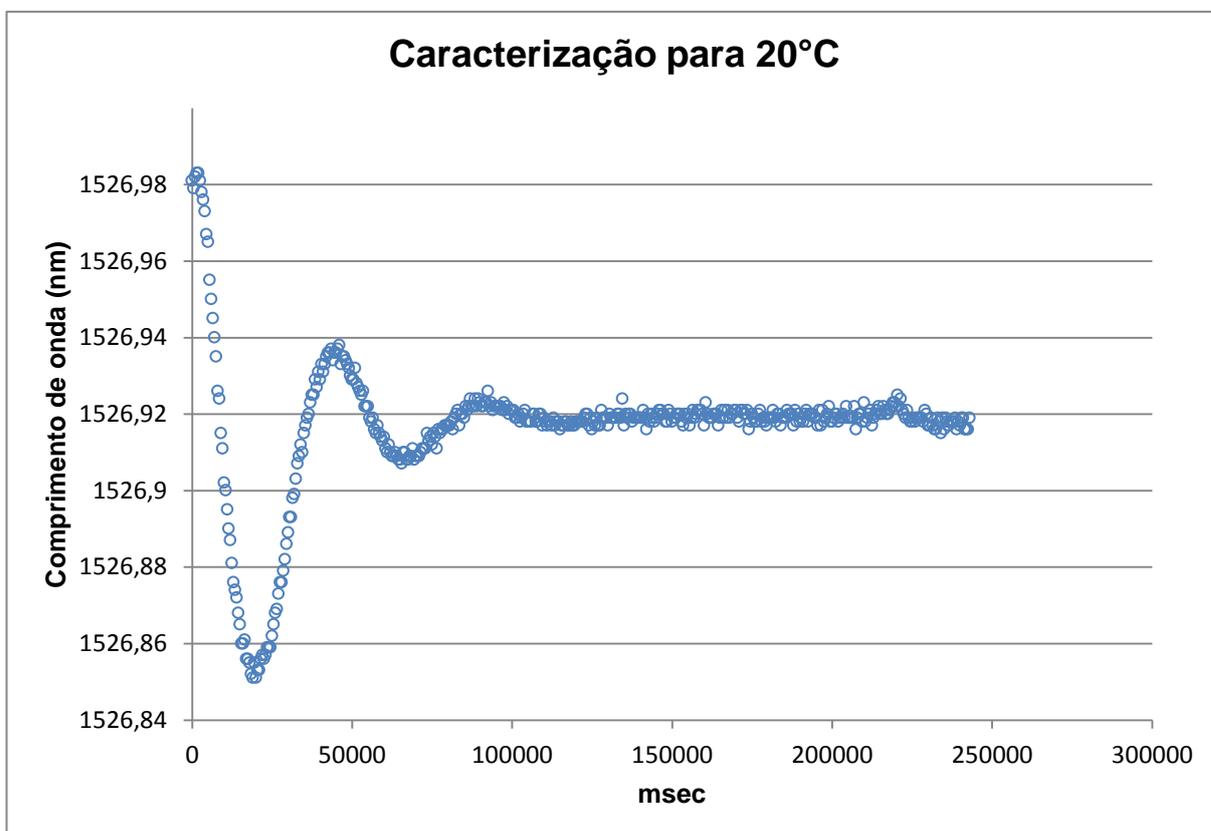


Gráfico 34 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 20°C.
Fonte: Autoria própria.

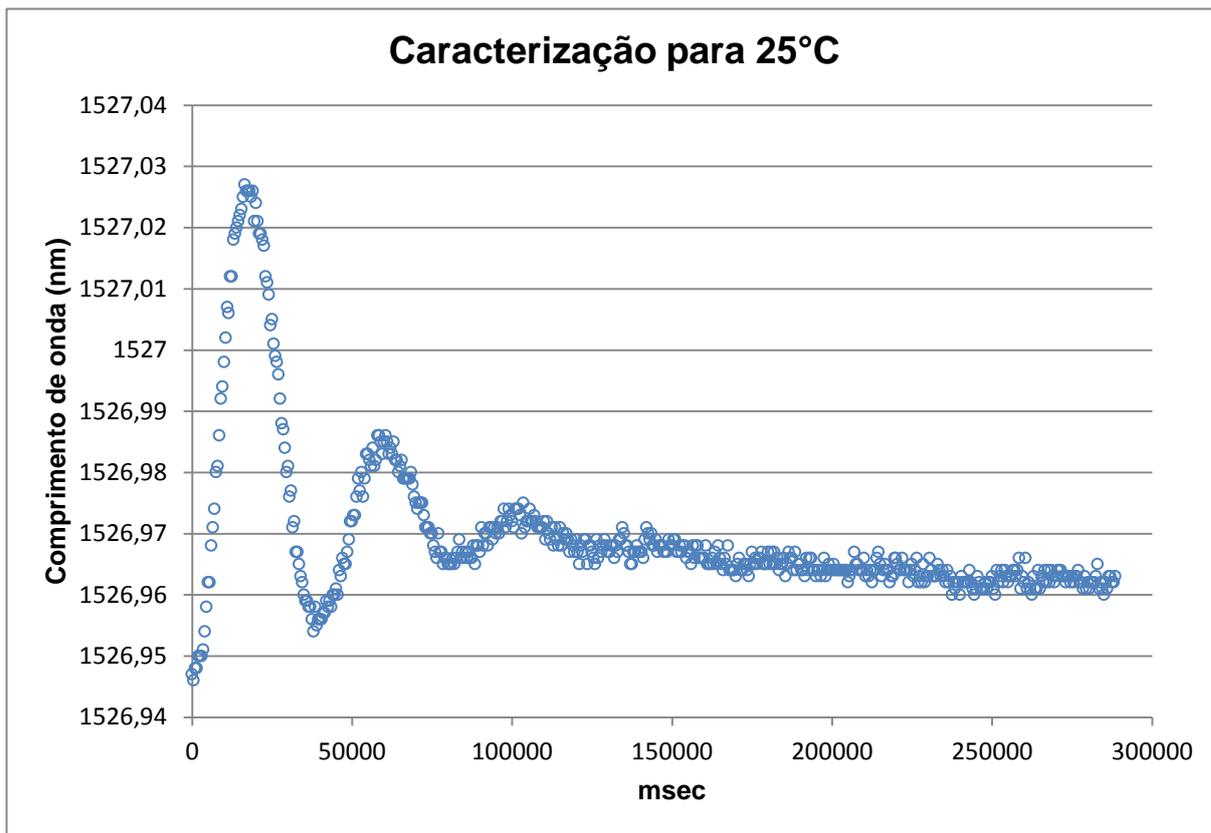


Gráfico 35 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 25°C.
Fonte: Autoria própria.

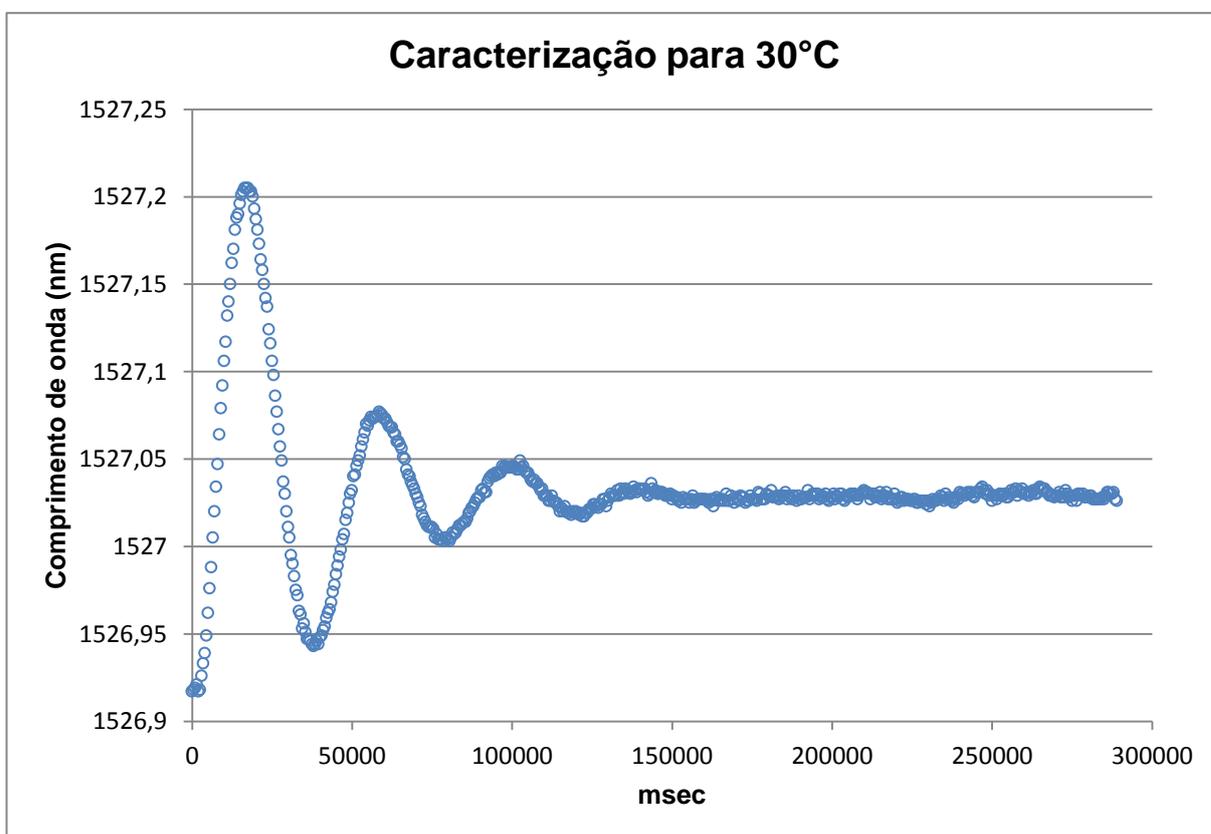


Gráfico 36 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 30°C.
Fonte: Autoria própria.

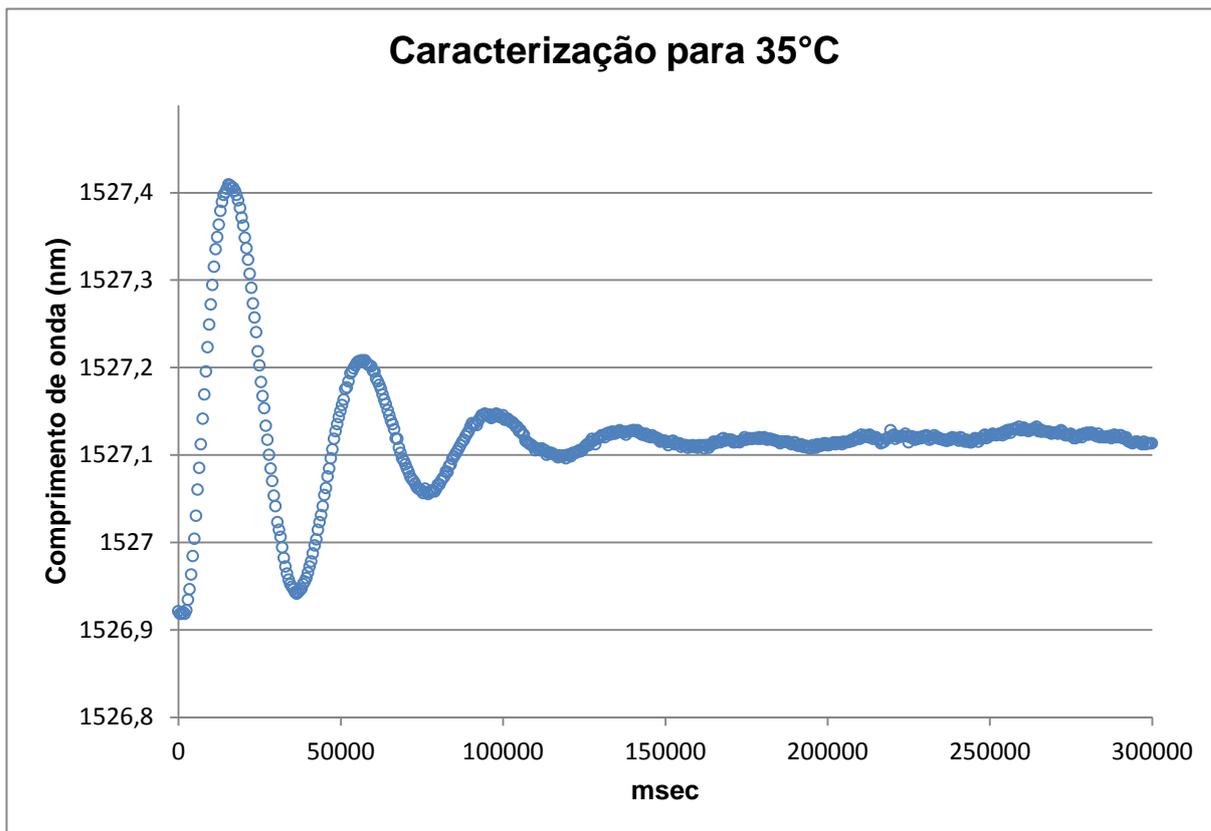


Gráfico 37 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 35°C.
Fonte: Autoria própria.

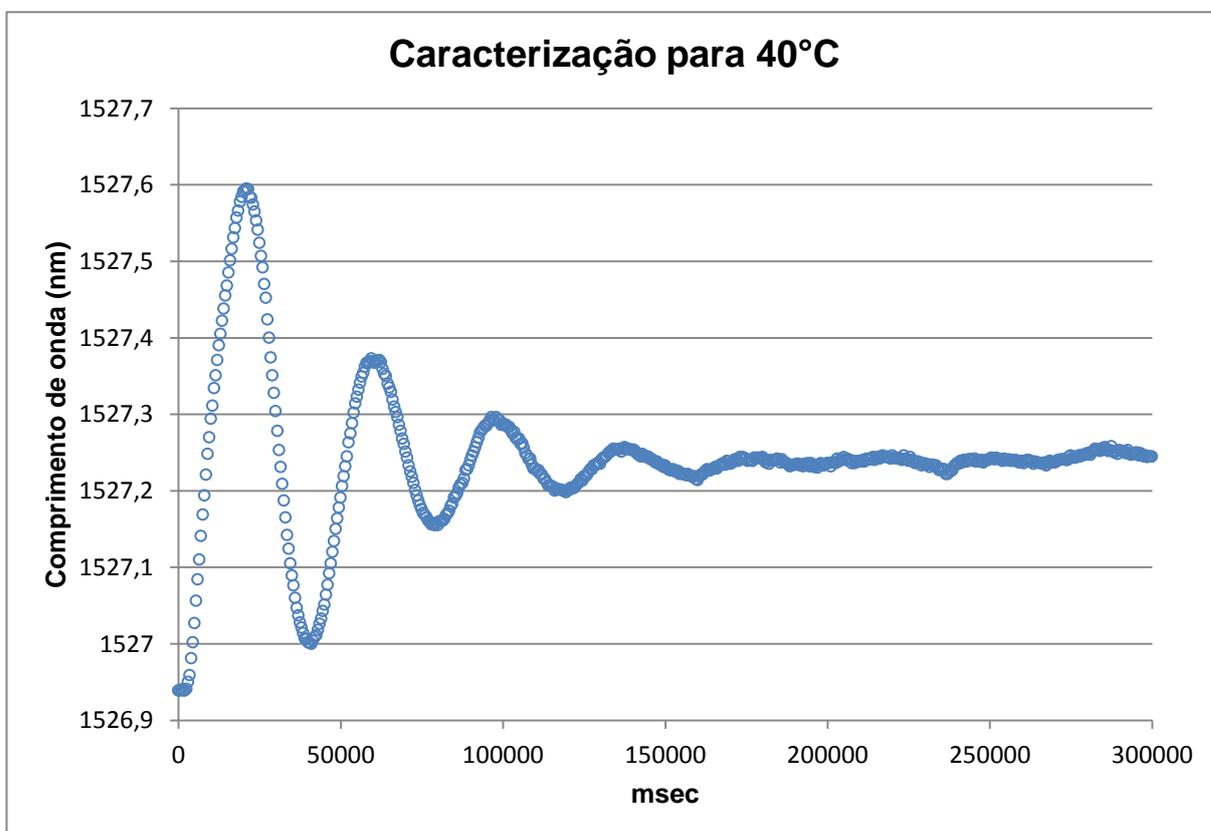


Gráfico 38 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 40°C.
Fonte: Autoria própria.

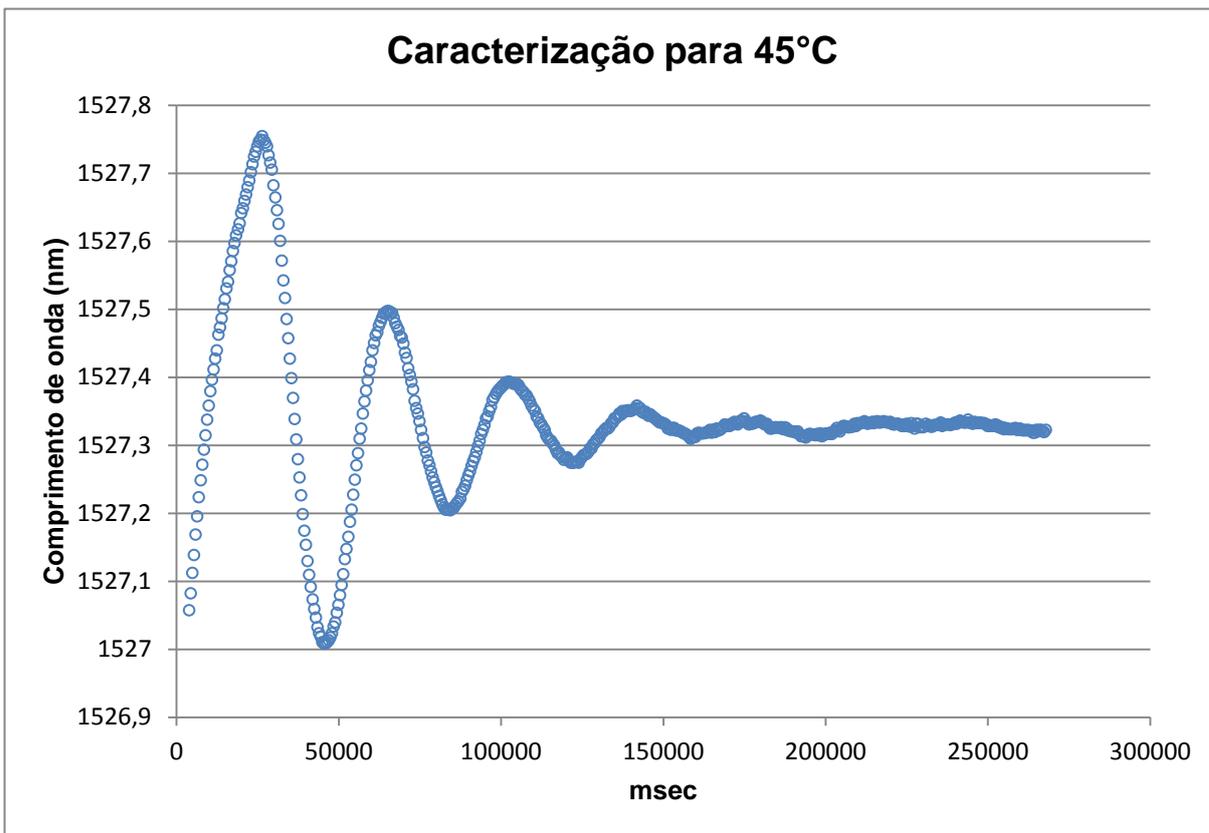


Gráfico 39 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 45°C.
Fonte: Autoria própria.

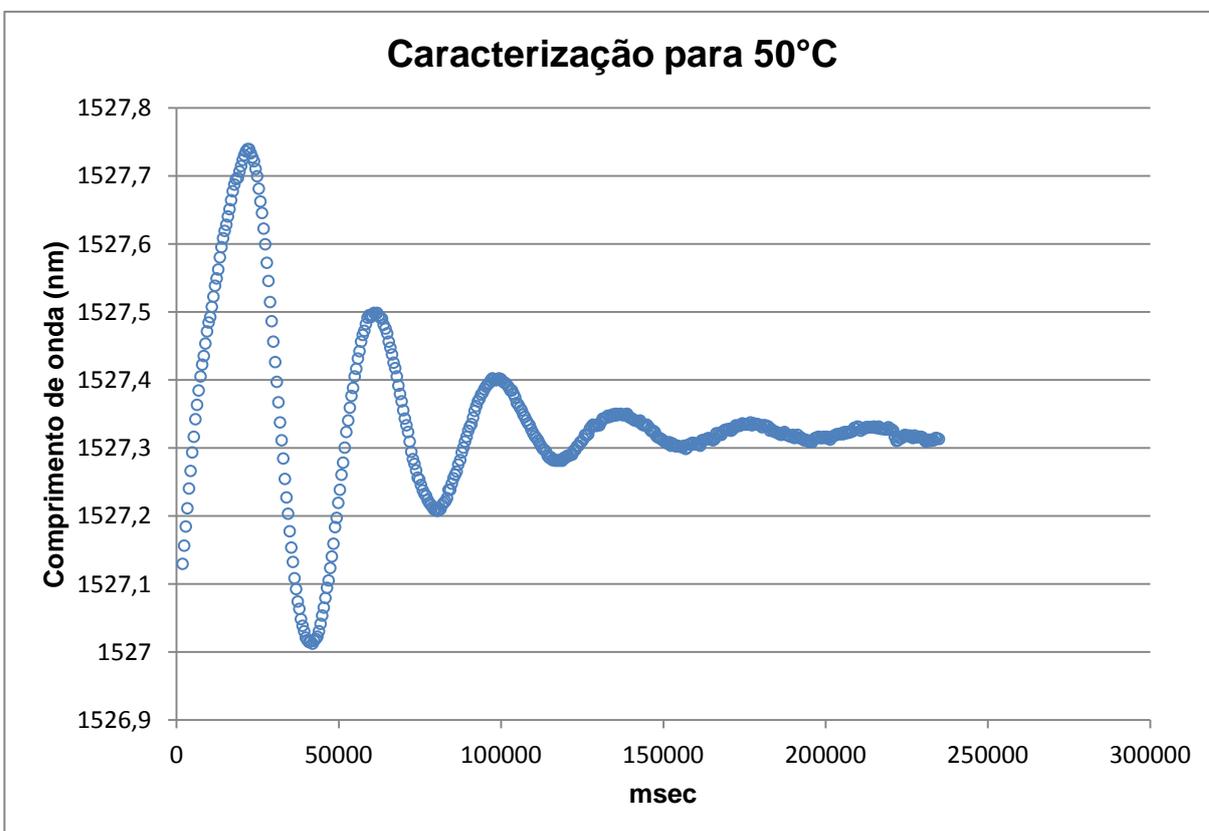


Gráfico 40 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 50°C.
Fonte: Autoria própria.

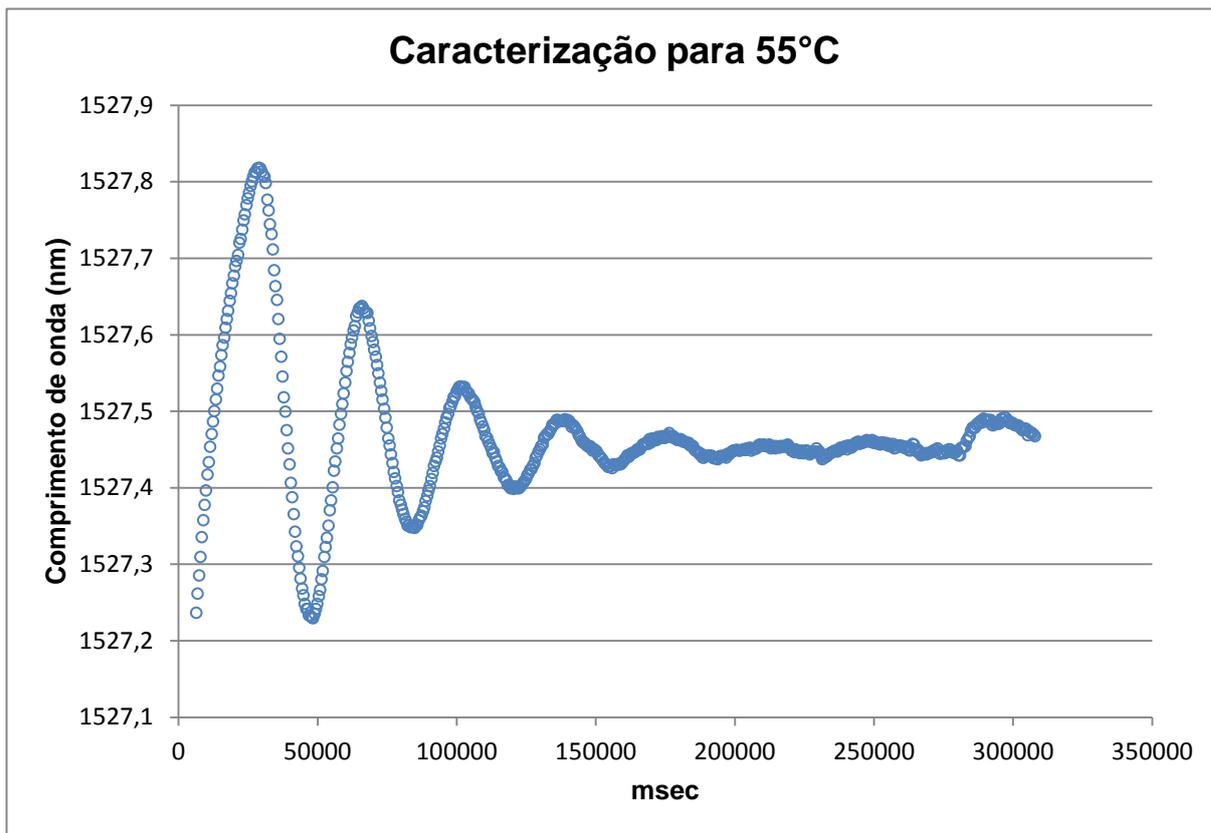


Gráfico 41 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 55°C.
Fonte: Autoria própria.

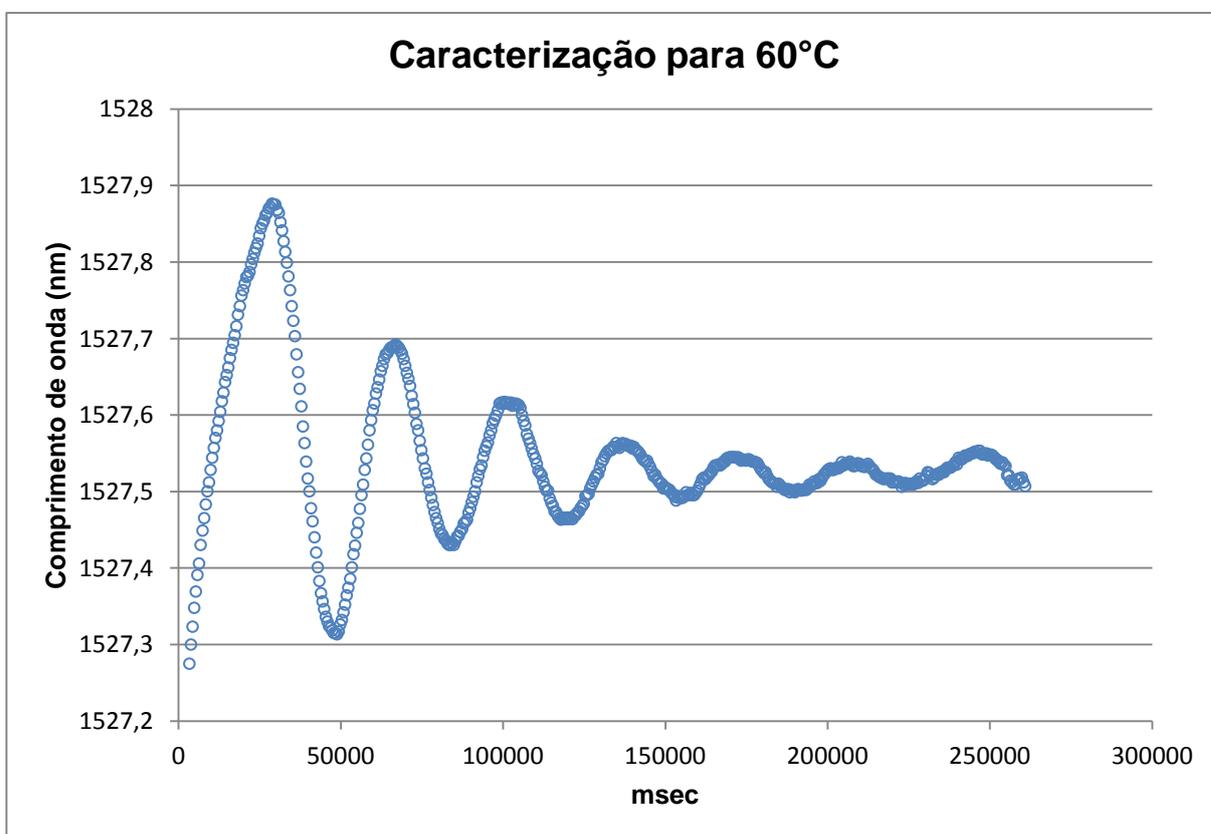


Gráfico 42 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® gel para 60°C.
Fonte: Autoria própria.

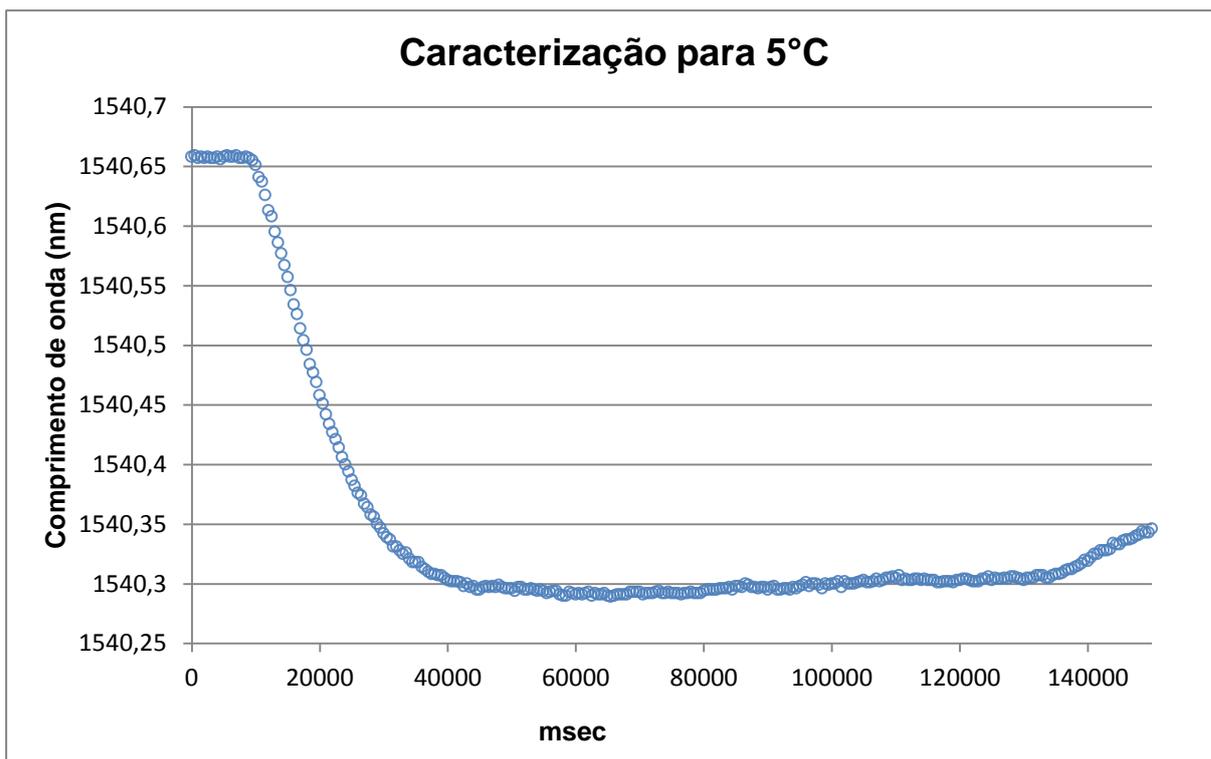


Gráfico 43 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 5°C.
Fonte: Autoria própria.

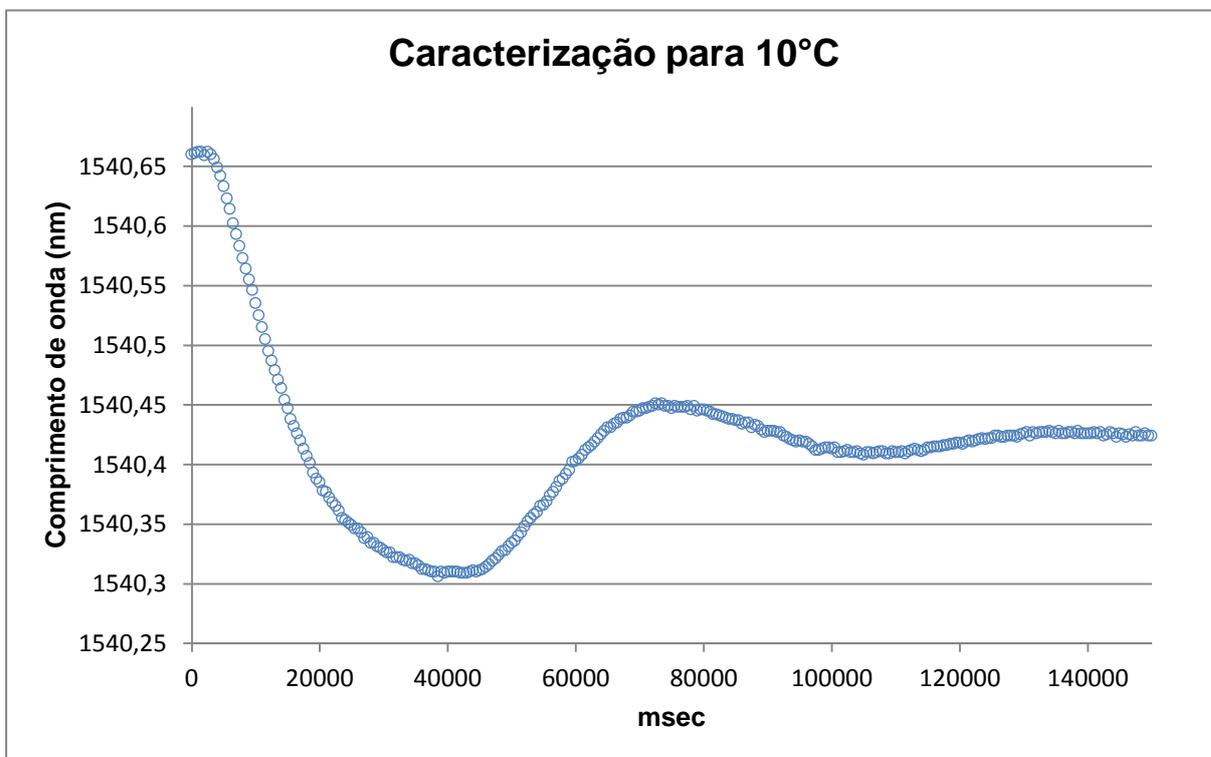


Gráfico 44 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 10°C.
Fonte: Autoria própria.

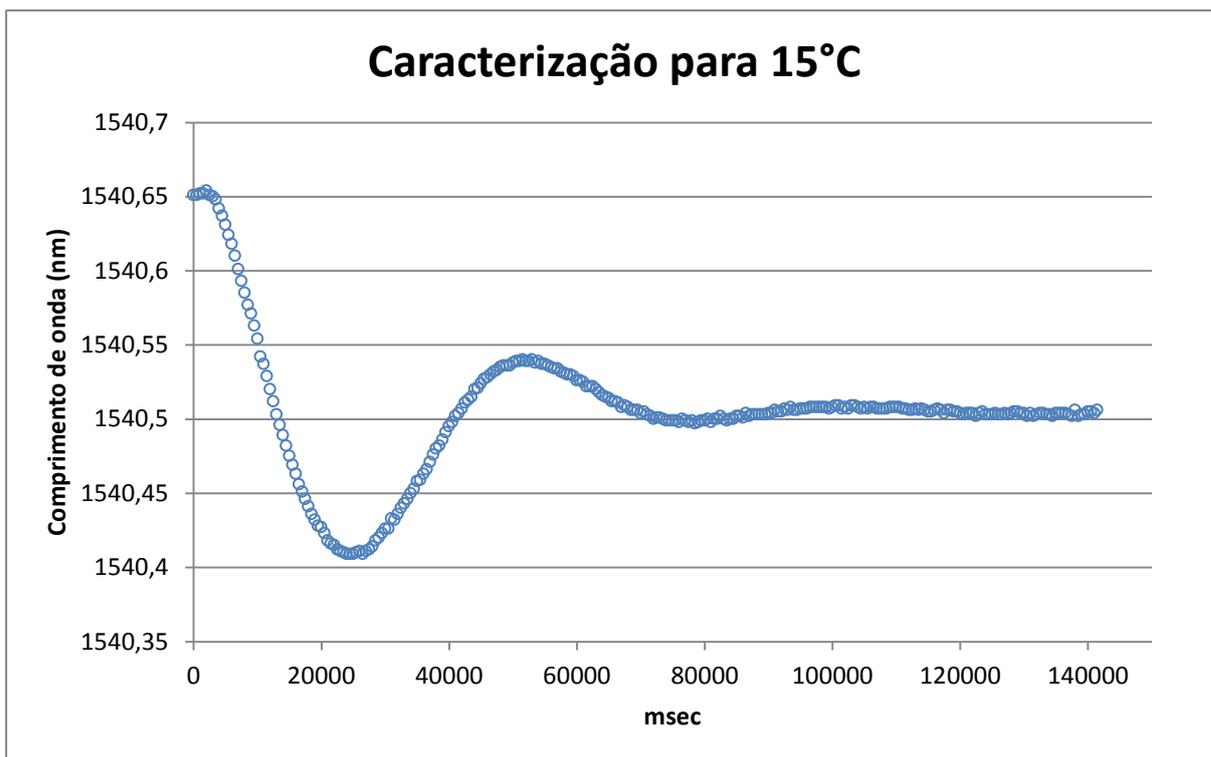


Gráfico 45 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 15°C.
Fonte: Autoria própria.

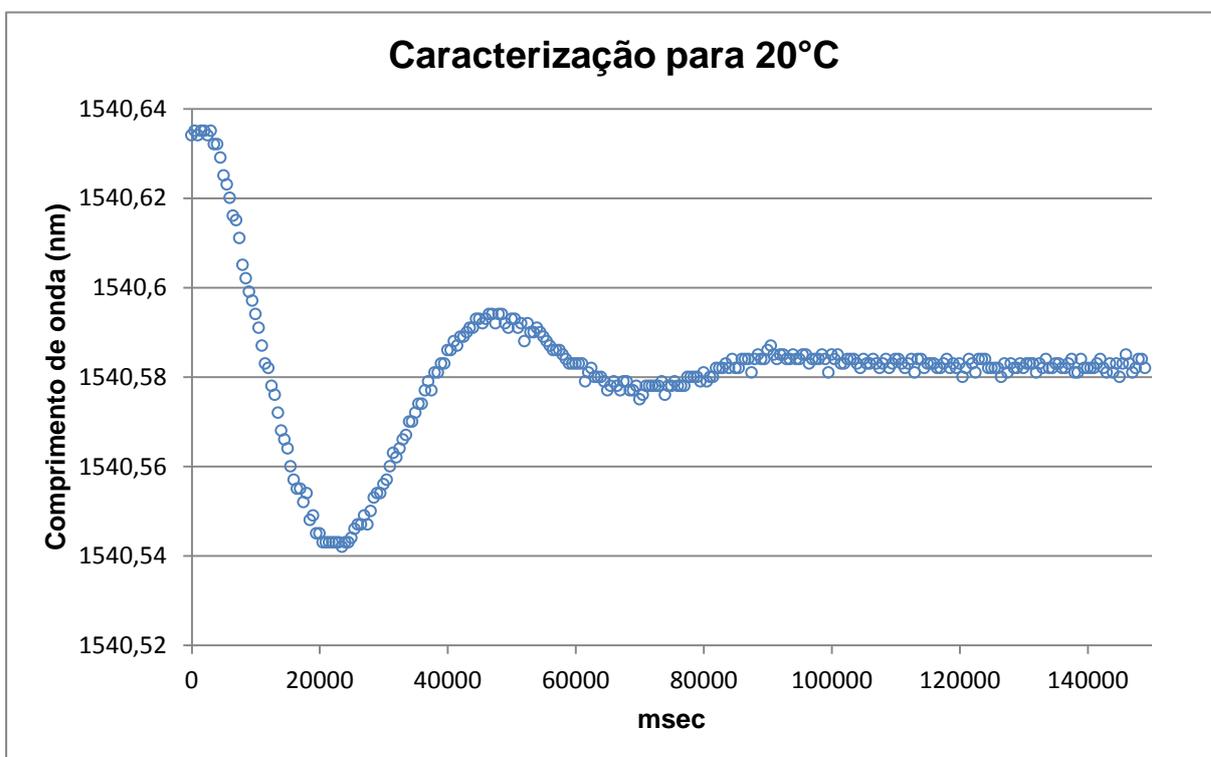


Gráfico 46 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 20°C.
Fonte: Autoria própria.

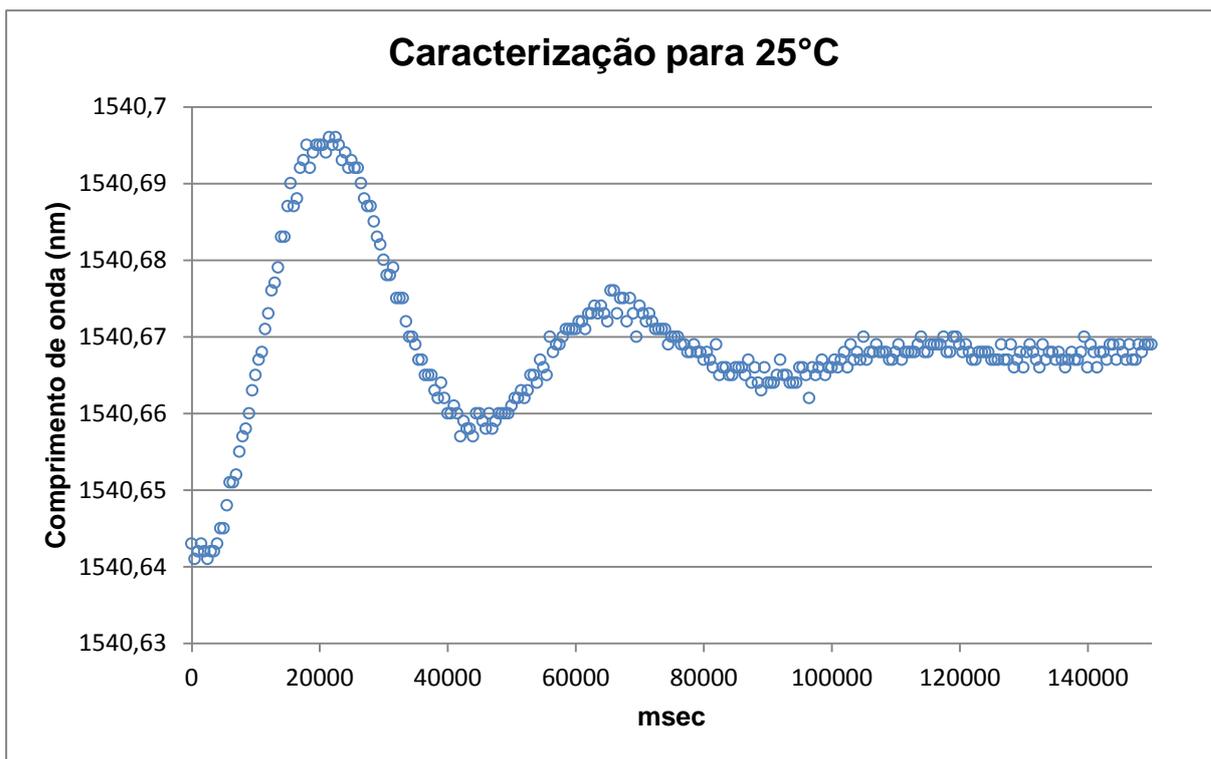


Gráfico 47 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 25°C.
Fonte: Autoria própria.

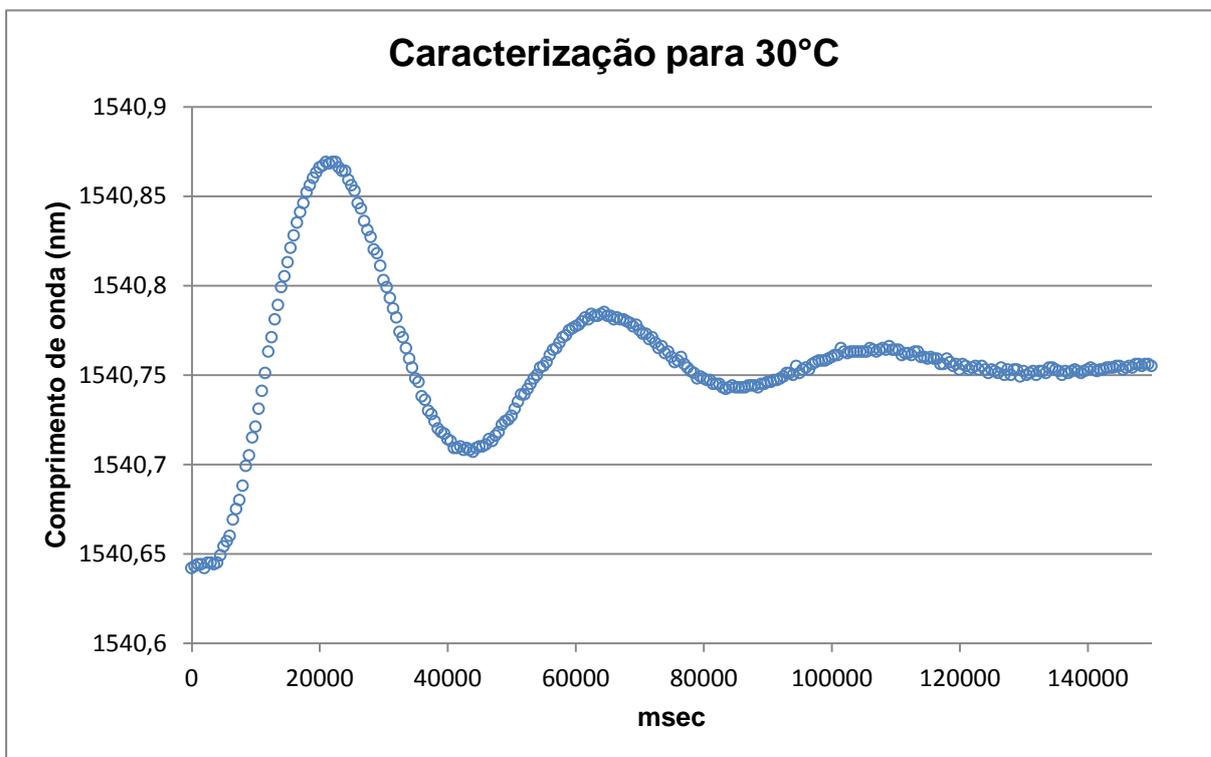


Gráfico 48 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 30°C.
Fonte: Autoria própria.

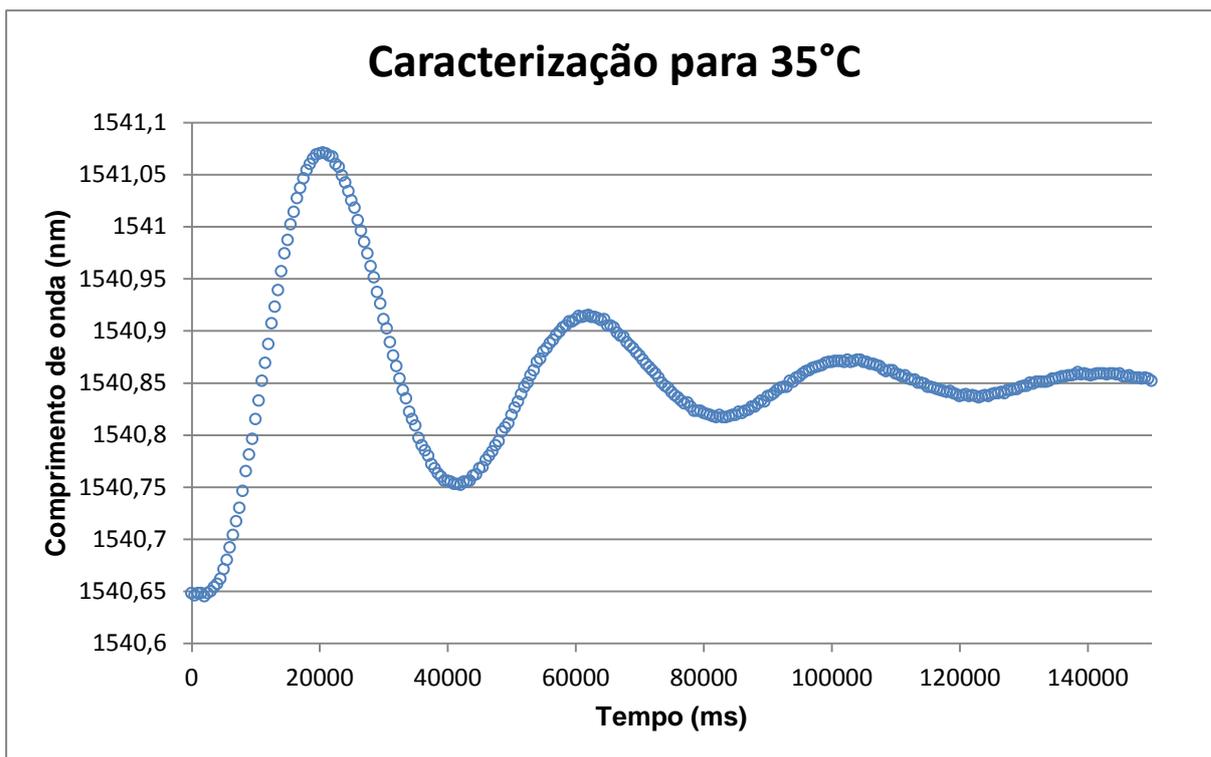


Gráfico 49 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 35°C.
Fonte: Autoria própria.

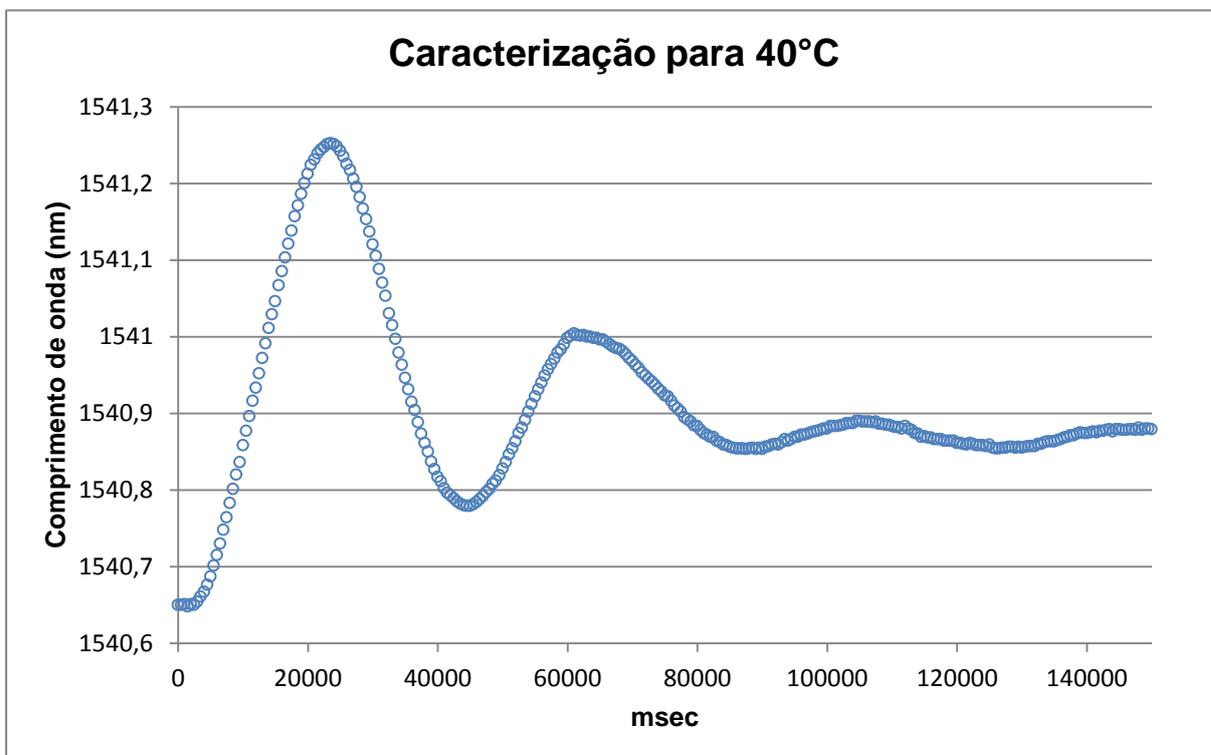


Gráfico 50 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 40°C.
Fonte: Autoria própria.

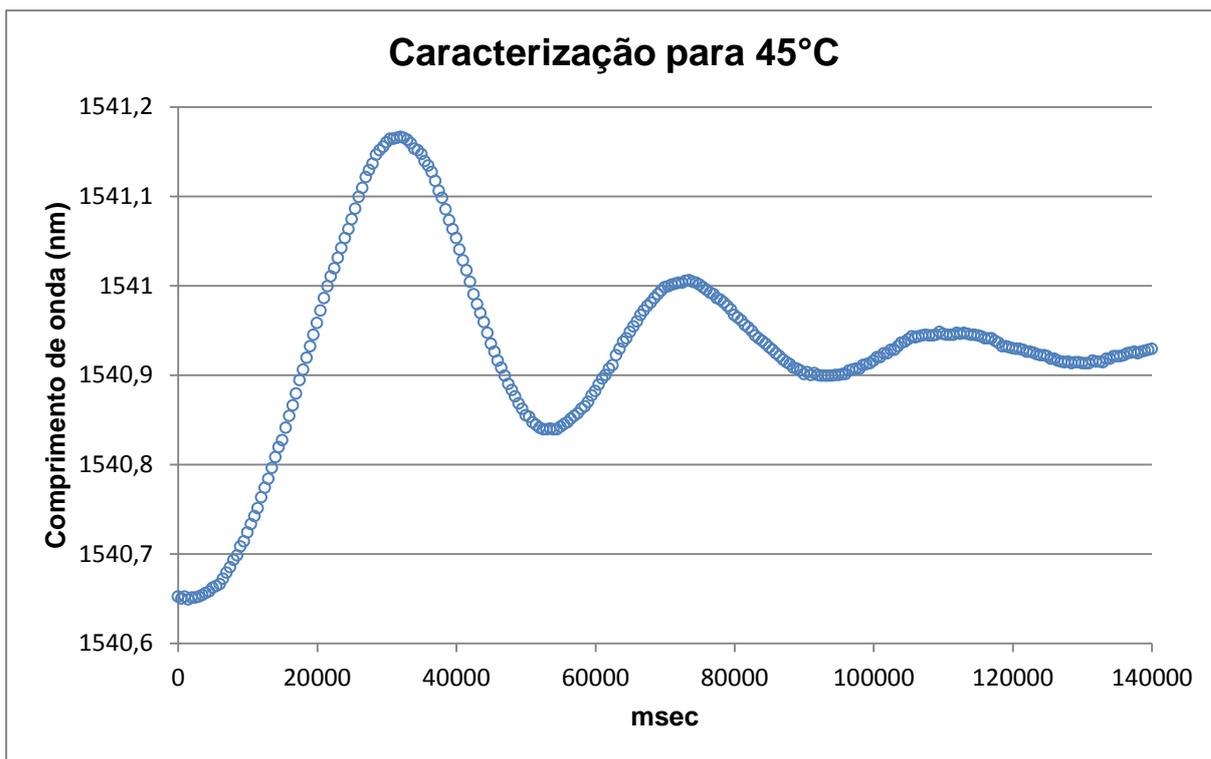


Gráfico 51 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 45°C.
Fonte: Autoria própria.

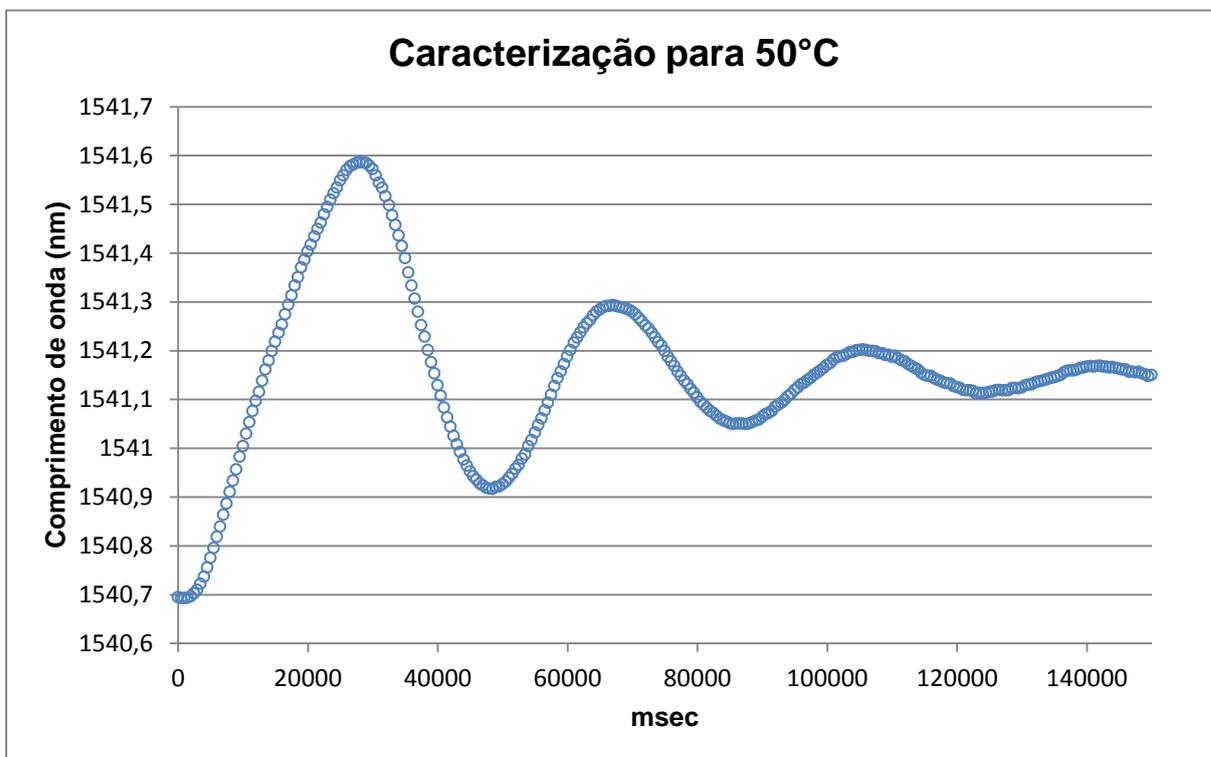


Gráfico 52 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 50°C.
Fonte: Autoria própria.

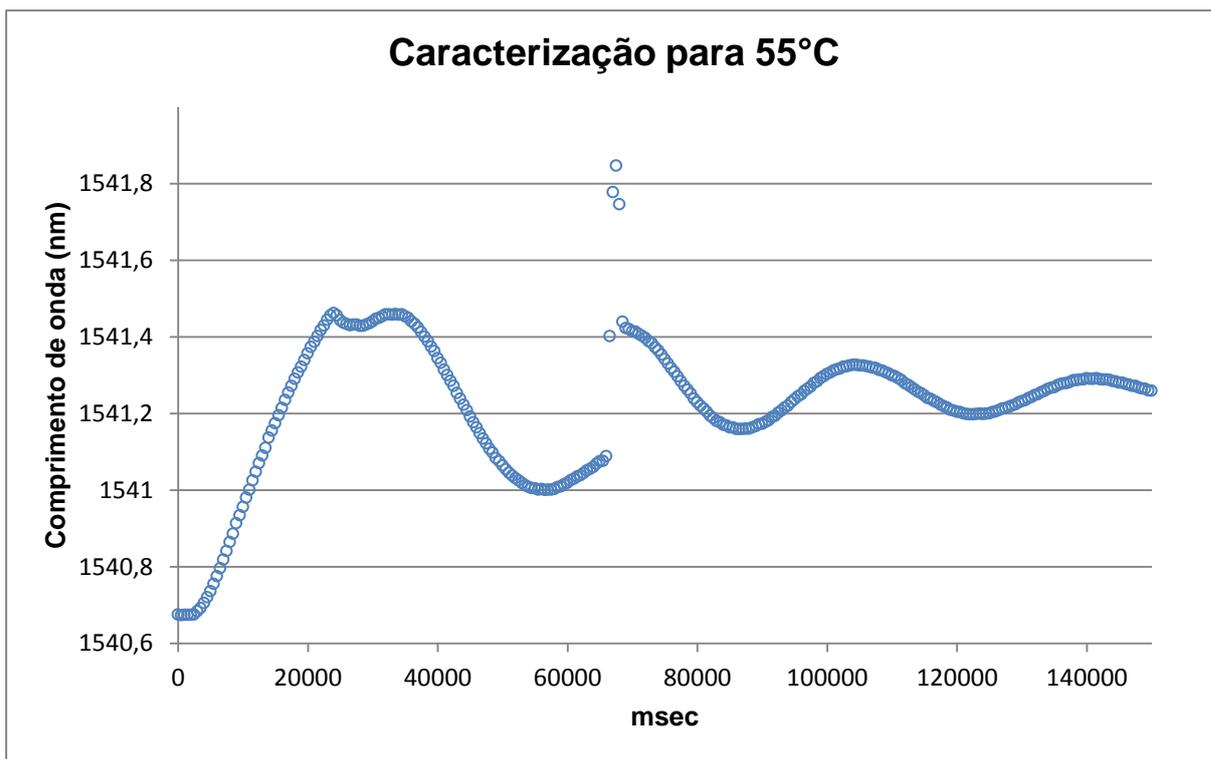


Gráfico 53 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 55°C.
Fonte: Autoria própria.

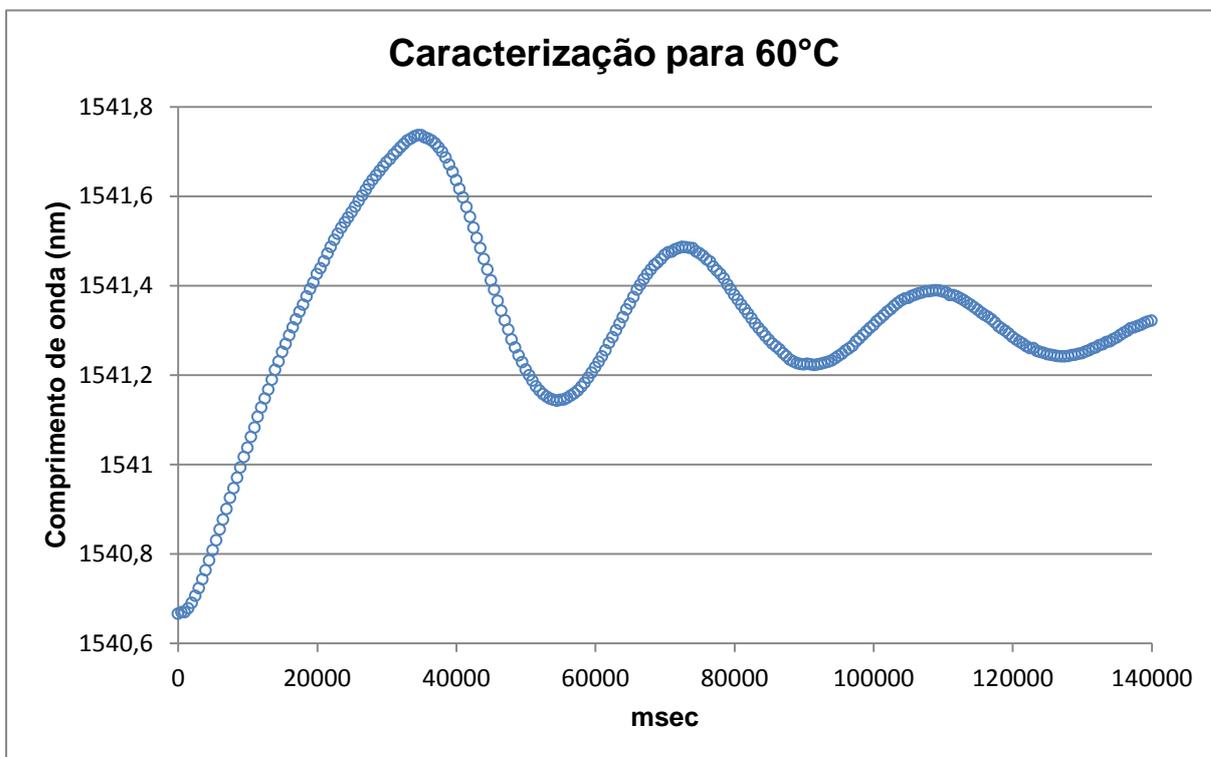


Gráfico 54 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Super Bonder® convencional e um tubo metálico para 60°C.
Fonte: Autoria própria.

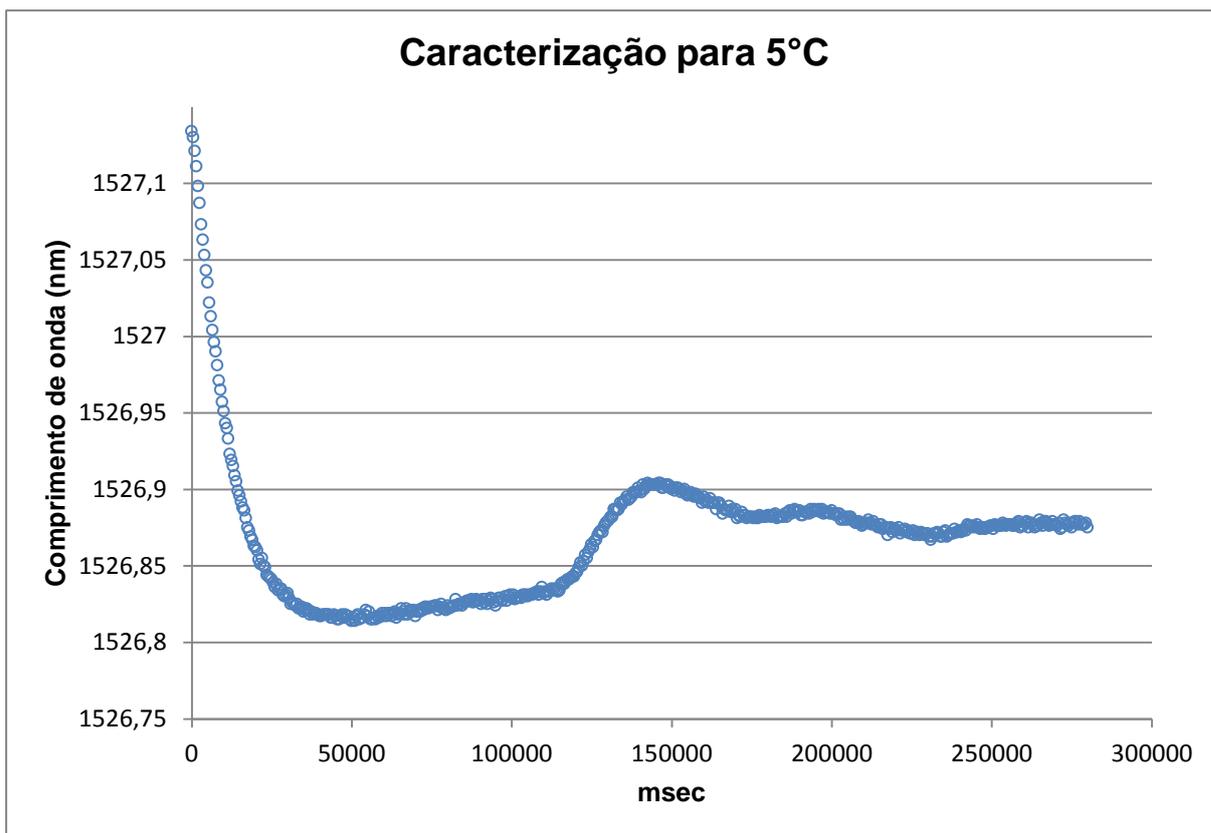


Gráfico 55 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 5°C.
Fonte: Autoria própria.

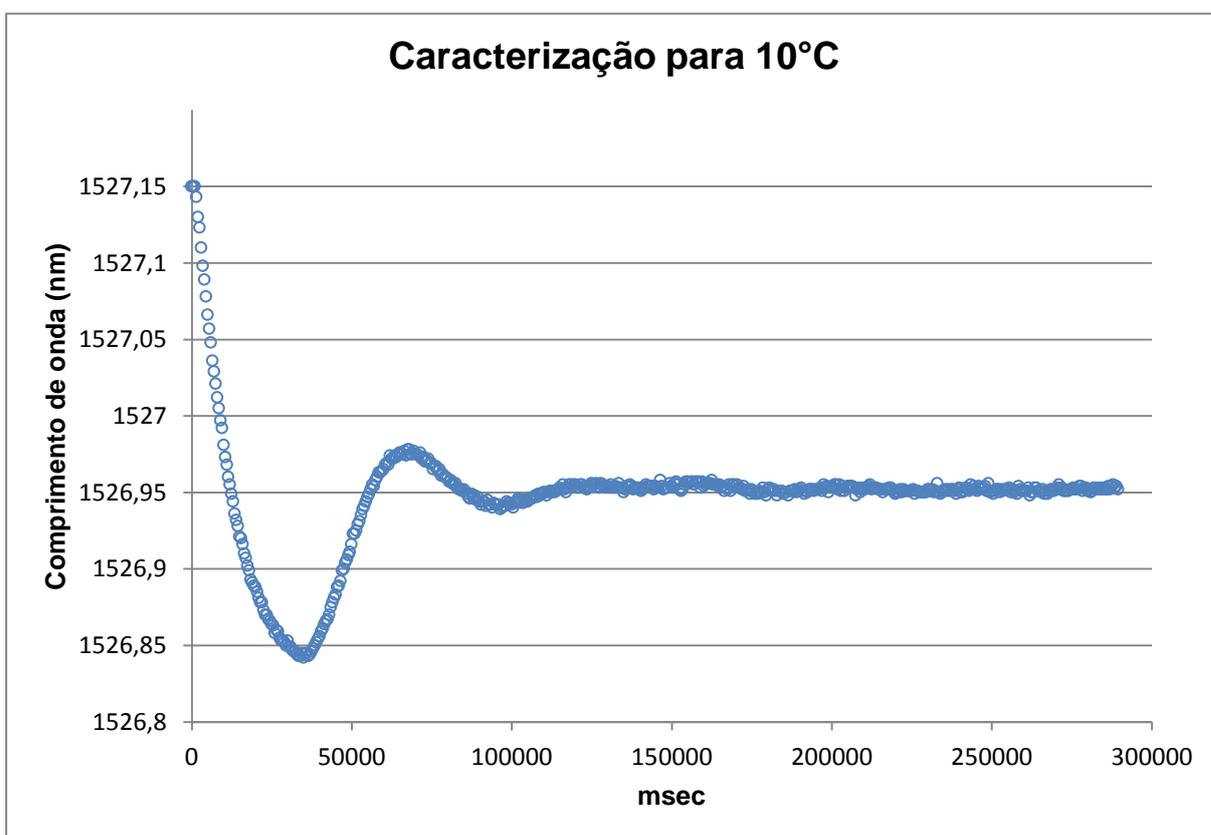


Gráfico 56 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 10°C.
Fonte: Autoria própria.

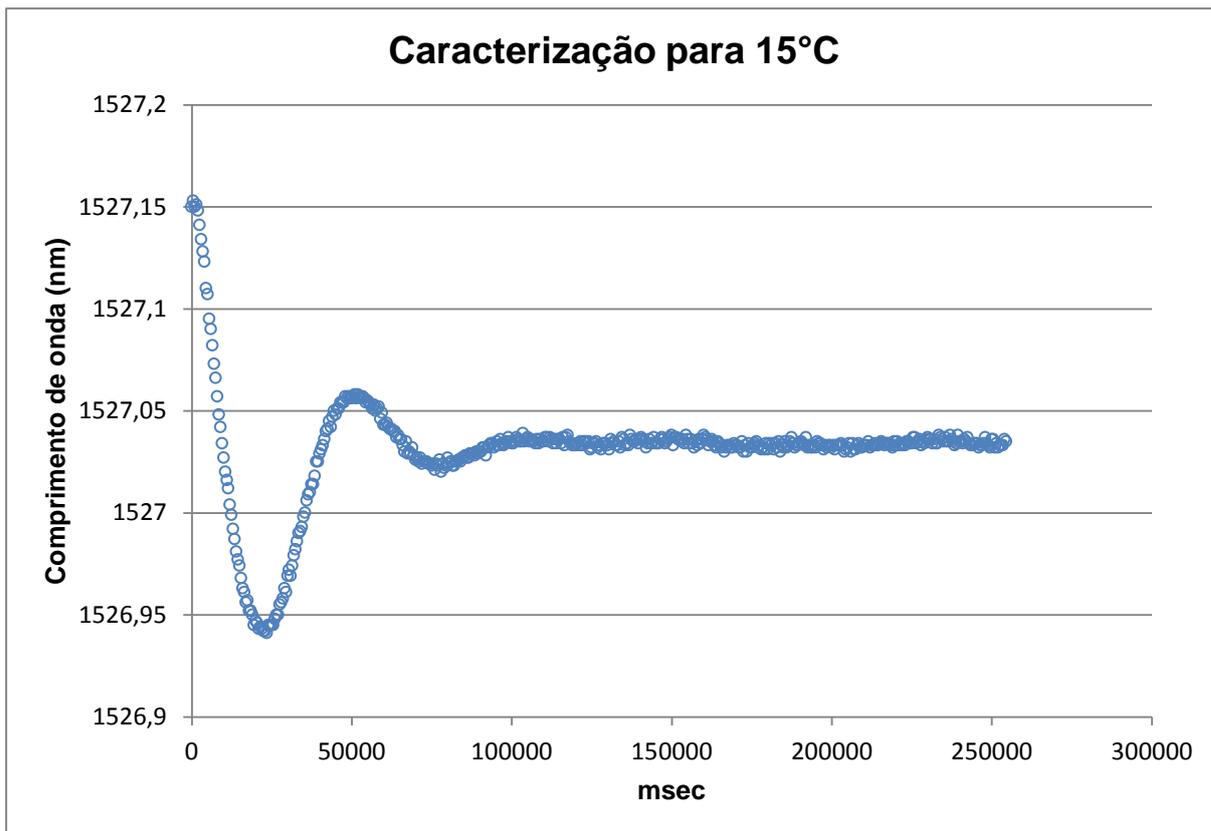


Gráfico 57 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 15°C.
Fonte: Autoria própria.

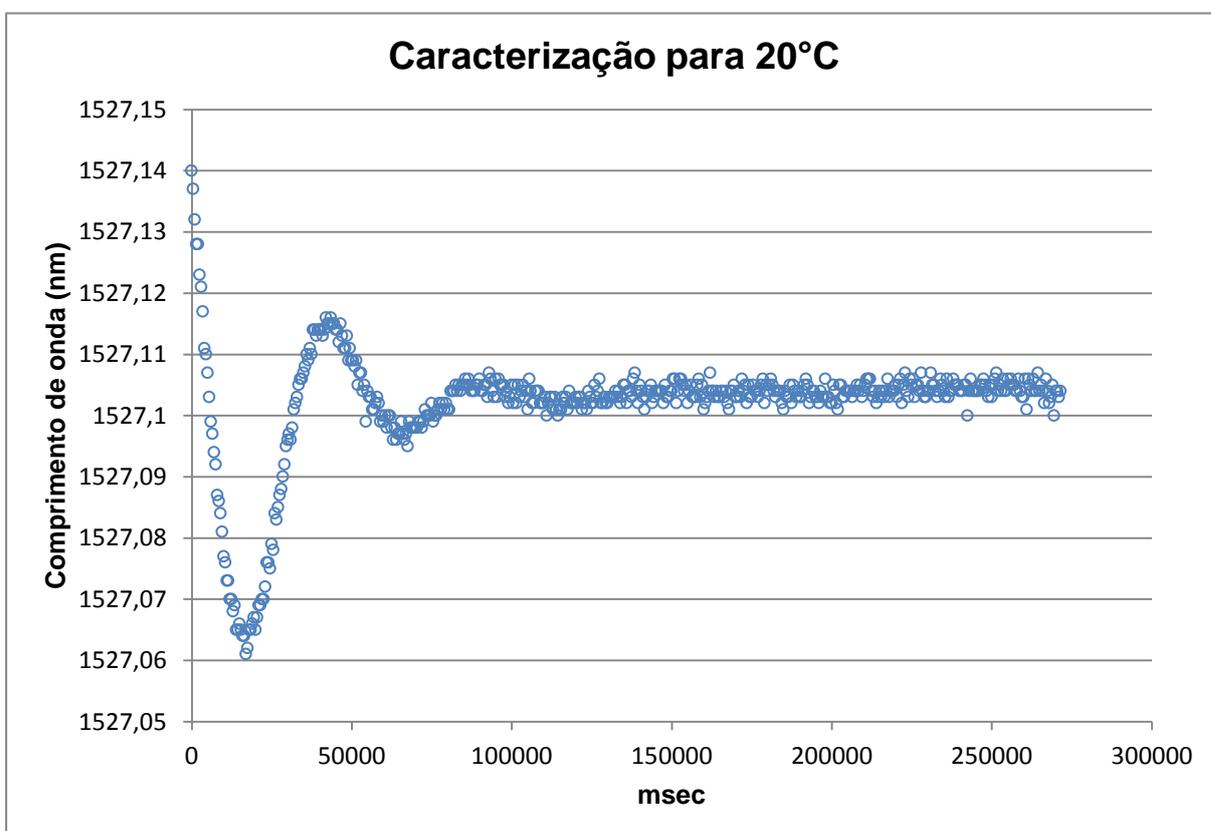


Gráfico 58 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 20°C.
Fonte: Autoria própria.

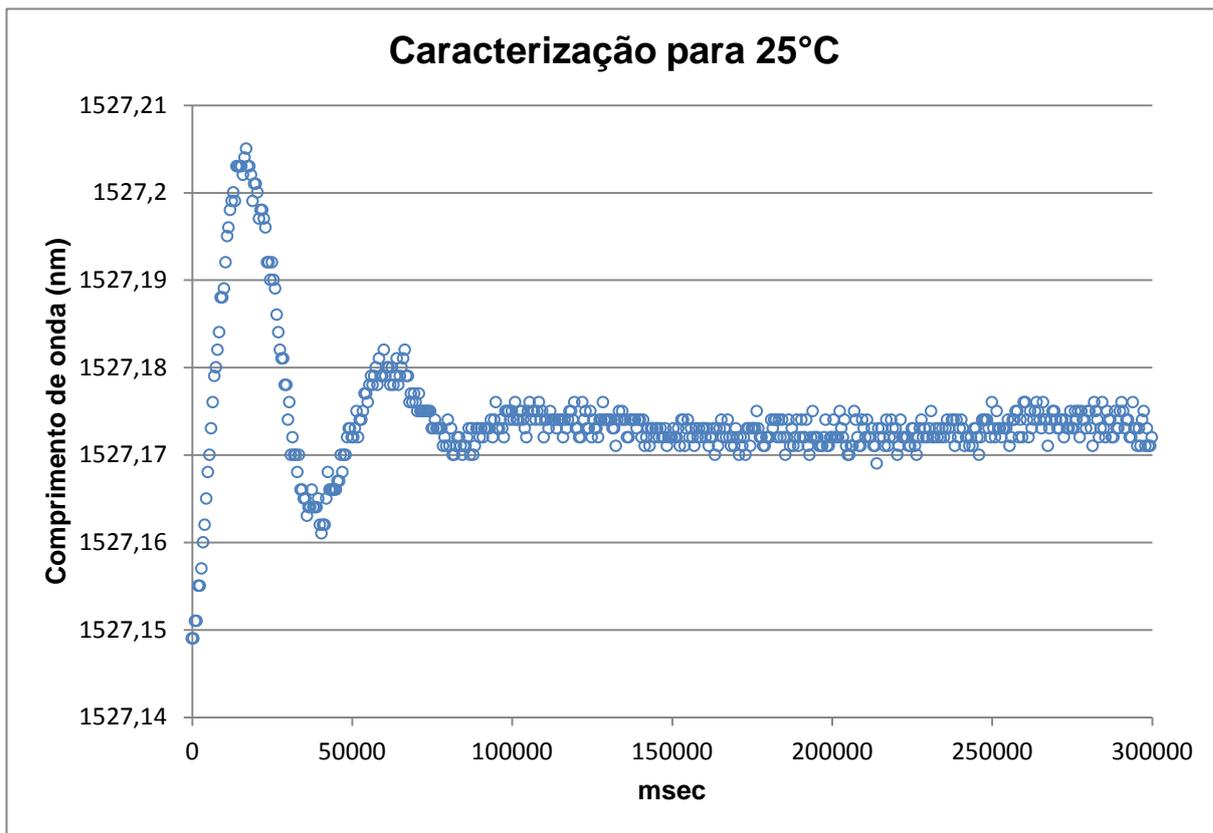


Gráfico 59 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 25°C.
Fonte: Autoria própria.

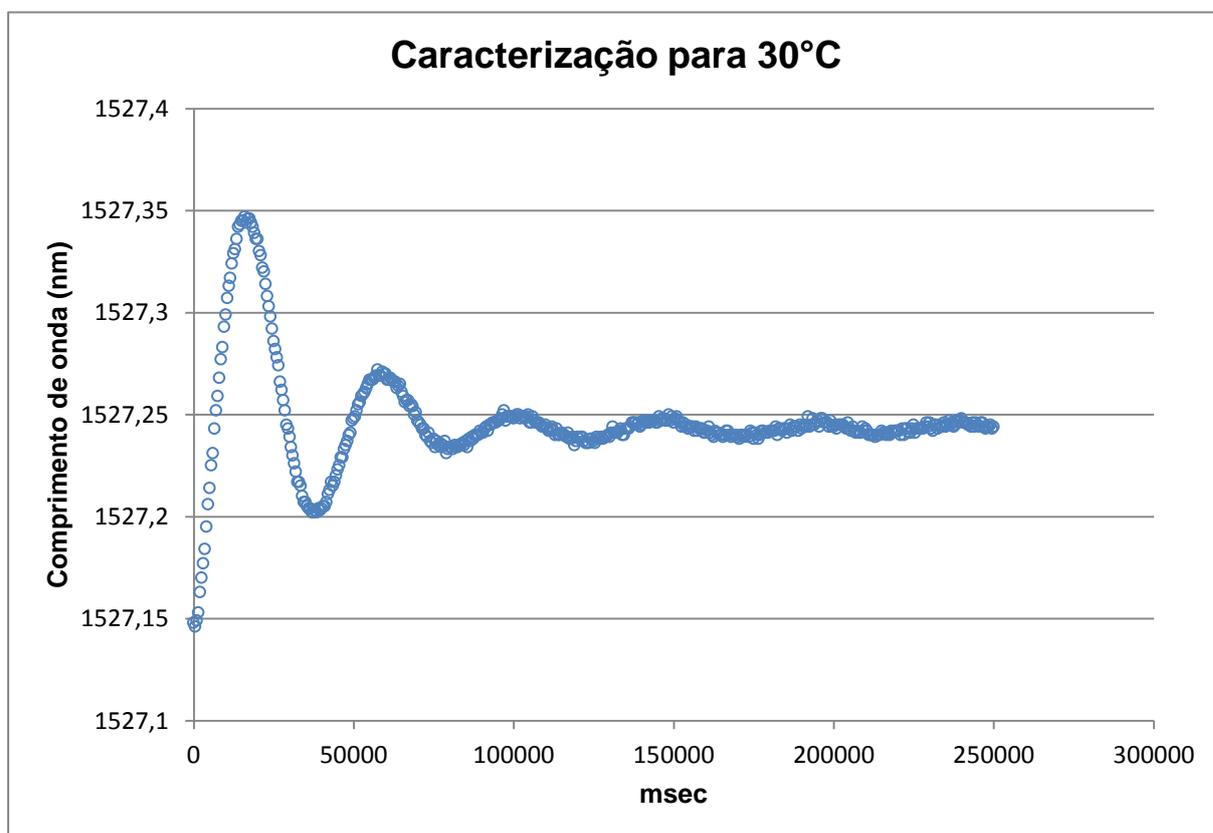


Gráfico 60 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 30°C.
Fonte: Autoria própria.

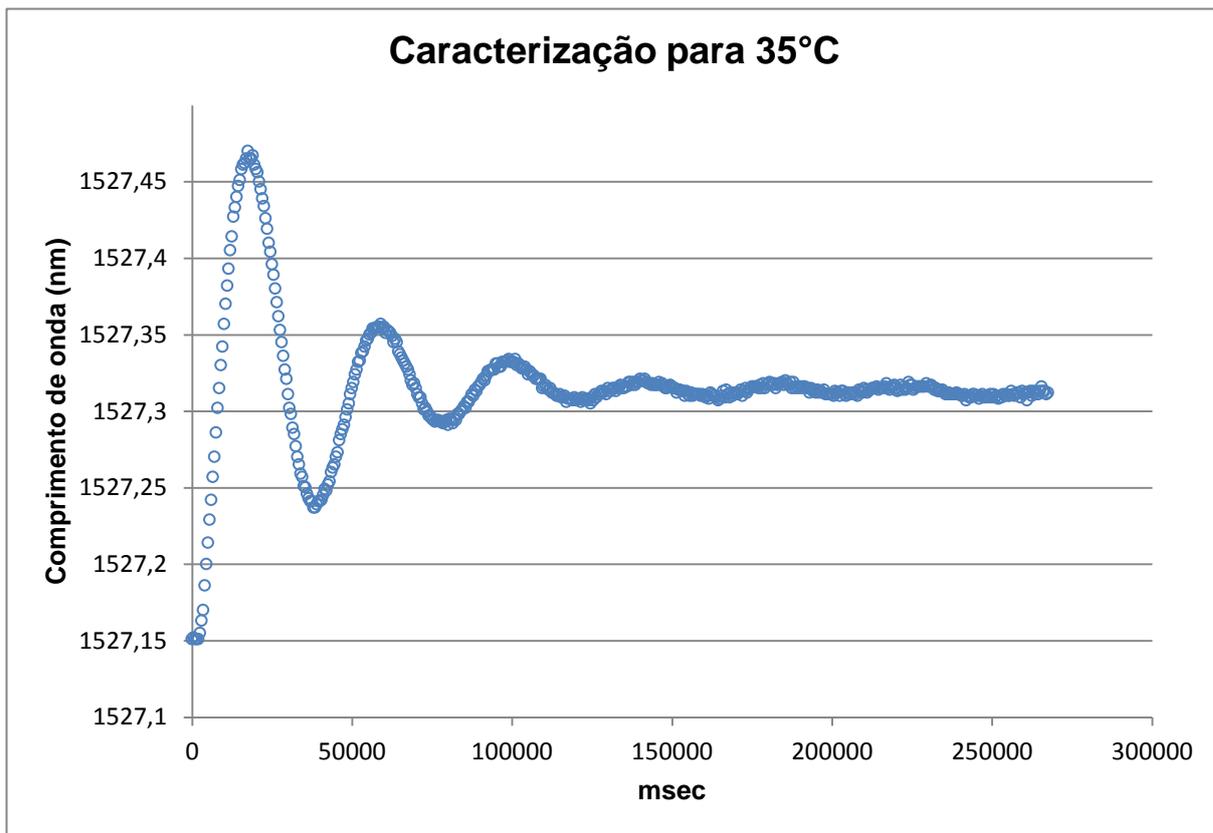


Gráfico 61 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 35°C.
Fonte: Autoria própria.

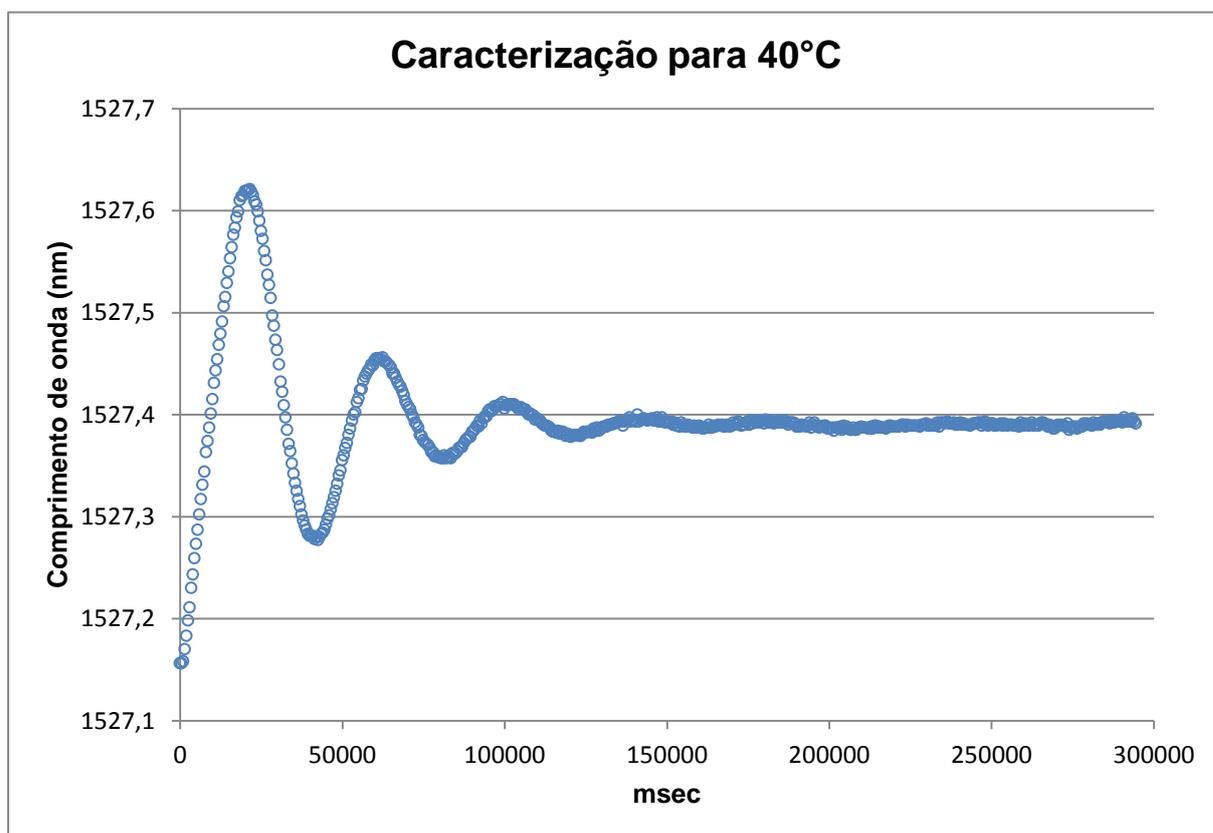


Gráfico 62 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 40°C.
Fonte: Autoria própria.

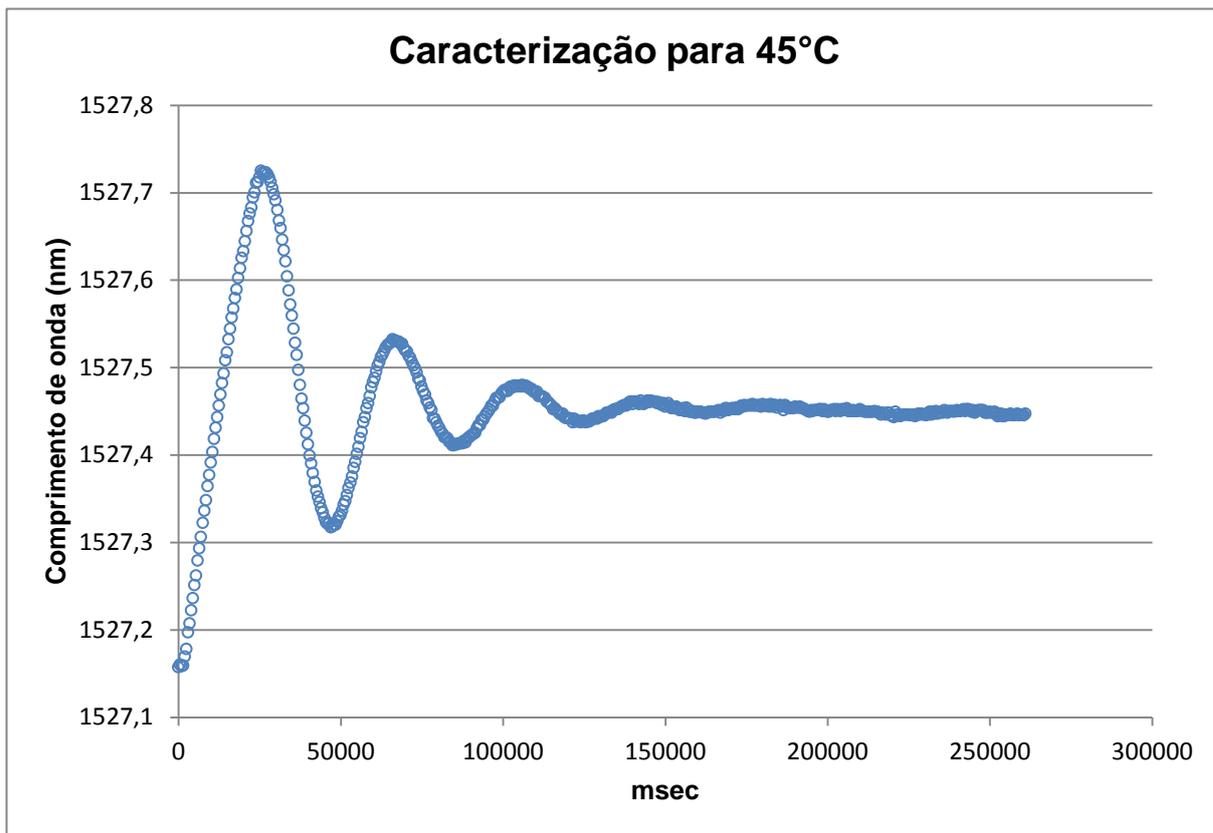


Gráfico 63 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 45°C.
Fonte: Autoria própria.

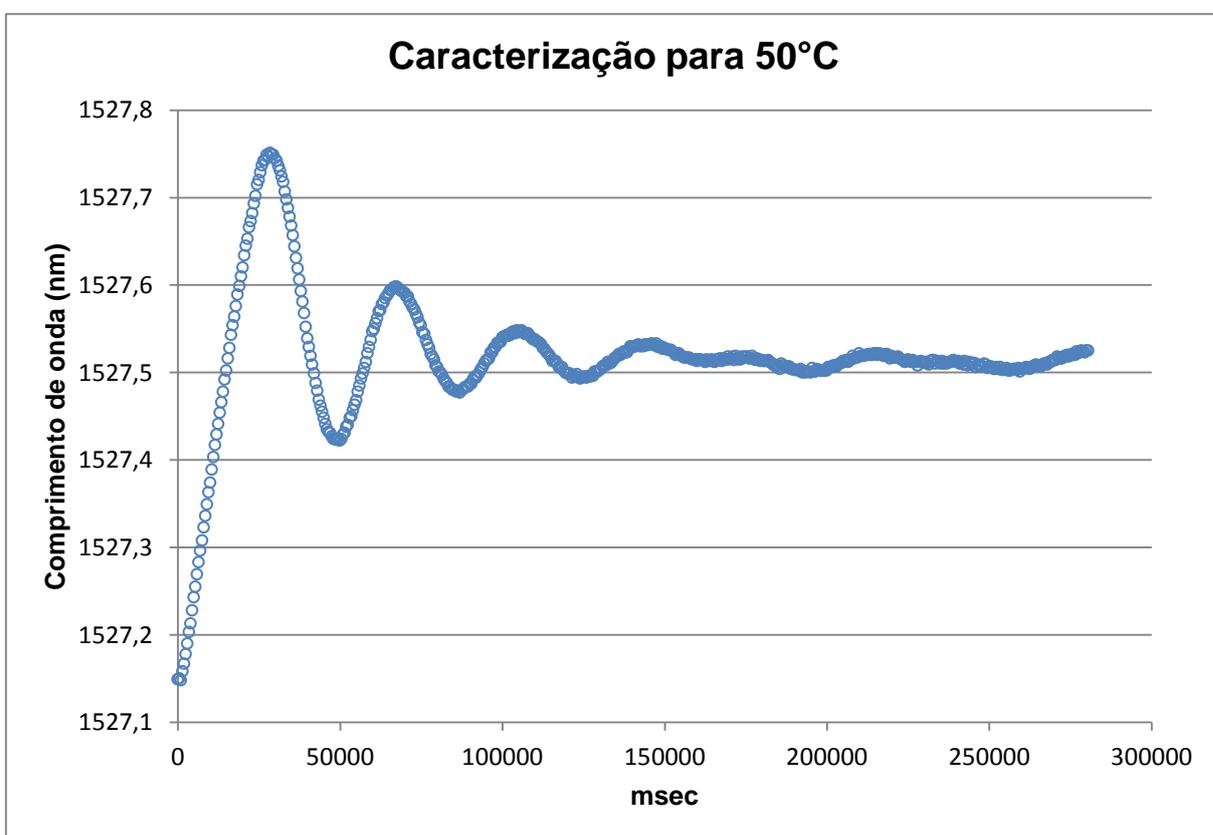


Gráfico 64 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 50°C.
Fonte: Autoria própria.

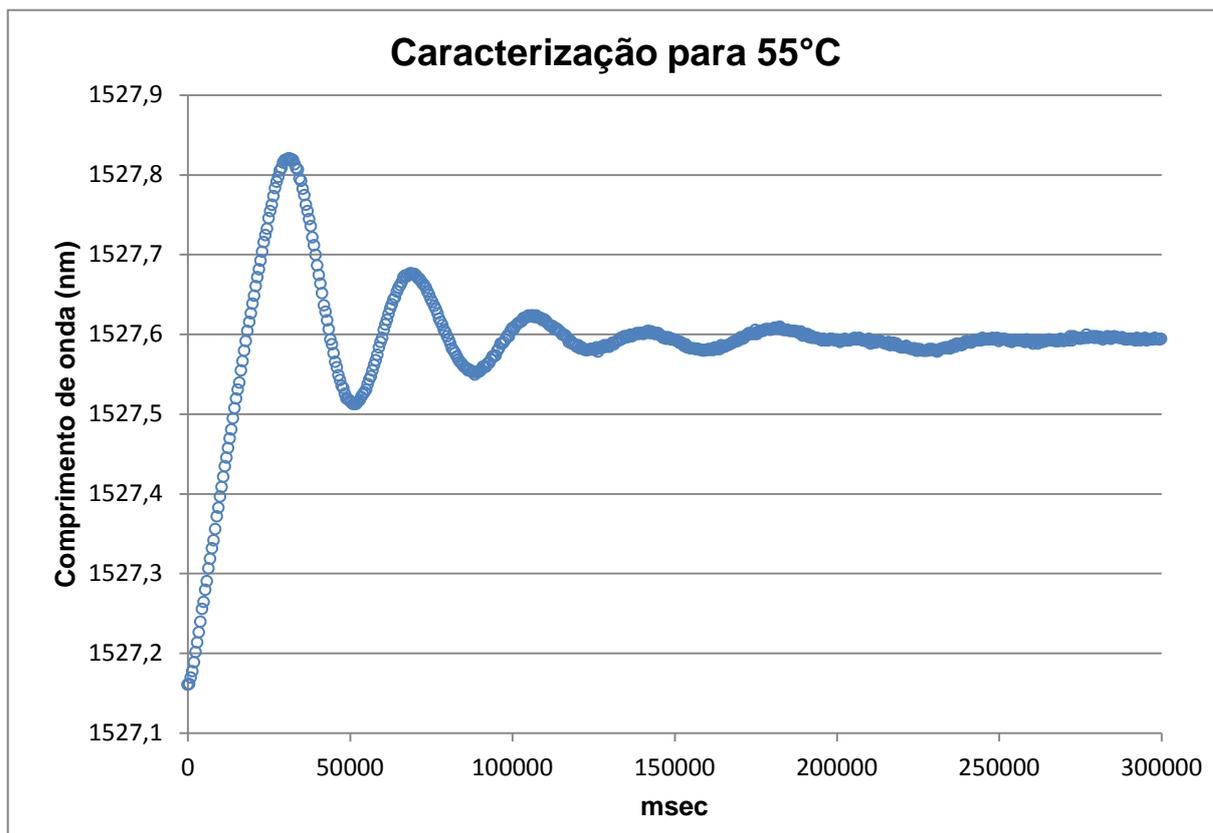


Gráfico 65 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 55°C.
Fonte: Autoria própria.

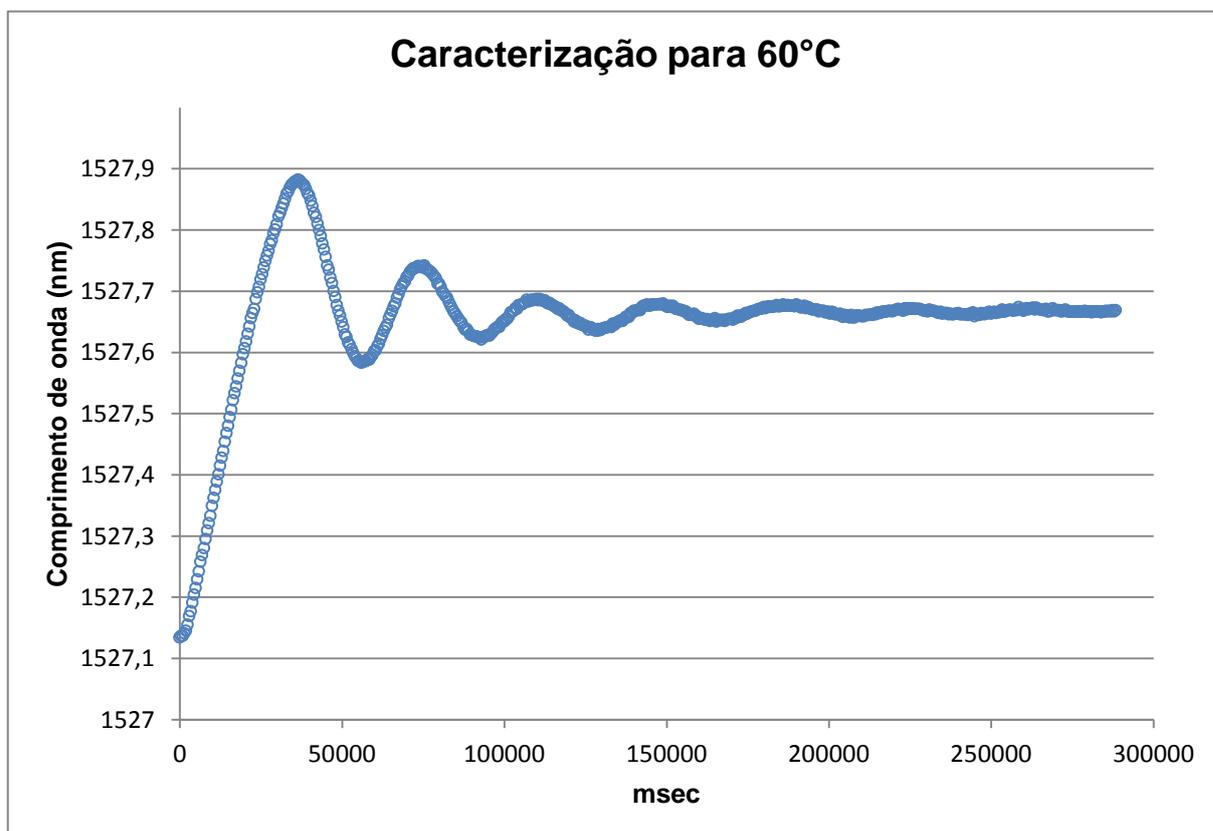


Gráfico 66 - Sensibilidade do sensor com encapsulamento de Silicone para 60°C.
Fonte: Autoria própria.