

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE LENTES EM VIDRO DE SÍLICA PERANTE A UTILIZAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR CONCENTRADA

De Almeida G.*, Guerra Rosa L.*, Pereira J.C.G.**, Bravo Gonzalo I.***, Franco P.*, Fernandes J.C.*,
González-Aguilar J.***

* IDMEC, DEM, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, luisguerra@tecnico.ulisboa.pt

** Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

*** IMDEA Energía, Avda. Ramón de la Sagra, 3, 28935 Móstoles, Madrid, Espanha

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2022>

RESUMO

Este trabalho descreve os ensaios realizados com um simulador laboratorial de radiação solar concentrada com o objectivo de avaliar o comportamento de lentes em vidro de sílica quando sujeitas a elevados fluxos de radiação, e permitiu comparar o seu comportamento com o que foi demonstrado por lentes idênticas, mas fabricadas em vidro de borossilicato (BK-7) cujo preço é muito inferior. Os ensaios de irradiação das lentes atingiram durações de 60 minutos, durante os quais se procedeu à monitorização contínua da potência da radiação aplicada sobre cada lente e da temperatura nela gerada. Todas as lentes em vidro de sílica se comportaram bem, mas o mesmo não ocorreu com as lentes em vidro de borossilicato. No trabalho é aventada a hipótese de o comportamento negativo registado nas lentes em borossilicato ser provocado pelo facto de se ter usado a radiação emitida por uma lâmpada de arco de xénon que pode conter comprimentos de onda que estão ausentes na radiação solar, pelo que é proposto que nos futuros testes não se use um simulador de radiação solar.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação Solar Concentrada, Lentes Ópticas, Vidro de Borossilicato, Vidro de Sílica

ABSTRACT

This work describes the tests conducted with a laboratory-scale high-flux solar simulator aiming to evaluate the performance of optical lenses made of silica glass when subjected to high-fluxes of radiation, and it allowed to compare their behaviour with the behaviour shown by lenses made of borosilicate glass (BK-7) which price is much lower. The irradiation tests reached durations up to 60 minutes, with continuous monitoring of the power irradiating each and of the temperature generated on it. All silica lenses have shown a good performance, contrarily to what was observed with the lenses made of borosilicate. In the work it is mentioned the possibility that the negative behaviour observed with the borosilicate lenses may be due to the fact that the radiation spectrum of a xenon arc lamp contains certain wavelengths that are not present in the solar radiation spectrum, and therefore it is suggested that future tests are conducted with real concentrated solar radiation and not with a simulator that artificially reproduces the solar energy distribution.

KEYWORDS: Concentrated Solar Radiation, Optical Lenses, Borosilicate Glass, Silica Glass

INTRODUÇÃO

As lentes ópticas são elementos essenciais para a reconfiguração dos feixes de radiação solar. A sua utilização é necessária para o desenvolvimento de novos sistemas de condução, através de cabos de fibra-óptica, de radiação solar concentrada (Li et al., 2018; Rosa, 2019; Song et al., 2019). Nos cabos de fibra óptica (como aquele que se mostra na Fig. 1), está prevista a utilização de lentes quer à entrada quer à saída do cabo.

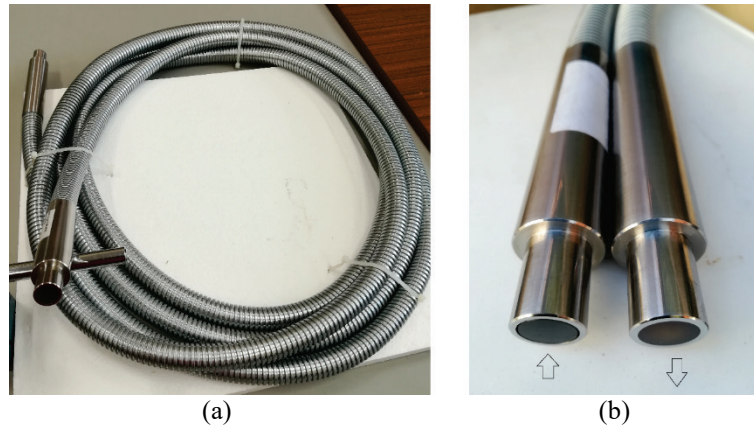


Fig. 1. Cabo de fibra óptica com 7 metros de comprimento, especialmente fabricado para conduzir radiação solar concentrada até 1000 W: (a) aspecto geral; (b) terminais de entrada e de saída.

Para se poderem usar com eficiência cabos de fibra óptica para conduzir radiação solar concentrada, é essencial ter à entrada do cabo um feixe incidente de baixo-ângulo que satisfaça o “ângulo de aceitação” do cabo (Rosa, 2019). Assim, em muitos dos sistemas concentradores de radiação ter-se-á de usar um sistema divergente junto à entrada do cabo – como aquele que é proposto na Fig.2 – de modo a fazer divergir o feixe de radiação gerado pelo concentrador, fazendo com que esse feixe passe a ter baixo-ângulo de incidência (normalmente inferior a 14°, ou seja, próximo da normal ao plano da entrada do cabo). Na Fig. 2 todas as dimensões estão expressas em milímetros. A figura não está rigorosamente à escala. Uma vez que se trata de um projecto de um sistema nunca antes construído, as dimensões aproximadas ou não indicadas dependem de dados ainda não disponíveis ou de aperfeiçoamentos a realizar durante o processo de manufactura do sistema.

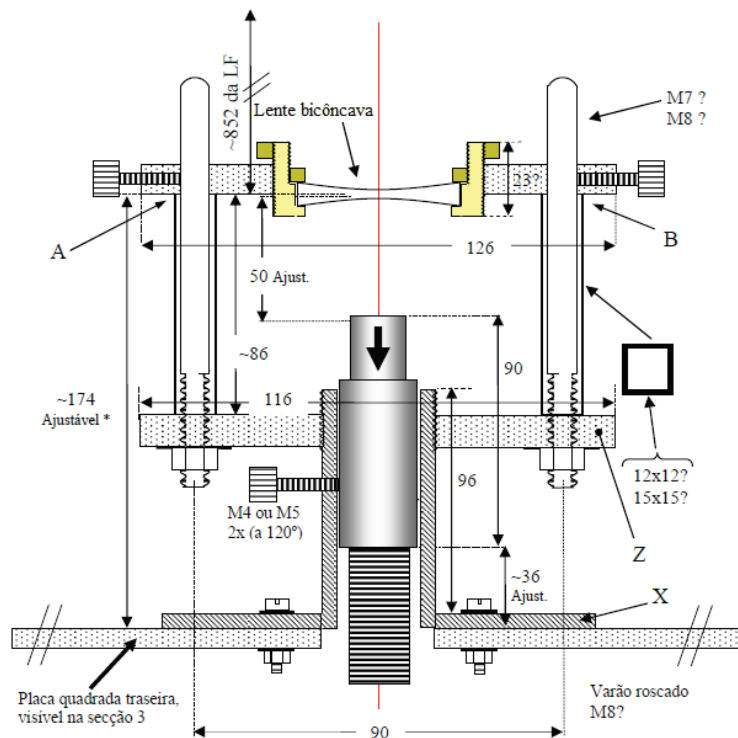


Fig. 2. Projecto de um sistema divergente para ser usado à entrada do cabo de fibra óptica (De Almeida 2019).

Dependendo do tipo de aplicação, pode haver necessidade de, à saída do cabo, se provocar uma convergência da radiação de modo a concentrar o fluxo numa área mais pequena. Para tal, há que recorrer a sistema convergentes/concentradores, como aquele que é proposto na Fig. 3.

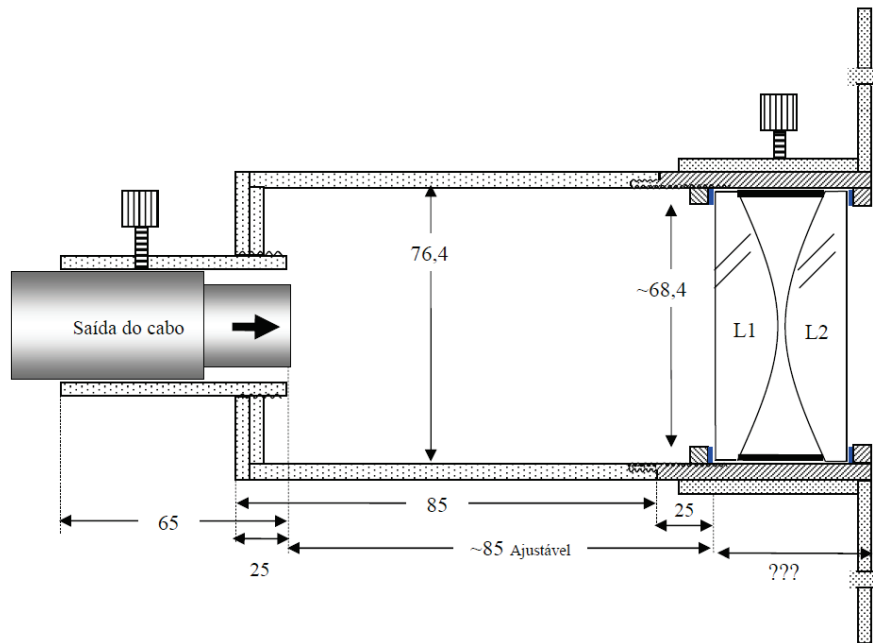


Fig. 3. Projecto de um sistema concentrador, constituído por duas lentes convergentes plano-convexas (L1 e L2), para ser usado à saída do cabo de fibra óptica (De Almeida, 2019).

Se bem que as lentes existentes no mercado sejam de excelente qualidade óptica, não encontramos na literatura trabalhos que comprovem a adequabilidade dessas lentes quando sujeitas a radiação solar muito concentrada i.e. elevados fluxos de radiação solar. Por isso, o objectivo principal deste trabalho foi precisamente sujeitar as lentes a condições de utilização semelhantes às previstas durante a sua utilização com o cabo de fibra óptica. Assim, neste estudo as lentes são sujeitas a um feixe muito intenso de radiação uma vez que se pretende investigar o seu comportamento quando funcionam não como sistema concentrador mas sim como elementos de reconfiguração de um feixe já concentrado.

DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E TESTES

Lentes Ensaaiadas

As características das lentes que foram usadas nos testes são apresentadas na Tabela 1 (lentes bicôncavas) e Tabela 2 (lentes plano-convexas). As lentes foram adquiridas a fornecedores conhecidos: “Lens-Optics”, “Fichou”, “LOT-QuantumDesign”. As lentes fabricadas em vidro de borossilicato (do tipo BK-7 da Schott) são bastante mais baratas que as fabricadas em sílica. Como tanto o vidro BK-7 como o vidro de sílica possuem excelente qualidade óptica, permitindo a utilização destas lentes em variadíssimas aplicações, a comparação do seu comportamento quando sujeitas a condições de radiação muito concentrada torna-se essencial.

Tabela 1. Lentes divergentes (bicôncavas) testadas neste trabalho.

Designação	Material	Diâmetro (mm)	Espessura		Distância focal ¹⁾ (mm)
			Bordo (mm)	Centro (mm)	
DV150	Borossilicato	50.8	7.7	3.5	-150
DV200	Borossilicato	50.8	6.7	3.5	-200
DQ151	Sílica	50.8	8.4	3.5	-150
DQ201	Sílica	50.8	7.1	3.5	-200

¹⁾ a 546.1 nm

Tabela 2. Lentes convergentes (plano-convexas) testadas neste trabalho.

Designação	Material	Diâmetro (mm)	Espessura		Distância focal ²⁾ (mm)	BFL ²⁾ (mm)
			Bordo (mm)	Centro (mm)		
CV100	Borossilicato	76.2	2.5	19.3	100	87.2
CQ100	Sílica	76.2	2.4	22.9	100	84.2

²⁾ a 589 nm

Equipamento e Métodos

Os testes de irradiação das lentes foram efectuados na Unidade de processos de altas temperaturas do Instituto IMDEA Energía usando um simulador/projector de radiação por lâmpada de arco de xénon (ver Fig.4). A duração da exposição de cada lente à radiação concentrada chegou a atingir 60 minutos. As lentes foram devidamente posicionadas de modo a que a potência aplicada sobre a superfície exposta de cada lente pudesse ser calculada com alguma exactidão. A metodologia seguida será descrita mais adiante. Para o correcto posicionamento de cada lente utilizou-se uma mesa de 3 eixos xyz controlados por computador.

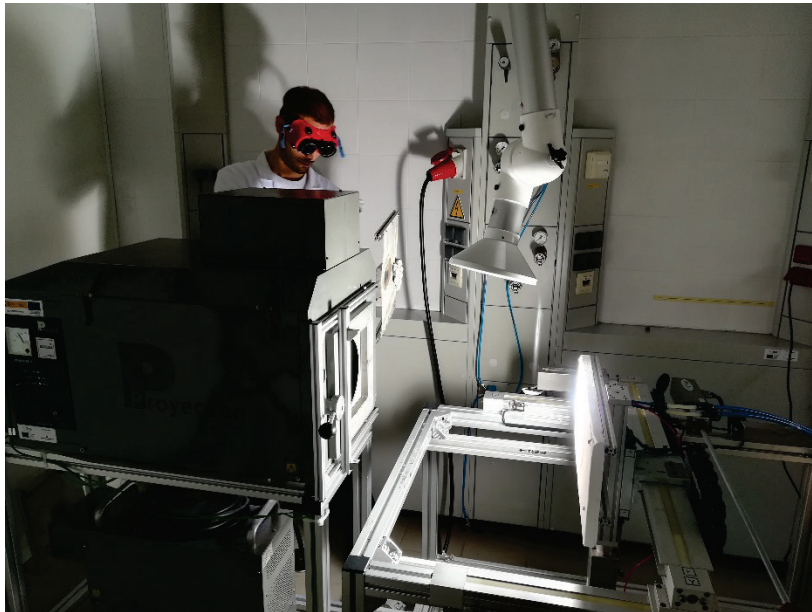


Fig. 4. Aspecto do simulador/projector de radiação por lâmpada de arco de xénon, e da mesa de coordenadas xyz.

Fonte de Radiação. A lâmpada de arco de xénon que foi usada é fabricada pela OSRAM e tem a referência XBO 7000 W/HS XL OFR. Estas lâmpadas da série XBO eram geralmente usadas nos clássicos projectores de cinema para filmes de 35 mm. A radiação gerada tem quase a mesma temperatura de corpo negro que é atribuída à radiação solar antes de entrar na atmosfera da Terra (i.e. aprox. 6000 K). A lâmpada é da classe OFR o que significa que durante o seu funcionamento não gera ozono (ou seja, opera de modo “ozone-free”). Isto é possível graças ao facto de se usar na ampola um vidro de sílica dopado com um material absorvedor de comprimentos de onda no ultravioleta (por exemplo, compostos de cério, ou dióxido de titânio) (Zeiss, 2020). Caso não estivesse dopado, o vidro de sílica permitiria a passagem de luz com comprimentos de onda muito pequenos até 180 nanómetros (nm), mas usando vidro dopado a lâmpada de arco de xénon passa a emitir uma radiação com comprimentos de onda superiores a 220 nm.

Equipamentos de Medição e Metodologia Usada. Para fazer variar o fluxo da radiação usaram-se atenuadores constituídos por uma rede metálica, uma vez que a lâmpada de xénon emite um fluxo não variável. As temperaturas na vizinhança de cada lente foram avaliadas através de termopares do tipo K, tendo-se usado também uma câmara de infravermelhos (ver exemplo na Fig. 5). As medições de fluxo de radiação foram realizadas usando um radiómetro do tipo Gardon (*Vatell Circular-Foil Heat Flux Transducer* TG1000-1, com sensibilidade de 0.022 mV/(Wcm⁻²); gama de trabalho 0 – 445 Wcm⁻²; revestido com grafite coloidal).

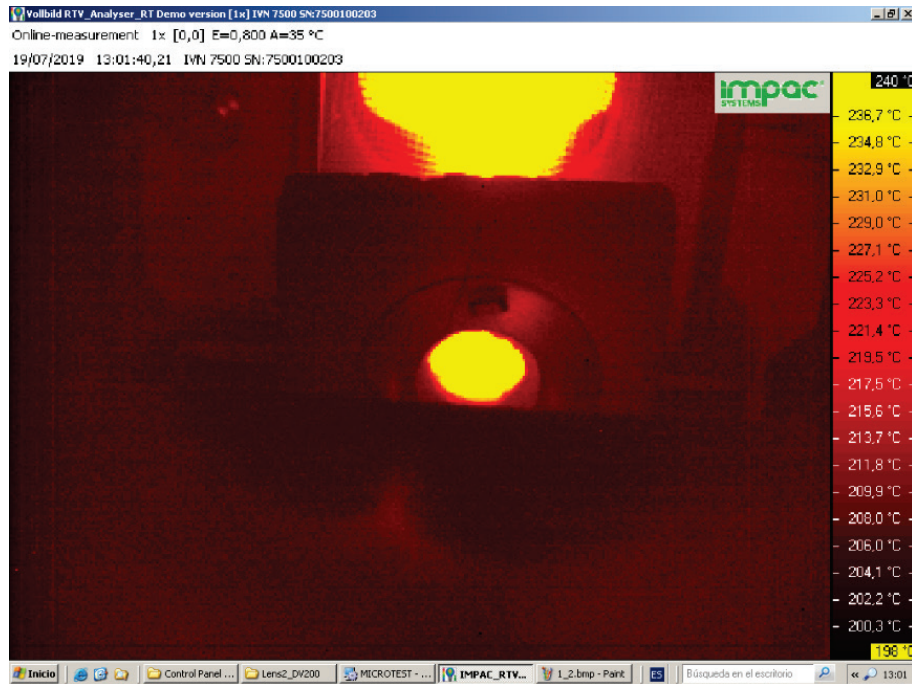


Fig. 5. Imagem proveniente do software da câmara de infravermelhos durante um teste com a lente bicôncava DQ151, mostrando a distribuição da temperatura. A potência da radiação incidente na lente é 185 W, uma vez que se usou uma máscara em alumina com uma abertura circular de 25.4 mm (1 polegada) de diâmetro.

Inicialmente efectuaram-se medições de fluxo com a única finalidade de conhecer a localização do “foco” da radiação, a qual corresponde à posição xyz onde se regista o maior fluxo de radiação. Para tal, o radiómetro foi movimentado ao longo dos 3 eixos, em incrementos de 1 mm. Após conhecida a localização do foco, passou-se a uma segunda fase de medições de fluxo em que se inseriram os atenuadores da radiação. Na Tabela 3 apresentam-se os valores de radiação medida na zona focal (“foco”) e o correspondente factor de atenuação.

Tabela 3. Factores de atenuação do fluxo de radiação obtidos com 5 diferentes atenuadores.

Atenuador	Fluxo de radiação na zona focal $W\ cm^{-2}$	Factor de atenuação
Sem atenuador	316	1
Atenuador nº 1	249	0.788
Atenuador nº 2	221	0.699
Atenuador nº 3	193	0.611
Atenuador nº 4	162	0.513
Atenuador nº 5	130	0.411

Numa terceira fase, realizaram-se medições de fluxo em várias posições em torno do foco, com o objectivo de obter uma estimativa da potência total recebida num plano perpendicular ao eixo óptico (eixo x). Esta série de medições foi realizada com o atenuador nº 5. Devido ao tipo de radiómetro usado, os valores medidos de fluxo são atribuídos a círculos com 5 mm de diâmetro. Assim, e conforme esquema apresentado na Fig. 6(a), efectuaram-se 21 medições de fluxo nos locais representados na Fig. 6(a) todos eles simetricamente distribuídos (em posições norte, sul, este, oeste) no interior de uma área circular com 55 mm de diâmetro. A escolha de uma área circular com 55 mm de diâmetro deriva de duas razões: i) o fluxo medido fora desta área revelou valores muito baixos; ii) as maiores lentes que se pretende testar têm 2 polegadas de diâmetro (50.8 mm). Para cada uma das coroas circulares representadas na Fig. 6(b) calculou-se o valor médio das 4 medições de fluxo efectuadas (norte, sul, este, oeste) e multiplicou-se esse valor pela área da respectiva coroa circular, obtendo-se assim uma estimativa da potência recebida em cada coroa. Estes valores estimados (in W) para cada uma das zonas estão indicados na Fig. 6(b). Somando as potências recebidas por cada uma das zonas obtém-se uma estimativa da potência total recebida no plano perpendicular ao eixo óptico, a qual neste caso foi de $29+149+183+140+125+127 = 753\ W$. Uma vez que estas medições de fluxo foram efectuadas com o atenuador nº 5, cujo factor de atenuação é 0.411, podemos considerar que no caso de não se usar atenuador a potência total recebida no plano perpendicular ao eixo óptico será $753/0.411 = 1832\ W$.

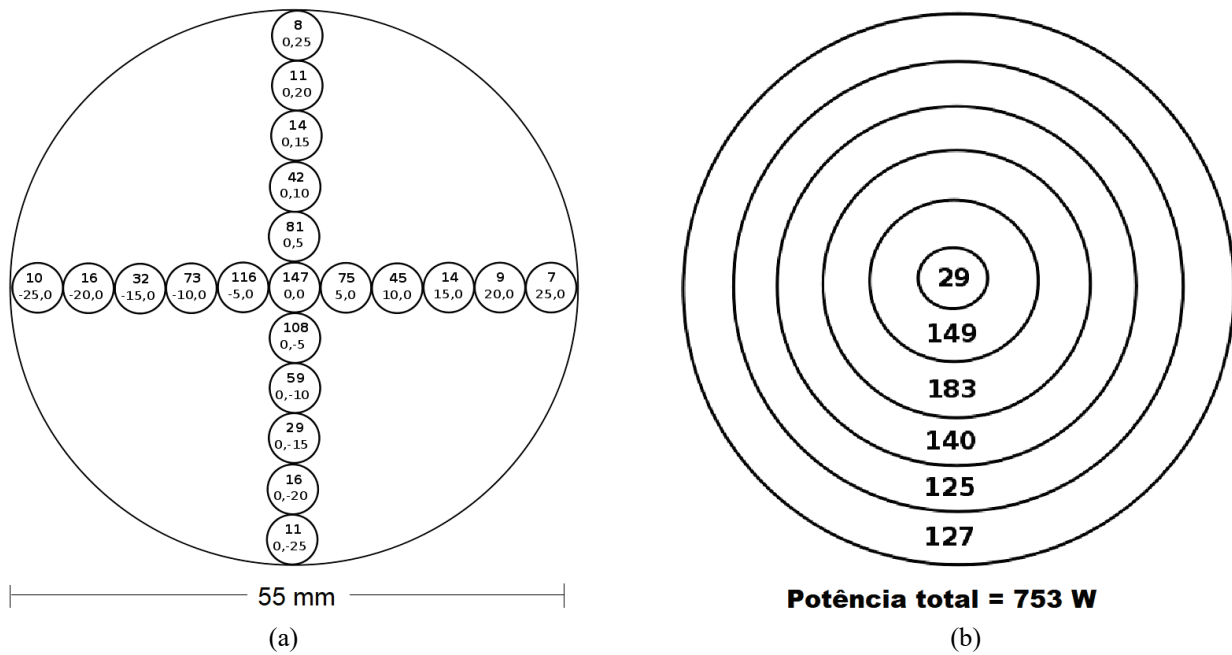


Fig. 6. Esquema mostrando: (a) Posições onde foram efectuadas medições com o radiómetro. (Dentro de cada círculo, o valor em cima indica o fluxo medido, em W cm⁻²; o valor em baixo indica as coordenadas y,z, em mm, do centro do círculo); (b) Zonas usadas para o cálculo da potência total e respectivos valores estimados (in W) para cada uma das zonas, usando o atenuador nº 5.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 resume as condições e os resultados dos testes efectuados com as lentes.

Tabela 4. Resumo dos testes efectuados.

Tipo de lente	Tipo de suporte máscara	Potência aplicada na lente (W)	Tempo de irradiação (minutos)	Temperatura máxima perto da lente ³⁾ (°C)	Comentário
DV150	M, 1 pol.	185	≈ 10	≈ 100	Fracturou após ≈10 minutos
DV200	M, sem m.	386	≈ 3	≈ 84	Fracturou após ≈3 minutos
DQ151	A, 1 pol.	185	60	≈ 205	Não se observaram alterações na lente
DQ151	M, 1 pol.	185	60	≈ 127	Não se observaram alterações na lente
DQ151	A, 1 pol.	361	60	≈ 189	Não se observaram alterações na lente
DQ151	A, 1 pol.	878	60	≈ 342	Não se observaram alterações na lente
DQ201	M, 1 pol.	185	60	≈ 126	Não se observaram alterações na lente
DQ201	M, 1 pol.	361	60	≈ 191	Não se observaram alterações na lente
DQ201	M, 1 pol.	878	60	≈ 340	Não se observaram alterações na lente
CV100	A, sem m.	386	60	≈ 182	Não se observaram alterações na lente
CV100	A, sem m.	753	≈10	≈ 262	Fracturou após ≈10 minutos
CQ100	A, sem m.	386	60	≈ 148	Não se observaram alterações na lente
CQ100	A, sem m.	753	60	≈ 213	Não se observaram alterações na lente

³⁾ medida por termopares localizados na parte de trás da lente, numa zona de sombra, mas perto do bordo da lente.

É de salientar que se usaram diferentes tipos de suportes para as lentes de modo a procurar detectar possíveis problemas causados pelo comportamento do suporte durante o teste de irradiação da lente. Na 2ª coluna da Tabela 4 está registado o tipo de suporte utilizado: “M” significa que a lente esteve suportada por um casquilho metálico (em latão); “A” significa que a lente esteve simplesmente rodeada por uma espuma de alumina. A fim de confinar o feixe de radiação fazendo-o incidir apenas numa zona central da lente (impedindo o mais possível o aquecimento desnecessário dos suportes) usou-se uma máscara (ou écran) em alumina com uma abertura circular de 1 polegada (1 pol. = 25,4 mm) de diâmetro.

As lentes convergentes (plano-convexas) ensaiadas são maiores (diâmetro = 76.2 mm) que as lentes divergentes bicôncavas (diâmetro = 50.8 mm) e, como o feixe de radiação gerado pelo simulador se pode confinar à zona central numa lente com 76.2 mm de diâmetro, todos os ensaios com as lentes convergentes foram realizados sem máscara.

Conforme se pode constatar na Tabela 4, não se observaram quaisquer danos nas lentes em vidro de sílica, mesmo em situações de hipotético maior risco, como, por exemplo, com a lente divergente (bicôncava) inserida num casquilho de latão, o qual aqueceu até uma temperatura de ≈ 340 °C, quando a lente foi irradiada com uma potência estimada em 878 W. Os únicos problemas detectados durante o plano de ensaios registaram-se com as lentes em vidro de borossilicato, pois todas elas fracturaram. Na nossa opinião, as lentes em borossilicato colapsaram devido a um fenómeno interno à lente e não derivado de esforços mecânicos induzidos pelo suporte da lente pois, como se pode constatar na Tabela 4, também ocorreu o mesmo tipo de fractura numa lente de vidro de borossilicato que simplesmente estava rodeada por uma espuma de alumina. Uma vez que é habitual nos laboratórios que fazem uso de radiação solar altamente concentrada utilizar balões e outros recipientes fabricados em vidro BK-7 ou *Pyrex*, foi para nós uma surpresa verificar a fractura prematura das lentes fabricadas com o mesmo material (BK-7). Em nossa opinião, a origem da fractura só encontra explicação pelo tipo de radiação que foi usada nestes ensaios: a radiação emitida por uma lâmpada de arco de xénon; com se explica nos parágrafos seguintes.

A Fig. 7 mostra o espectro da radiação solar à entrada da atmosfera terrestre (área com cor amarelo) e o espectro da radiação solar ao nível do mar (área a vermelho). Assim, após absorção pela atmosfera, a radiação solar apresenta comprimentos de onda que começam em cerca de 290 nm na região do ultravioleta. Uma vez que nos ensaios não usámos radiação solar, mas sim radiação emitida por uma lâmpada de arco de xénon, será importante comparar o espectro a vermelho na Fig. 7 com espectro emitido pela lâmpada de xénon.

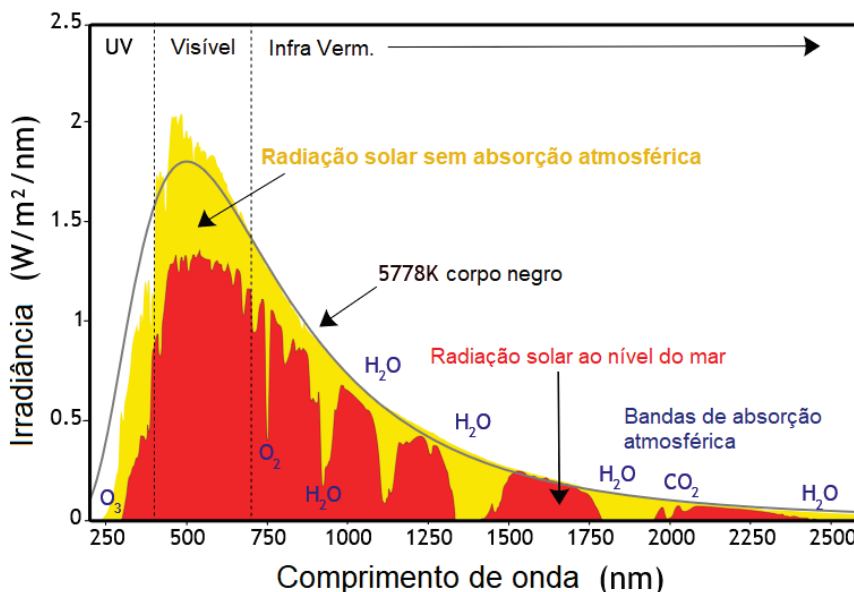


Fig. 7. Espectros da radiação solar à entrada da atmosfera terrestre e ao nível do mar. (Iqbal, 1983)

A Fig. 8 compara o espectro não-filtrado do arco de xénon com o espectro solar sem absorção atmosférica. Para além do facto da lâmpada de arco de xénon apresentar uma série de picos na região entre 800 e 1000 nm (picos esses que não aparecem na radiação solar), pela análise da Fig. 8 pode constatar-se que o arco de xénon emite radiação cujos comprimentos de onda começam em cerca de 250 nm e, portanto, há discrepância na região entre 250 e 290 nm. Segundo (Finlayson-Pitts and Pitts Jr., 2000) a região ≤ 290 nm do espectro do arco de xénon pode ser filtrada de modo a tornar-se mais parecida com a radiação solar, usando vidro de borossilicato (*Pyrex*). Assim, a sugestão de usar *Pyrex* para filtrar radiação ≤ 290 nm pode ser exactamente a razão porque as lentes em *Pyrex* (borossilicato) partiram todas; talvez porque absorviam demasiado nessa gama de comprimentos de onda.

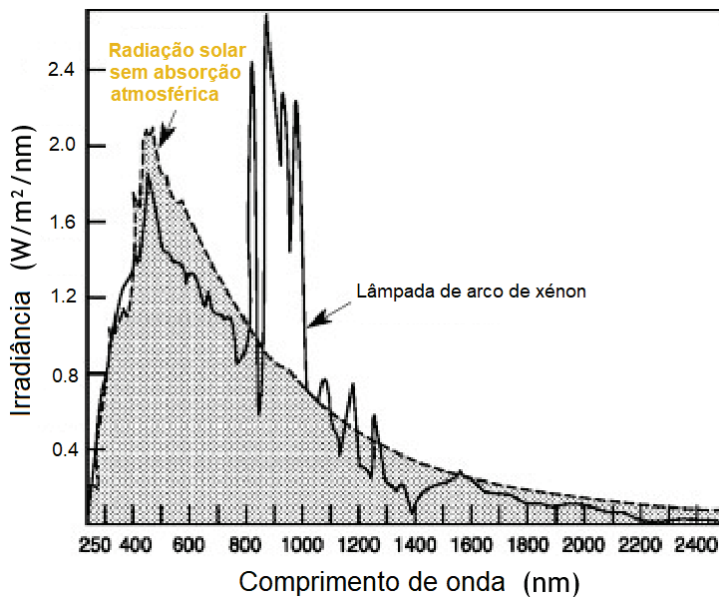


Fig. 8. Espectro não-filtrado do arco de xénon e espectro da radiação solar sem absorção atmosférica. (Finlayson-Pitts and Pitts Jr., 2000)

CONCLUSÕES

Neste trabalho efectuaram-se ensaios com lentes em vidro de borossilicato (BK-7) e com lentes em vidro de sílica. Todas as lentes em sílica se comportaram bem durante os ensaios, mesmo quando a potência aplicada numa lente de sílica com diâmetro de 50.8 mm atingiu 878 W e se registou uma temperatura de 342 °C (medida por termopares localizados na parte de trás da lente, numa zona de sombra, mas perto do bordo da lente). Quanto às lentes em vidro de borossilicato, todas elas fracturaram, mais cedo ou mais tarde. O facto de se ter usado a radiação de uma lâmpada de arco de xénon, em vez da radiação solar, pode ter contribuído para a fractura das lentes em borossilicato pelo que será importante realizar testes com concentradores de radiação solar e não com simuladores.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo EU Grant Agreement nº 823802 “Solar Facilities for the European Research Area – Third Phase (SFERA-III), pelo projeto INSHIP (Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes) www.inship.eu e pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal, através do IDMEC - Instituto de Engenharia Mecânica (Pólo IST) e LAETA (projecto UIDB/50022/2020).

REFERÊNCIAS

De Almeida, G. (2019) Proposta: Estrutura de suporte do concentrador e dispositivos de fixação e regulação dos seus elementos ópticos; Ed. do Autor: Lisboa, Portugal.

Finlayson-Pitts, B.J. and Pitts Jr., J.N. (2000) Applications of Atmospheric Chemistry. In *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*, pp. 871-942, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-257060-5.X5000-X>

Iqbal, M. (1983) The Solar Constant and Its Spectral Distribution. In *An Introduction to Solar Radiation*, Chapter 3, Academic Press.

Li, X.L., Fan, G.H., Zhang, Y.Q. and Ji, X.F. (2018). A fresnel concentrator with fiber-optic bundle based space solar power satellite design, *Acta Astronautica* 153:122-129. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.10.037>

Rosa, L.G. (2019). Solar heat for materials processing: a review on recent achievements and a prospect on future trends. *ChemEngineering* 3, 83. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3040083>

Song, J.F., Wang, J.T., Niu, Y.S., Wang, W.M., Tong, K., Yu, H. and Yang, Y.P. (2019). Flexible high flux solar simulator based on optical fiber bundles. *Solar Energy* 193, 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.002>

Zeiss (2020). Xenon Arc Lamp Construction. Available online: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/xenonarc.html> (accessed on 2 March 2020).