

# Sobre a real eficiência de processos térmicos para estabilização de redes de Bragg

Francelli Klemba Coradin<sup>1,2</sup>, Marcia Muller<sup>1</sup>, José Luís Fabris<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

<sup>2</sup>Faculdade Estácio de Curitiba, Curitiba, Brasil  
fabris@utfpr.edu.br

**Resumo**— A eficiência de tratamentos térmicos na estabilização de redes de Bragg em fibras óticas foi avaliada para redes gravadas em fibras óticas padrão e fotossensível. As redes após submetidas a tratamentos térmicos até a temperatura máxima de 425 °C apresentam uma aparente estabilização espectral em comprimento de onda e ausência de histerese térmica. No entanto, resultados obtidos transcorridos 5 meses indicam que uma completa estabilização da rede de Bragg não é alcançada após este tratamento térmico: além de deslocamento no comprimento de onda de Bragg à temperatura ambiente, mudanças significativas na sensibilidade térmica acima de 200 °C são observadas.

**Palavras chave**- Redes de Bragg, FBG estabilizadas,

## I. INTRODUÇÃO

As redes de Bragg em fibras óticas - FBG possuem inúmeras aplicações tanto no campo das comunicações óticas quanto em sensoriamento ótico. Particularmente no campo das comunicações as FBGs podem ser usadas em sistemas WDM ou ainda como elementos compensadores de dispersão [1,2]. As aplicações em sensoriamento envolvem medidas de temperatura, deformação, pressão, índice de refração entre outras [3]. No entanto, para garantir o funcionamento eficiente dos dispositivos baseados em FBG é de fundamental importância produzir redes de Bragg que apresentem tanto estabilidade espectral quanto tempos de vida de operação longos. Ao longo dos últimos anos algumas técnicas foram propostas com o objetivo de produzir redes de Bragg estáveis e de prever o seu tempo de vida de operação. Dentre elas destacam-se a co-dopagem da fibra e a realização de tratamentos na fibra antes e após a gravação da FBG [4,5,6,7]. A estabilização espectral está relacionada com a estabilidade dos defeitos responsáveis pela modulação de índice de refração da sílica que acarreta no surgimento da FBG. Estes defeitos são ativados termicamente a sua alteração/destruição ao longo do tempo causa alterações na modulação de índice de refração responsável pela existência da FBG. Redes de Bragg que não são termicamente estáveis irão apresentar uma histerese térmica no comprimento de onda de Bragg ao longo do tempo comprometendo o seu emprego em dispositivos diversos. De forma geral, em aplicações envolvendo temperaturas de operação acima de 200 °C as FBGs que não foram estabilizadas termicamente apresentam tempos de vida de operação reduzidos. Vários estudos mostram que tratamentos térmicos

podem ser realizados para a obtenção de FBGs estáveis [8,9,10,11]. Neste trabalho, foi avaliada a eficiência de tratamentos térmicos na estabilização de redes de Bragg produzidas em fibras óticas padrão de telecomunicações e fotossensível. As redes foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos até uma temperatura máxima de 425 °C objetivando a sua estabilização espectral para emprego em dispositivos com temperaturas de operação inferiores a 425 °C.

## II. METODOLOGIA

As FBGs foram produzidas em fibra fotossensível Nufem (GF-1) e em fibras monomodo padrão (G-652) tanto hidrogenadas para realce da fotossensibilidade quanto sem hidrogenação. Foram usadas fibras monomodo padrão fabricada pela Draktel (SSMF), e fabricada pela Furukawa (SMF). Para a produção das redes foram empregadas as técnicas de exposição direta de uma máscara de fase à luz de um laser de KrF (Xantos, Coherent XS 500) em 248 nm, e um interferômetro com máscara de fase iluminado por um laser de Nd:YAG (New Wave, Tempest-20 Nd:YAG) em 266 nm. A hidrogenação das fibras consistiu em mantê-las por períodos de 10 dias a temperatura ambiente, em atmosfera de hidrogênio a uma pressão típica de 110 kgf/cm<sup>2</sup>. A Tabela I apresenta características e parâmetros das FBGs utilizadas nos experimentos.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DAS FBGS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS

FBG	Fibra	Técnica de gravação	f (Hz)	Tempo de gravação (s)	Fluência Por Pulso (mJ/mm <sup>2</sup> )	$\lambda_B$ (nm)	L (mm)
1	fotossensível	MF <sup>a</sup>	100	500	103,64	1540,41 ± 0,02	3
2	fotossensível	MF <sup>a</sup>	100	500	103,64	1540,70 ± 0,02	3
3	SMF hidrogenada	MF <sup>a</sup>	100	80	103,64	1541,32 ± 0,02	3
4	SMF hidrogenada	MF <sup>a</sup>	100	80	103,64	1541,60 ± 0,02	3
5	SSMF	MF <sup>a</sup>	50	300	103,64	1540,33 ± 0,02	3
6	SSMF hidrogenada	IMF <sup>b</sup>	20	1800	5,45	1556,16 ± 0,05	1,5

a. Máscara de fase; b. Interferométrica com máscara de fase.

Os tratamentos térmicos das redes gravadas foram realizados em um forno de laboratório (Jung, Modelo LT0112, 110V/50V, Monofásico C/J200), com temperatura máxima de operação de 1200 °C, e possibilidade de programação de rampas e patamares de aquecimento por meio de um controlador de temperatura (Nuvus, N1100). As FBGs sem a camada de acrilato foram inseridas no interior de um tubo de quartzo para facilitar o manuseio e garantir a sua integridade física, sendo a temperatura do forno monitorada com o auxílio de um termopar (Minipa, MT520) posicionado próximo às FBGs. Buscando encontrar um conjunto de parâmetros capaz de fornecer redes de Bragg com melhores características de estabilidade, foram realizados tratamentos térmicos com temperatura máxima de 425,0 °C, e tempos diferentes de aquecimento, resfriamento e permanência em cada patamar de temperatura. Para permitir o acompanhamento simultâneo da evolução espectral de várias redes durante o tratamento térmico foram utilizadas três chaves óticas (SW 1: 2 – Direct Drive, JDS Uniphase) como representado na Fig. 1. Um analisador de espectros óticos - OSA (Agilent 8614), com resolução de 0,06 nm e estabilidade em comprimento de onda de  $\pm 2$  pm, foi utilizado para acompanhar os espectros de reflexão das FBGs.

As FBGs 1, 2, 3 e 4 foram submetidas ao mesmo processo de aquecimento, porém as FBGs 1 e 3 foram mantidas no interior do forno após este ter sido desligado resfriando lentamente e as FBGs 2 e 4 foram retiradas do forno imediatamente após a temperatura ter permanecido 30 minutos à  $(425,0 \pm 0,5)$  resfriando rapidamente. O aquecimento consistiu em variar a temperatura em passos de 50 °C desde  $(25,0 \pm 0,5)$  ° até  $(425,0 \pm 0,5)$  °C, mantendo-a por 45 minutos em cada patamar de temperatura. As redes foram submetidas a 3 ciclos consecutivos de aquecimento/resfriamento. Este procedimento foi semelhante ao adotado por Douay e colaboradores [10], porém naquele trabalho apenas dois ciclos de aquecimento e resfriamento foram realizados. Segundo os autores, 30 minutos são suficientes para fixar as principais modificações no índice de refração efetivos responsáveis pelas mudanças permanentes no comprimento de onda de Bragg, tornando a rede estável.

A evolução do comprimento de onda e da refletividade das FBGs foi monitorada como função da temperatura, desde  $(25,0 \pm 0,5)$  °C até  $(425,0 \pm 0,5)$  °C durante o aquecimento nos três ciclos. Três registros foram efetuados em cada patamar de temperatura e o resultado final foi calculado pelas médias dos dados. A dispersão associada com as medidas foi estimada para um nível de confiança de 68,3 % pela incerteza combinada calculada considerando o desvio padrão das médias, e as incertezas associadas com a resolução do OSA e com a flutuação da temperatura.

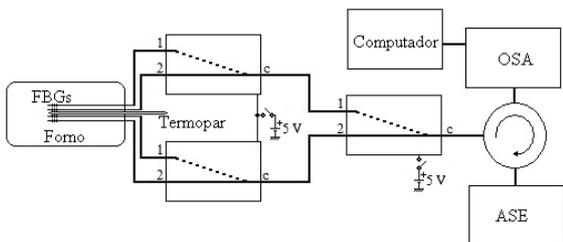


Figura 1. Diagrama esquemático do experimento.

As FBGs 5 e 6 foram submetidas a quatro ciclos de tratamento térmico. No primeiro ciclo, as redes foram colocadas no interior do forno dentro de um tubo de inox, a temperatura foi elevada para  $(180,0 \pm 0,5)$  °C, sendo que as redes permaneceram por duas horas nesta temperatura. Nos três ciclos seguintes a temperatura foi inicialmente elevada até  $(200,0 \pm 0,5)$  °C por 30 minutos e, então, elevada para  $(400,0 \pm 0,5)$  °C sendo que as redes permaneceram neste patamar de temperatura por 2 horas. Após cada ciclo de aquecimento as redes eram retiradas imediatamente do forno caracterizando um resfriamento rápido.

Após os tratamentos térmicos as FBGs 5 e 6 foram submetidas a um novo ciclo de aquecimento até  $(350,0 \pm 0,5)$  °C sendo os espectros medidos a cada 50 °C. Cinco meses depois este ciclo foi repetido. Cada medida foi realizada três vezes e o resultado final foi calculado pelas médias dos dados. A dispersão associada com as medidas foi estimada da mesma maneira descrita anteriormente.

### III. RESULTADOS

A evolução do comprimento de onda nos três ciclos de tratamento térmico para as FBGs 1 e 2 é apresentada na Fig. 2.

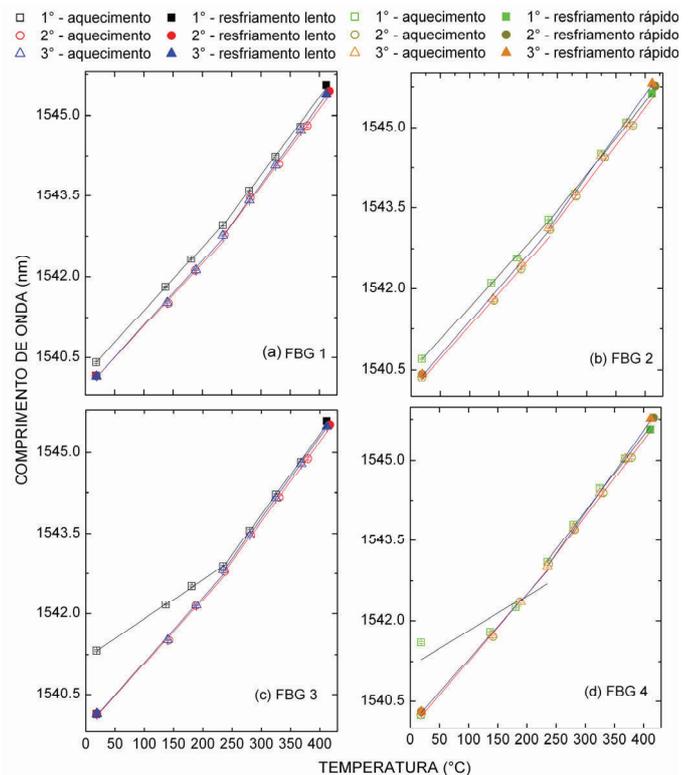


Figura 2. (a) FBG 1, (b) FBG2, (c) FBG3 e (d) FBG4 durante o tratamento térmico em três ciclos de aquecimento e resfriamento entre  $(25,0 \pm 0,5)$  °C e  $(425,0 \pm 0,5)$  °C.

Após cada ciclo os espectros das redes, FBG 1 (resfriamento lento) e FBG2 (resfriamento rápido), foram medidos à temperatura ambiente. Aos dados experimentais obtidos durante o aquecimento em cada ciclo foram ajustadas 2

retas, que caracterizam a evolução térmica do comprimento de onda entre a temperatura ambiente e aproximadamente  $(225,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  (faixa I), e entre  $(225,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  e  $(425,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  (faixa II). Na última medida realizada depois do terceiro ciclo, as FBGs 1 e 2 apresentaram aparente estabilidade no comprimento de onda de Bragg independentemente do processo de resfriamento empregado entre os ciclos. A evolução do comprimento de onda das FBGs 3 e 4 para os três ciclos e apresentada na Fig. 2 (c) e (d).

A Tabela II apresenta a evolução térmica das FBGs nas duas faixas para cada ciclo de aquecimento e o deslocamento do comprimento de onda de Bragg à temperatura ambiente após cada ciclo. A refletividade das FBGs 1 e 2 permaneceu aproximadamente constante nos três ciclos de tratamento térmico.

TABELA II. EVOLUÇÃO TÉRMICA DAS FBGS EM CADA CICLO DE AQUECIMENTO E DESLOCAMENTO DO COMPRIMENTO DE ONDA DE BRAGG A TEMPERATURA AMBIENTE APÓS CADA CICLO.

FBG	Ciclo de aquecimento	I (pm/°C)	II (pm/°C)	$\Delta\lambda$ (nm)
1	1°	$11,78 \pm 0,10$	$14,49 \pm 0,15$	$-0,24 \pm 0,02$
	2°	$11,62 \pm 0,10$	$14,39 \pm 0,21$	$-0,01 \pm 0,01$
	3°	$12,13 \pm 0,10$	$13,98 \pm 0,21$	$-0,01 \pm 0,01$
2	1°	$11,85 \pm 0,09$	$13,51 \pm 0,12$	$-0,35 \pm 0,02$
	2°	$12,13 \pm 0,10$	$13,98 \pm 0,21$	$-0,07 \pm 0,01$
	3°			$0,00 \pm 0,01$
3	1°			$-1,18 \pm 0,02$
	2°	$11,91 \pm 0,10$	$14,94 \pm 0,20$	$0,01 \pm 0,02$
	3°			$-0,01 \pm 0,01$
4	1°			$-1,35 \pm 0,02$
	2°	$12,61 \pm 0,10$	$14,24 \pm 0,21$	$0,02 \pm 0,02$
	3°			$0,00 \pm 0,01$

Para as FBGs 3 e 4, no primeiro aquecimento as faixas I e II apresentam taxas de evolução térmica sensivelmente diferentes e depois do primeiro ciclo, ocorreu uma grande variação de comprimento de onda e na refletividade (queda de aproximadamente 7%) à temperatura ambiente. Na última medida realizada após o terceiro ciclo, as FBGs apresentaram aparente estabilidade no comprimento de onda de Bragg, pois a variação medida no comprimento de onda está dentro da faixa de erros prevista para o experimento. A refletividade permaneceu aproximadamente constante nos dois últimos ciclos. O comportamento observado durante o primeiro ciclo tanto no comprimento de onda de Bragg quanto na refletividade das FBGs gravadas em fibras hidrogenadas (FBG3 e FBG4) pode ser explicado pela difusão do hidrogênio molecular para fora da fibra causada pelo aquecimento. Durante a gravação das FBGs em fibra ótica hidrogenada ocorre o crescimento da rede e o deslocamento do comprimento de onda para maiores valores devido ao aumento da modulação gerada no índice de refração. No núcleo exposto ao UV a molécula de hidrogênio se dissocia para formar

defeitos o que aumenta o índice de refração da região exposta e também aumenta o índice efetivo. As diferenças na concentração de hidrogênio entre as regiões exposta e não exposta do núcleo e entre casca e região exposta do núcleo causam a migração de hidrogênio para a região exposta do núcleo, aumentando ainda mais o índice da região exposta e, portanto a modulação. Após a gravação o comprimento de onda pode diminuir devido à migração do hidrogênio molecular residual para fora da fibra diminuindo o índice de refração efetivo (deslocamento para menores comprimentos de onda) e diminuindo a modulação no índice de refração (diminuição da refletividade). O tratamento térmico acelera o processo de difusão do hidrogênio molecular para fora da fibra, diminuindo o índice de refração efetivo da fibra e também a modulação de índice [9].

Os gráficos da Fig. 3 (a) e (b) mostram a evolução térmica do comprimento de onda das FBGs 5 e 6 durante os tratamentos térmicos.

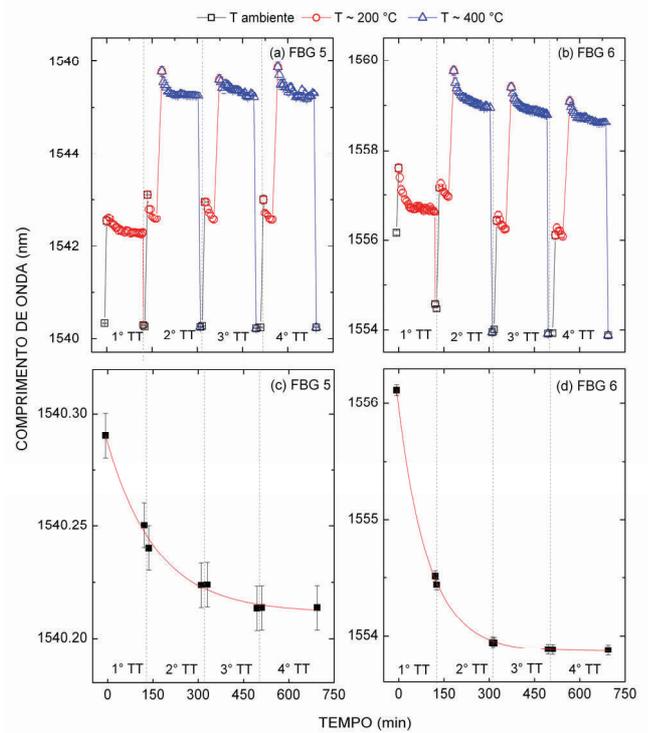


Figura 3. Evolução térmica do comprimento de onda durante os ciclos de tratamento térmico da FBG 5 (a) e da FBG 6 (b). Evolução do comprimento de onda à  $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  da (a) FBG 5 e (b) da FBG6 após cada ciclo.

Devido à inércia térmica do forno, uma vez que as resistências de aquecimento do forno promovem variações do fluxo de calor interno, a temperatura em cada patamar nos 10 minutos iniciais alcança valores mais altos do que os programados. Porém, depois de transcorrido este intervalo de tempo a temperatura estabilizou nos valores previamente programados  $(180,0 \pm 0,5; 200,0 \pm 0,5$  e  $400,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ . A FBG6 apresentou um maior deslocamento do comprimento de onda à temperatura ambiente e uma maior queda de refletividade após o primeiro ciclo do tratamento (aquecimento a  $200^\circ\text{C}$  seguido de resfriamento rápido). Este comportamento pode ser explicado pela difusão do hidrogênio molecular

residual para fora da fibra que diminui o índice de refração efetivo (deslocamento para menores comprimentos de onda) e a modulação de índice (queda da refletividade).

Os gráficos da Fig. 3 (c) e (d) apresentam os valores de comprimento de onda de Bragg das FBG5 e 6 a  $20,0 \pm 0,5$  °C após cada ciclo de tratamento térmico juntamente com os ajustes exponenciais empíricos aos dados experimentais. As linhas verticais pontilhadas representam a separação entre cada um dos tratamentos térmicos realizados.

Para as duas FBGs, observa-se uma tendência à estabilização do comprimento de onda à temperatura ambiente após os tratamentos térmicos. Nesta temperatura, a FBG5 apresentou pequenos deslocamentos no comprimento de onda de Bragg com os ciclos de aquecimento e resfriamento. No entanto, o comprimento de onda de Bragg da FBG6 sofreu um maior deslocamento no primeiro e segundo ciclos, associado a presença de hidrogênio na fibra, e tendendo à estabilização somente após o terceiro e quarto ciclos. Porém, nas temperaturas mais altas (a 200 °C e a 400 °C) a FBG6 sofreu deslocamento significativo em todas as etapas do tratamento térmico, indicando que estes não foram eficientes para a estabilização da rede.

Após o tratamento térmico foram realizados dois ciclos térmicos com intervalo de cinco meses. AS redes foram aquecidas até a temperatura máxima de  $(350,0 \pm 0,5)$  °C e em seguida resfriadas, sendo os espectros medidos a cada 50 °C, Fig. 4 (a) e (b). A resposta térmica das FBGs apresenta um comportamento não linear [12].

As sensibilidades foram calculadas para duas faixas de temperatura por meio de ajustes lineares aos dados experimentais representados por retas na Figura 5. As sensibilidades foram obtidas na faixa de temperaturas entre ambiente e aproximadamente 200,0 °C (faixa I) e de 200,0 °C até aproximadamente 350,0 °C (faixa II).

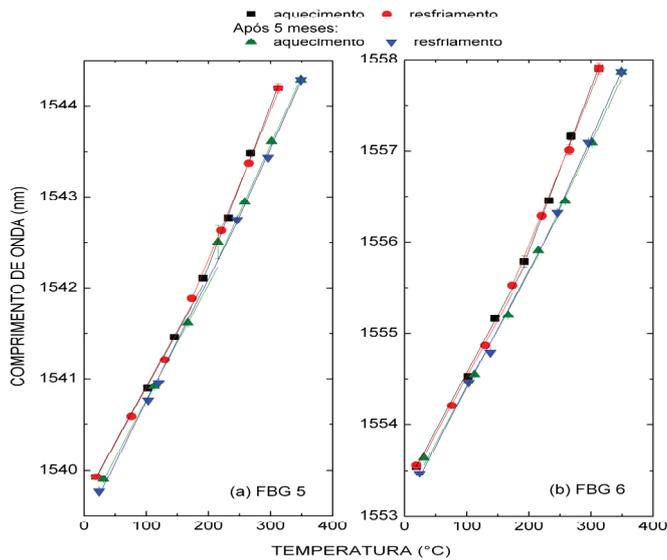


Figura 4. Evolução do comprimento de onda das FBGs 5 e 6 durante os ciclos de aquecimento e resfriamento realizados logo após o tratamento térmico e 5 meses depois.

Os dados da evolução térmica do comprimento de onda estão apresentados na Tabela 3, para os dois ciclos de aquecimento.

TABELA III. EVOLUÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA COM A TEMPERATURA.

Ciclos	FBG 5 (pm/°C)		FBG 6 (pm/°C)	
	faixa I	faixa II	faixa I	faixa II
1º aquecimento	12,2 ± 0,1	17,6 ± 0,5	12,6 ± 0,2	17,9 ± 0,6
1º resfriamento	12,2 ± 0,1	16,3 ± 0,3	12,5 ± 0,1	16,7 ± 0,4
2º aquecimento	12,7 ± 0,1	14,9 ± 0,2	12,5 ± 0,1	14,3 ± 0,1
2º resfriamento	13,5 ± 0,1	14,9 ± 0,2	12,8 ± 0,1	14,9 ± 0,2

A comparação entre os dois ciclos de aquecimento e resfriamento indica que as redes não estavam estáveis, após a realização do tratamento térmico. Para cada ciclo de aquecimento e resfriamento até  $(350,0 \pm 0,5)$  °C não foi observada histerese significativa no comprimento de onda de Bragg das FBGs. No entanto, a repetição do mesmo ciclo 5 meses depois, mostra um deslocamento do comprimento de onda para menores valores. Além disso, apesar da sensibilidade térmica da rede não ter sofrido variação significativa para temperaturas entre ambiente e aproximadamente 200 °C, para temperaturas entre aproximadamente 200,0 e 350,0 °C a sensibilidade térmica sofre uma sensível alteração. Aparentemente os defeitos associados com a presença de hidrogênio na fibra apresentaram maior instabilidade, uma vez que foi observada uma maior variação de sensibilidade na FBG6 (fibra hidrogenada) após 5 meses.

#### IV. CONCLUSÕES

A realização de tratamento térmico em ciclos de aquecimento e resfriamento tanto com patamares de aquecimento de curta quanto de longa duração, promove uma aparente estabilização térmica do comprimento de onda de Bragg da rede a temperatura ambiente independentemente do tipo de fibra e do processo de gravação empregado e do fato da fibra ter sido previamente hidrogenada ou não. Além disso, esta aparente estabilização independe do processo de resfriamento, lento ou rápido, utilizado entre os aquecimentos. Todas as redes tratadas apresentaram uma aparente estabilização em comprimento de onda após 3 ciclos de tratamento térmico. Após o tratamento térmico, os testes indicam ausência de histerese térmica para as redes, o que pode ser interpretado como resultado da estabilização completa. No entanto, os resultados obtidos com patamares de longa duração, indicam que uma completa estabilização não é alcançada após o tratamento, sendo este efeito mais notado na fibra SSMF hidrogenada. Os resultados obtidos após transcorridos 5 meses mostram que as redes não estavam completamente estabilizadas, mesmo operando em temperatura inferior a temperatura máxima do tratamento térmico, sofrendo além de deslocamento no comprimento de onda de Bragg à temperatura ambiente, mudanças significativas na sensibilidade térmica acima de 200 °C. Estas alterações são mais notadas na fibra hidrogenada o que indica que o fenômeno pode estar associado

com a presença de defeitos cuja geração é favorecida pela presença de hidrogênio na fibra.

#### REFERENCES

- [1] Y. Dai, X. Chen, J. Sun, Y. Yao, S. Xie, "Dispersion compensation based on sampled fiber Bragg gratings fabricated with reconstruction equivalent-chirp method," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, n. 8, pp. 941-943, 2006.
- [2] T. Erdogan, V. Mizrahi, P. J. Lemaire, D. Monroe, "Decay of ultraviolet induced fiber Bragg gratings," *J. Appl. Phys.*, Vol. 76, pp. 73-80, 1994.
- [3] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askin, M. A. Putnam, E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1478-1463, 1997.
- [4] H. Patrick, S. L. Gilbert, A. Lidgard, M. D. Gallagher, "Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber," *Journal Applied Physics*, vol. 78, pp. 2940-2945, 1995.
- [5] G. Brambilla, L. Reekie, C. Contardi, D. Milanese, M. Ferraris, "Bragg gratings in ternary  $\text{SiO}_2$ :  $\text{SnO}_2$ :  $\text{Na}_2\text{O}$  optical glass fibers," *Optics Letters*, vol.25, no. 16, pp. 1153-1155, 2000.
- [6] E. M. Dianov, K. M. Golant, R. R. Khrapko, A. S. Kurkov, B. Leconte, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, "Grating formation in a germanium free silicon oxinitride fibre", *Electronics Letters*, vol. 33, no. 3, pp. 236-238, 1997.
- [7] Q. Wang, A. Hidayat, P. Niay, M. Douay, "Influence of Blanket Postexposure on the Thermal Stability of the Spectral Characteristics of Gratings Written in a Telecommunication Fiber Using Light at 193 nm", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 8, pp. 1078-1083, 2000.
- [8] S. Kannan, J. Z. Y. Guo, P. J. Lemaire, "Thermal Stability Analysis of UV Induced Fiber Bragg Gratings," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp.1478-1483, 1997.
- [9] Y. Masuda, M. Nakamura, C. Komatsu, K. Fujita, M. Yamauchi, M. Kimura, Y. Misutani, S. Kimura, Y. Susaki, T. Yokouchi, K. Nakagawa, S. Ejima, "Wavelength evolution of fiber Bragg gratings fabricated from hydrogen-loaded optical fiber during annealing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no 3, pp. 934-942, 2004
- [10] M. Douay, E. Fertein, W.X. Xie, P. Bernage, P. Niay, J. F. Bayon, T. Georges, "Thermal hysteresis of Bragg wavelengths of intra-core fiber gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 11, pp. 1331-1335, 1993.
- [11] S. Bandyopadhyay, J. Canning, M. Stevenson, K. Cook, "Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm," *Optics Letters*, vol. 33, pp. 1917-1919, 2008.
- [12] S. Pal, T. Sun, K. T. V. Grattan, S. A. Wade, S. F. Collins, G. Baxter, B. Dussardier, G. Monnom, "Non-linear temperature dependence of Bragg gratings written in different fibres, optimized for sensor applications over a wide range of temperatures," *Sensors and Actuators A*, vol. 112, pp. 211-219, 2004.