



ANÁLISE DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS E COMPORTAMENTO DAS FIBRAS ÓPTICAS NO CONCRETO TRANSLÚCIDO

Amanda Almeida Bastos - amanda.abastos92@gmail.com

Gustavo dos Santos Pinheiro - gustavo.snt@hotmail.com

Matheus Kenji Kubo - kubokenji123@gmail.com

RESUMO: Com o desenvolvimento na área da construção civil e alguns resultados relevantes na literatura com o uso de concreto translúcido (CT), mais estudos acerca desse material vêm sendo realizados com intuito de entender de forma mais aprofundada suas propriedades, buscando alternativas e melhorias na sua eficiência. O concreto translúcido consiste na utilização de fibras ópticas (OF) dentro do concreto para a transmissão de luz solar de um ambiente externo para o interno, reduzindo a utilização da luz artificial e, conseqüentemente, mitigando o consumo de energia. Dessa forma, este trabalho busca avaliar de forma sistemática os resultados obtidos em alguns estudos que desenvolveram e realizaram testes com o uso de CT. Ao todo três estudos foram analisados e uma maior abordagem e discussão crítica foi realizada com os metodologia utilizada e resultados obtidos com o mais recente deles.

Palavras-chave: concreto translúcido, propriedades ópticas, transmissão de luz.

1 INTRODUÇÃO

A utilização do concreto na construção de prédios solicita uma demanda de iluminação artificial no interior dos espaços para promover ambientes saudáveis para se ocupar. Atualmente, essa demanda de energia artificial passou a ser parcialmente reduzida com a utilização de artifícios como, vidros em fachadas e o concreto translúcido (AHUJA; MOSALAM, 2017). Pioneiramente estudado em 2001, pelo arquiteto Arón Losonczi, e produzido em 2003, o concreto translúcido, chamado LiTraCon (Light Transmitting Concrete), teve como principais focos de utilização a tecnologia ambiental e acabamentos artísticos (KASHIYANI et al., 2013). A produção do material, atualmente, ocorre, de modo geral, através de dois tipos de produções tecnológicas. Uma das tecnologias é a utilização de fibras ópticas (OF), que são capazes de transmitir luz através dos blocos de concretos sem utilização estrutural, e a outra é a utilização de placas transparentes de polímero (PMMA), que também possui capacidade de transmissão de luz, porém com custo menor que a primeira (HALBINIAK; SROKA, 2015). Em um estudo realizado com o uso de PMMA observou-se a possibilidade de um maior alcance de exposição de luz no interior do objeto usando a luz do dia, reduzindo o consumo de energia, entretanto os resultados nesse estudo apresentaram uma limitação na resistência do concreto sendo no máximo 7,7 Mpa (MAININI et al., 2012)). Por outro lado, com o uso de fibras ópticas uma faixa de resistência entre 50 a 80Mpa foi observada e



observou-se ainda que, uma certa densidade de fibras (2,5%) permite boa condutância de luz sendo a espessura do elemento não relevante (KURPINSKA, 2013).

Apesar da grande contribuição da utilização desse material nos aspectos decorativos, estudos recentes têm focado na análise do seu potencial de economia de energia através das propriedades ópticas que ele possui. A maioria desses estudos apresentam resultados com base na utilização de programas de modelagem computacional que foram desenvolvidos para avaliar a economia do consumo de energia do concreto translúcido com a utilização de diferentes teores de fibras ópticas (AHUJA; MOSALAM, 2017; AHUJA; MOSALAM; ZOHD, 2015). Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo, realizar uma revisão sistemática de estudos científicos utilizando CT a fim de analisar os benefícios obtidos pelas propriedades

ópticas presentes nas fibras ópticas. Além disso, avaliar e discutir a viabilidade do uso dessa tecnologia, levando em consideração as variáveis e resultados obtidos segundo as referências utilizadas.

2 PROPRIEDADES ÓPTICAS

2.1 Conceitos básicos

Segundo Callister (2009), as propriedades ópticas dos materiais podem ser explicadas através do comportamento do material quando exposto a uma radiação eletromagnética. A radiação eletromagnética consiste basicamente em componentes de campo elétrico e magnético perpendiculares entre si e à propagação da onda. Dependendo do comprimento das ondas, classificam-se as de acordo com o espectro da radiação eletromagnética, numa escala logarítmica, como raios-X, ultravioleta, visível, infravermelho e ondas de rádio.

No caso dos concretos translúcidos, a análise das propriedades ópticas ocorre devido a interação da luz com um sólido. Nesse caso, a luz pode ser transmitida através do meio, uma parte pode ser absorvida e outra refletida na interface do sólido com o meio e a intensidade da luz incidente deve ser igual à soma das intensidades transmitidas, absorvidas e refletidas (CALLISTER, 2009). Dessa forma, surgem os conceitos de materiais transparentes, translúcidos e opacos definidas a seguir (Figura 1):

- a) Materiais transparentes: são capazes de transmitir luz, mas com baixa absorção e reflexão.



- b) Materiais translúcidos: são aqueles em que a luz é transmitida espalhada dentro no interior do objeto, ao ponto que não ocorre distinção definida dos objetos quando olhados através da amostra do material.
- c) Materiais opacos: não são capazes de transmitir luz.

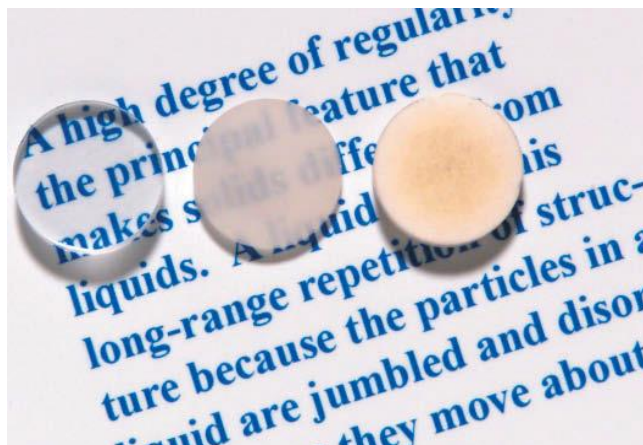


Figura 1 - Da esquerda para a direita, ilustração de material transparente, translúcido e opaco. Fonte: Callister (2009).

Os fenômenos presentes nos materiais podem ser classificados de acordo com suas propriedades, sendo, metais ou não-metals, desta forma, pelas suas características específicas. Assim, os fenômenos conhecidos como refração, reflexão, absorção ou transmissão são a interação entre o material e a luz transmitida (CALLISTER, 2009).

Chama-se de refração a passagem da luz para o interior de um objeto transparente, reduzindo a sua velocidade, desencadeando um deslocamento em relação ao seu trajeto inicial (Lei de Snell). Desta forma, define-se o índice de refração, na qual é representado pela razão entre as velocidades da luz no vácuo e no meio de contato.

Assim, caso esse feixe de luz transite de um lugar ao outro com um índice de refração diferente, parte desta luminosidade é desviada na área de interação entre os dois meios, mesmo sendo materiais transparentes, parte pode ser refletida na superfície, havendo uma divergência, conhecida como reflexão.

Nos materiais não metálicos pode ocorrer o fenômeno de absorção, sendo como algumas características, opaco à luz visível ou exibindo uma aparência colorida, caso sejam transparentes. Isto ocorre através de dois mecanismos básicos presente neste grupo de materiais, influenciando nas características de transmissão destes não metais. Conhecidos como polarização eletrônica e transições eletrônicas, são interações atômicas e eletrônicas que ocorrem dentro destes materiais.



O fenômeno de transmissão ocorre pela passagem de um feixe de luz através de um sólido transparente, com uma espessura determinada, tendo como perdas a absorção e a reflexão, resultando no feixe transmitido.

Um fenômeno importante que ocorre nas propriedades ópticas é o sistema anidólico (um sinônimo de “não formação de imagem”), ou seja, a utilização de mecanismo para o transporte da luz solar para o interior do ambiente, obtendo o máximo de aproveitamento da iluminação natural (SANTOS, 2009). Desta maneira, o concreto translúcido trabalha de forma sustentável pelo melhor aproveitamento da luz solar para a distribuição no interior dos ambientes, reduzindo assim o consumo da iluminação artificial (SCARTEZZINI; COURRET, 2002).

3 CONCRETO TRANSLÚCIDO

3.1 Confecção do concreto translúcido

Becker et al. (2010) descrevem detalhadamente o processo de execução de blocos de concreto translúcido, ilustrado na Figura 2. Os autores apontam alguns cuidados tomados na escolha do concreto e no modo de compactação, onde optaram respectivamente por um concreto auto-adensável e sem o uso da vibração, a fim de evitar com que as fibras rompam no processo. Garantir a passagem direta da fibra de uma extremidade a outra do bloco de concreto sem interrupções também é fundamental, dessa maneira ocorrerá de fato a transmissão das ondas de luz pelo material, para fibras com 1 mm de diâmetro e 1 cm de espaçamento, de eixo a eixo.



Figura 2 - Etapas da confecção das placas de concreto translúcido. Fonte: Becker et al. (2010).

Além disso, é descrito brevemente o modo de execução de paredes de vedação e recomendações quanto ao uso de argamassas na sobreposição desses blocos. Indicando o uso do mínimo possível



de argamassa para um melhor aproveitamento das propriedades ópticas do conjunto, como o uso de um selante flexível à base de poliuretano ou uma argamassa colante AC-III.

3.2 Propriedades das fibras ópticas

As fibras ópticas são materiais cilíndricos transparentes, finos e flexíveis, com núcleo feito de plástico ou vidro e com capacidade de transmitir luz visível ou infravermelha através delas (MOSALAM; CASQUERO-MODREGO, 2018). A capacidade de transmissão desses materiais se deve à diferença do índice de refração entre o núcleo das fibras ópticas e o índice do seu revestimento (casca) podendo ser uma fina camada de polímero de PF (Perfluorado) (Figura 3) . Portanto a camada de revestimento protege o núcleo e permite que a luz se propague pela Reflexão Interna Total (TIR) na interface de revestimento do núcleo, como mostra a Figura 4.

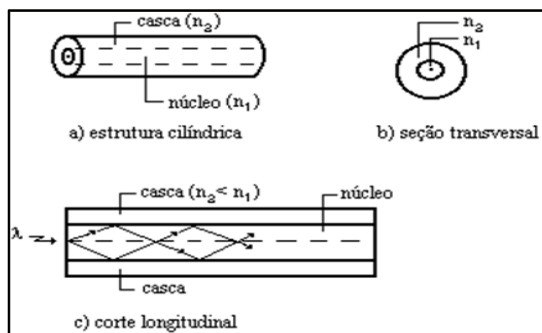


Figura 3 - Estrutura cilíndrica (a), seção transversal (b) e corte longitudinal (c) da fibra óptica. Fonte:Dorn e Bader (1994).

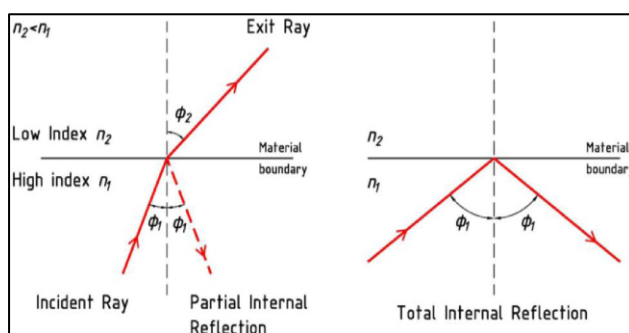


Figura 4 - Lei de Snell e diagrama de raio de luz.
Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

No concreto translúcido as fibras ópticas estão sujeitas a três fenômenos: reflexão, refração e TIR ao longo das suas paredes internas. De acordo com Ahuja e Mosalam (2017), a fração de luz refletida após atingir o topo das fibras ópticas é expressa pela Equação 1. Onde $0 \leq R \leq 1$, para um ângulo de incidência θ_i , μ é a razão de permeabilidades magnéticas para meios de transmissão e incidentes e n é a razão dos índices de refração para meios de transmissão e incidentes. A outra fração da luz que é refratada nas fibras ópticas pode ou não ser submetida a TIR. A condição para o TIR ocorrer dentro de uma fibra óptica é que $n_{\text{núcleo}} \sin \theta_i > n_{\text{revestimento}}$. (AHUJA; MOSALAM, 2017; AHUJA; MOSALAM; ZOHDI, 2015)



$$R = 1 - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\frac{n^2}{\mu} \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\frac{n^2}{\mu} \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \right)^2 \right) + \left(\left(\frac{\cos \theta_i - \frac{1}{\mu} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \frac{1}{\mu} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \right)^2 \right) \quad \text{Equação 1}$$

Com a utilização de modelos computacionais, Ahuja e Mosalam (2017) avaliaram a diminuição do consumo de energia gerado por painéis de concreto translúcido com fibra óptica, composta por polimetil-metacrilato ($[CH_2C(CH_3)(CO_2CH_3)]_n$), conhecido como acrílico, representado na Figura 5, envolto de uma fina camada de PF. Segundo os autores, a partir de estudos preliminares (AHUJA; MOSALAM; ZOHDI, 2015), o uso do material como vedação em fachadas de edificações podem gerar uma redução de energia de 50%, considerando uma taxa volumétrica de fibra óptica de aproximadamente 6%. Assim, Ahuja e Mosalam (2017) buscaram determinar um teor ótimo de fibra para painéis de concreto translúcido considerando a economia de energia, a partir de análises térmicas e de luminescência.

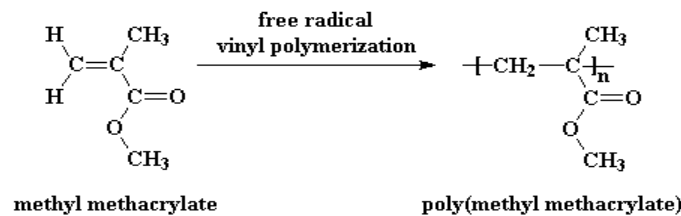


Figura 5 - Representação da estrutura molecular do acrílico. Fonte: Polymer Science Learning Center

O método utilizado neste trabalho é chamado de rastreamento de raio (*ray tracing*), e, baseia-se no rastreamento dos raios à medida em que eles mudam de trajetória. Ao encontrar uma superfície o ponto de interseção é determinado e a partir da aplicação das Leis de Fresnel nesse ponto, calcula-se o raio de saída (refletido ou refratado) (AHUJA; MOSALAM; ZOHDI, 2015)

4 TRANSMISSÃO DA LUZ EM PAINÉIS DE CONCRETO TRANSLÚCIDO

Em estudos prévios (AHUJA; MOSALAM; ZOHDI, 2015), já haviam iniciado uma avaliação da viabilidade do uso de um concreto translúcido em termos de economia de energia e suas limitações. Eles observaram em seus painéis de CT de estudo uma possibilidade de 43,5% a 84% de economia de energia de luz entre 8h e 18h quando esses painéis tivessem 49 ou 121 fibras ópticas. Posteriormente alguns dos mesmos autores procuram estudar uma relação volumétrica de fibra ideal para painéis de CT que resultaria em economia de energia (AHUJA; MOSALAM, 2017). Dessa vez eles concluíram que os painéis de concreto translúcido podem diminuir o consumo de



energia em 18% para uma taxa de volume de fibra de 5,6%, sendo essa taxa definida como o “teor ótimo”.

Em um estudo mais recente, que servirá de maior referência para a análise sistemática deste trabalho, Mosalam e Casquero-Modrego (2018) buscaram avaliar a transmissão de luz para diferentes painéis de concreto translúcido formados de fibra óptica. Nesse estudo, as análises foram realizadas com painéis de CT contendo OF de 3 mm, 6 mm e 10 mm de diâmetros. Ao todo foram feitos 4 testes com esses painéis variando em cada ensaio um parâmetro diferente. No teste 1 (Figura 6a) os painéis possuíam a mesma densidade de fibra, variando a distribuição e a separação entre elas, a intenção era verificar a influência da distribuição na transmissão de luz dos painéis. No teste 2 foi analisada a influência da densidade variando o diâmetro e o espaçamento da fibra (Figura 6b). Para o teste 3 (Figura 6c) também se analisou a influência da densidade, porém através da variação da distribuição e diâmetro. Nos testes 4 foram feitas análises da influência da espessura dos painéis e do tipo de material da fibra óptica (Figura 6d). Nesse último teste, utilizou-se painéis com fibra de acrílico, já que são mais viáveis economicamente.

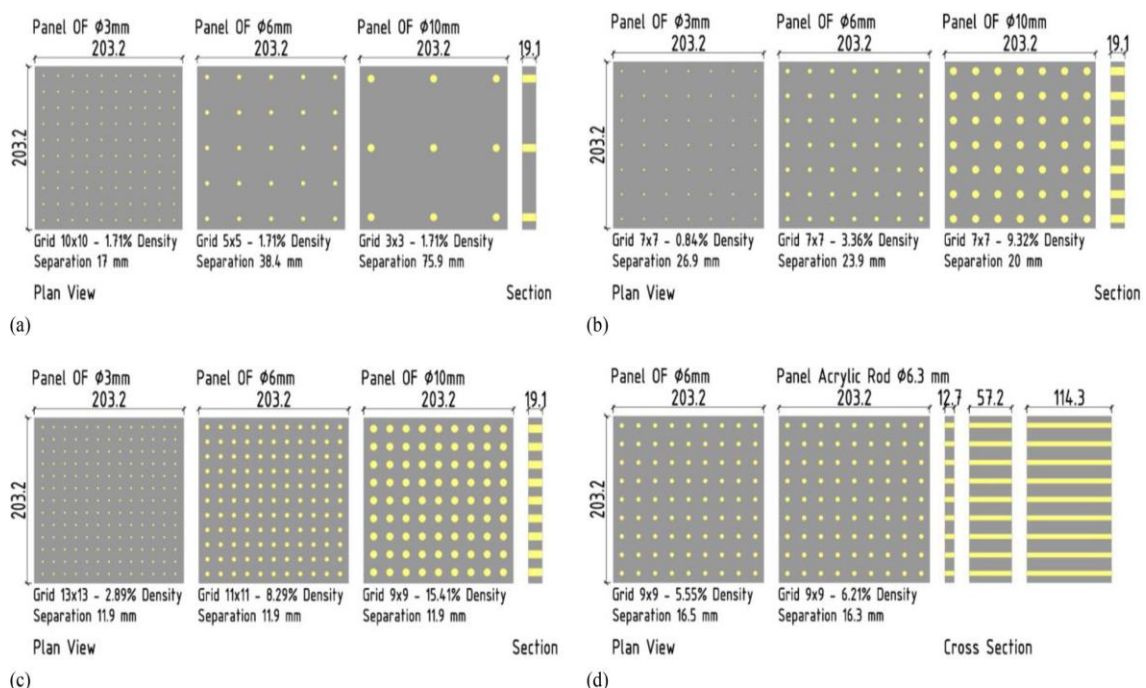


Figura 6 - Painéis teste 1,2, 3 e 4 da camada B. Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

Ainda nesse estudo, Mosalam e Casquero-Modrego (2018) apresentaram outra análise utilizando um novo sistema de painéis de concreto translúcidos, onde era adicionado, ao lado dos painéis de CT com fibra óptica (camada tipo B) uma painéis contendo Concentrador Parabólico Composto



(CPC) e cones retos (SC) (figura x) que foram chamados de camada B. A intenção era avaliar a influência do uso desses “cones” na captação e transferência de luz para as fibras ópticas contidas nos painéis de CT. Para avaliar essa influência, foram realizados testes com as duas camadas A e B (Figura 7) e em seguida os resultados foram comparados aos dos testes com somente a camada A (painéis de CT com OF) descritos anteriormente. No entanto, os ensaios realizados com o novo sistema (camada A+B) não foram realizados variando todos os painéis de CT da camada A, utilizando-se somente os painéis do teste 2 com grid constante 7x7 (Figura 6b). O novo sistema incluía um estudo com a variação da altura dos cones, sendo que o diâmetro de abertura para captação de luz permanecia constante em todos eles.

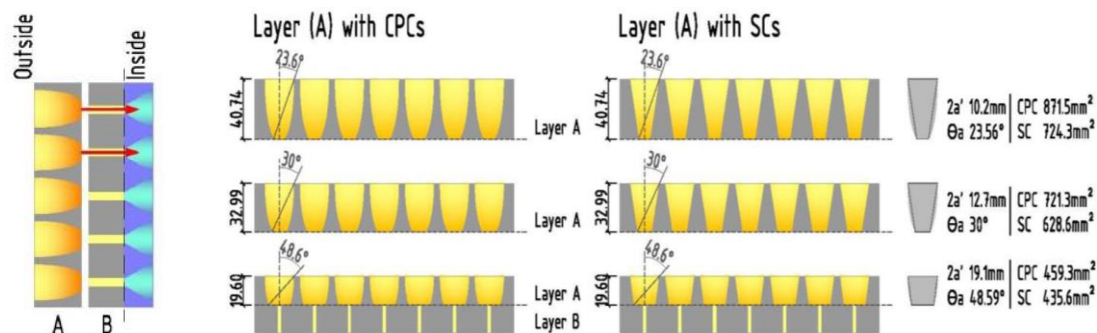


Figura 7 - Painéis testes camada A mais camada B. Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

4.1 Resultados obtidos

Os resultados a seguir, foram obtidos pelos ensaios realizados por Mosalam e Casquero-Modrego (2018), a fim de representar gráficos com os comparativos dos testes de 1 a 6. Foram feito um total de 15 painéis, sendo três para os testes um a três, com a utilização de diâmetro de 3mm, 6mm e 10mm. Porém, no teste quatro foram feitos seis painéis ao todo, com diferentes materiais, sendo três de cada.

Na Figura 8, é representado o teste um com um total de três painéis com diferentes diâmetros, com a densidade constante, percebe-se que no começo e no fim dos testes, ambos transmitiram a mesma quantidade de luz aproximadamente. A maior leitura foi realizada pela fibra com 3mm de diâmetro ao meio-dia, diferente da leitura obtida pela fibra de 10mm, que diminuiu durante esse período. Assim percebe-se a influência no resultado da configuração da distribuição (grid).

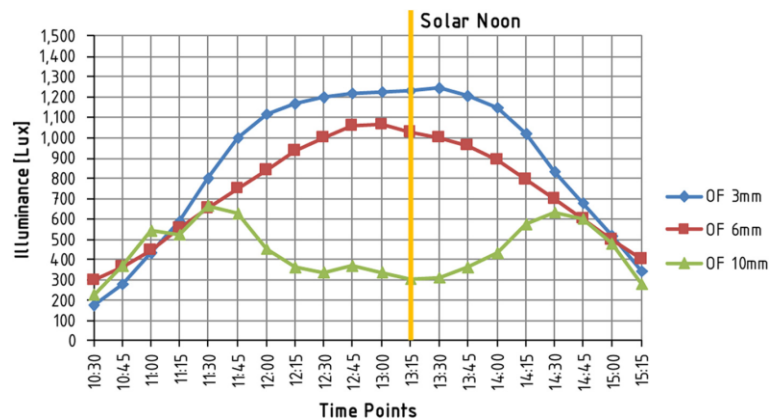


Figura 8 - Resultado de iluminância do teste 1. Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

Na Figura 9, apresenta-se o teste dois, com os painéis de fibra óptica de diferentes diâmetros, mudando somente a sua distribuição (grid). Percebe-se que diferente do teste um, a maior leitura de iluminância ocorre com a fibra de diâmetro de 10mm, mas a maior quantidade de luz transmitida por unidade de seção transversal foi maior na fibra de 3mm. Assim, entende-se que a influência da densidade varia com o diâmetro da fibra e seu espaçamento.

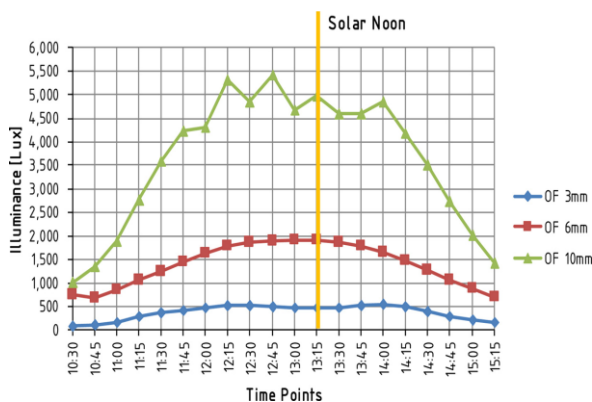


Figura 9 - Resultado de iluminância do teste 2.
Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

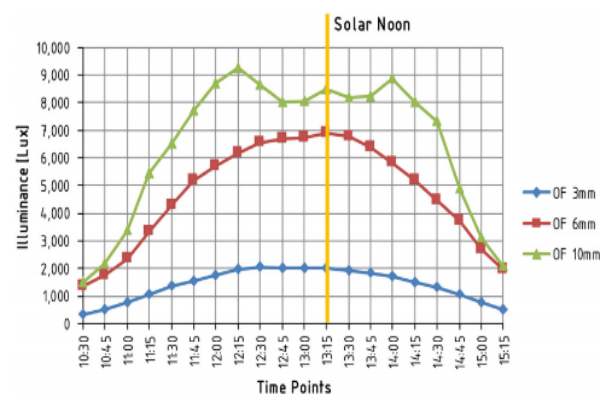


Figura 10 - Resultado de iluminância do teste 3.
Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

A seguir, representando o teste três, utilizou-se também três painéis com a diferença dos outros testes, de possuir o mesmo espaçamento de 11,9mm (Figura 10). A maior leitura de iluminância foi marcado com painéis com fibras óptica de maior diâmetro, no caso o de 10mm, mas apresentaram uma diminuição de leitura similar com o teste um, da mesma forma, mostrando que o pronto com maior quantidade de luz transmitida por unidade de seção foi maior para os painéis com a fibra óptica de 3mm. Desta maneira, nota-se a influência da densidade, variando a distribuição (grid) e o diâmetro.



No teste 4 (Figura 11), três painéis com espessuras diferentes foram analisados com fibras ópticas e fibras de acrílico. Todos os painéis com OF transmitiram maior quantidade de luz ao meio dia solar (~13:15), já os resultados com as fibras de acrílico foram menos consistentes, sendo a maior leitura de iluminância observada 35 minutos após o meio dia solar (13:45). Para as fibras de acrílico, na maioria dos pontos de leitura, a espessura de painel de 12,7 mm apresentou maior transmissão de luz, enquanto para as fibras ópticas esse mesmo painel só apresentou maiores leituras no começo e fim do teste. Por outro lado, as menores leituras foram observadas para os painéis de espessura de 57,2 mm. Observou-se que as leituras realizadas nos painéis de OF apresentaram resultados menos padronizados que os painéis com fibra de acrílico. Isso foi observado nos valores iniciais e finais, onde para as fibras de acrílico as leituras seguiram uma tendência e para as fibras ópticas essas leituras variaram ao longo do dia. Como exemplo, os resultados dos painéis de 114,3 mm com OF apresentaram maiores leituras no meio do dia, mas apresentaram piores leituras que os painéis mais finos quando o ângulo de incidência foi menor (começo e final do dia).

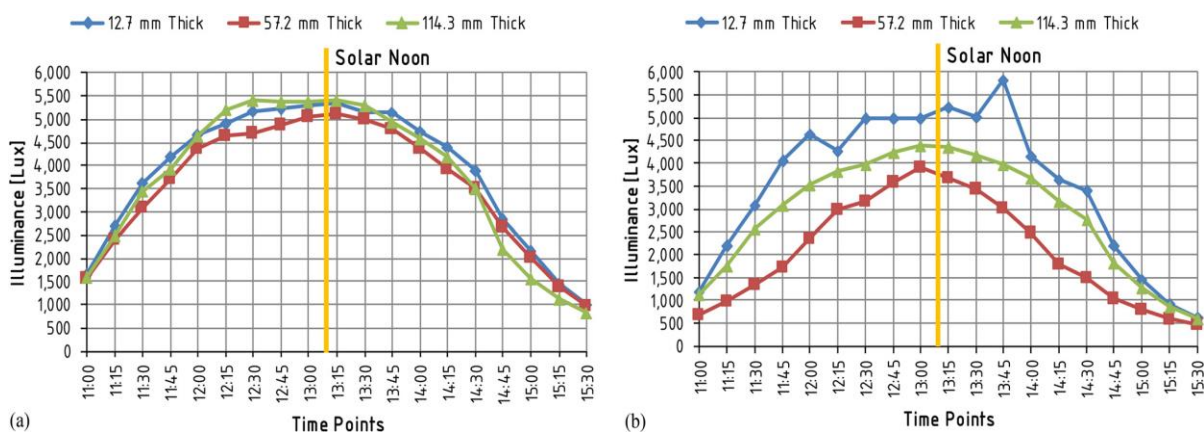


Figura 11 - Resultado de iluminância do teste 4. Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

Nos testes 5 e 6, ilustrados na Figura 12, analisou-se a influência do uso do CPC e SC com fibra óptica. Comparando os resultados, utilizando ou não o novo sistema (camada A+B), Os testes usando somente a camada B transmitiram mais luz do que quando colocados juntos da camada A. Em alguns resultados os painéis com cones retos (SC) transmitiram mais luz através das fibras do que os CPC e os sistemas usando CPC e SC com ângulos de 48,6° permitiram maior transmissão de luz quando comparada com todos os sistemas (camada A+B e camada B).

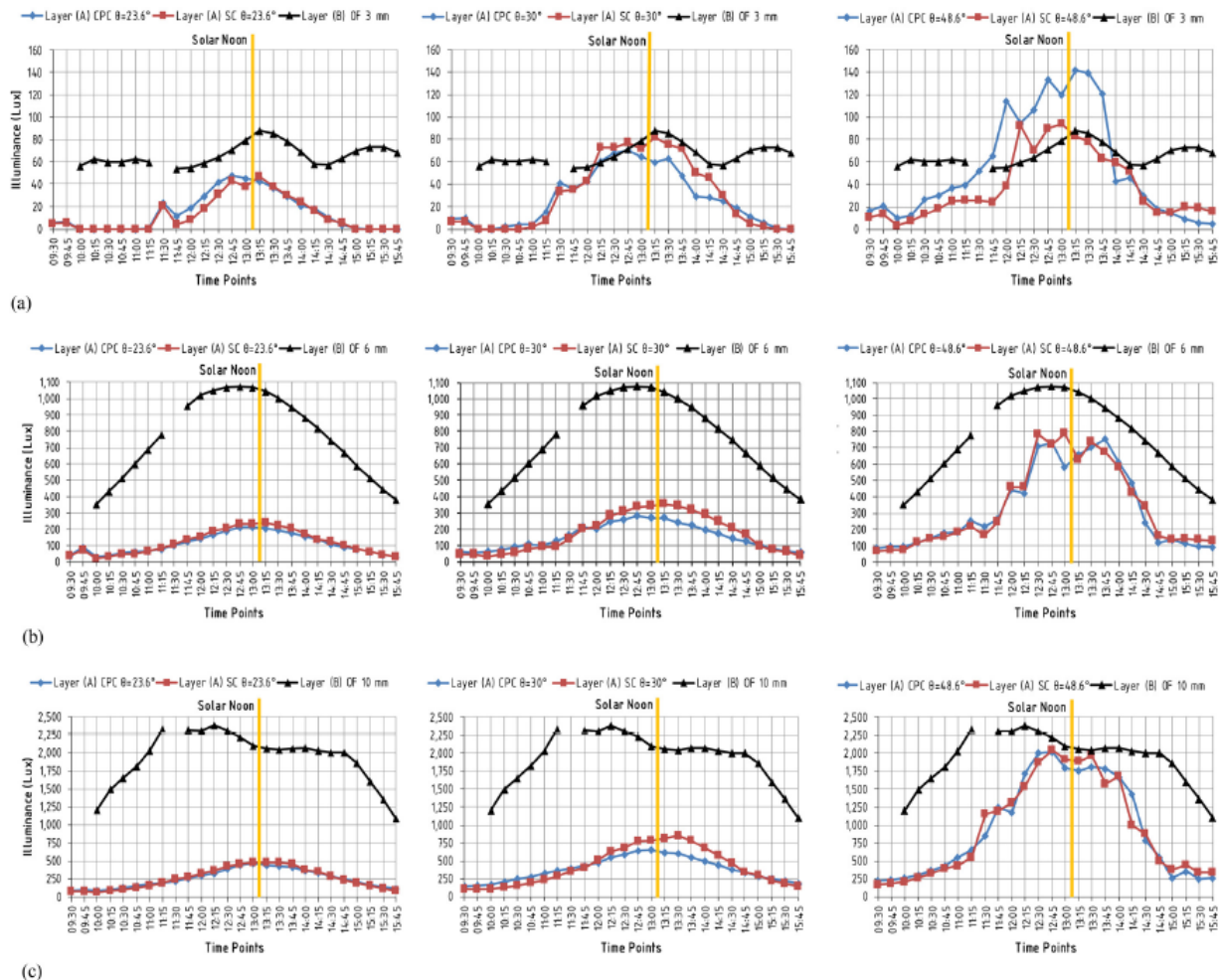


Figura 12 - Resultado de iluminância camadas A+B. Fonte: Mosalam e Casquero- Modrego (2018).

5 CONCLUSÃO E DISCUSSÕES FINAIS

Concluiu-se que o trabalho realizado, apresentou maiores índices de luz solar nos meses de junho, julho e começo de setembro, no hemisfério norte. Desta forma, os testes realizados pela camada B, com a utilização das fibras, de um a quatro percebeu-se melhor resultado da fibra óptica do que a de acrílico, diferente em relação ao comportamento delas que foram semelhantes. Já nos testes realizados da camada A, com a utilização de Concentrador Parabólico Composto (CPC) e os troncos de cone (cones retos), mostraram maior eficiência da transmissão da luz de um ambiente a outro. Assim, nota-se uma relação de iluminância por área de seção, onde mostra que a densidade nem sempre é mais vantajosa, o que demonstra uma divergência em relação a quantidade de aberturas apresentadas.



Desta maneira, entende-se que os resultados apresentados, necessitam de aperfeiçoamento em relação aos testes realizados, como a utilização de outras posições em relação ao ângulo dos painéis; melhorar a geometria óptica para captar melhor os raios solares em diversas orientações, sem necessitar de mudar a sua inclinação; analisar a eficiência das fibras através de diferentes sistemas; como a contribuição da utilização do sistema anidólico, para uma análise da otimização na captação de luz.

Com isso, notou-se alguns pontos críticos em relação ao estudo realizado. Primeiramente, pela falta de informação de custo-benefício da fibra óptica em relação a de acrílico, além de contar com o aparelho de medição somente em um ponto fixo, onde os valores acabam sendo tendenciosos para alguns dos testes apresentados com as fibras. Além disso, notou-se carência de uma análise mais aprofundada de alguns dos resultados apresentados, em especial aos testes do tipo A, sobre o Concentrador Parabólico Composto (CPC) e o tronco de cone (cones retos).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUJA, A.; MOSALAM, K. M. Evaluating energy consumption saving from translucent concrete building envelope. **Energy and Buildings**, v. 153, p. 448–460, out. 2017.

AHUJA, A.; MOSALAM, K. M.; ZOHDI, T. I. AN ILLUMINATION MODEL FOR TRANSLUCENT CONCRETE USING RADIANCE. p. 9, 2015.

BECKER, C.; CAIO, F.; LUDWIG, D.; SCHERER, E.; MARQUETTO, L.; RAHMEIER, R.; TUTIKIAN, B. Execução de Paredes de Vedação com Concreto Translúcido. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, Ceará, 2010.

CALLISTER, W. D.; Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley, New York, 2009.

DORN, F.; BADER, F. **Physik, Mittelstufe**. Schroedel, 1994. v. 1

FALABRETTI, A.; FRANÇA, C. H. A.; FILHO, R. B. A.; HOLANDA, E. P. T. Substituição da Fibra Óptica pelo PET no Concreto Translúcido. Ciências Exatas e Tecnológicas, Alagoas, v. 4, n. 2, p. 187-194, 2017.

HALBINIAK, J.; SROKA, P. Translucent Concrete as the Building Material of the 21st Century. p. 6, 2015.

KASHIYANI, B. K. et al. A Study on Transparent Concrete: A Novel Architectural Material to Explore Construction Sector. v. 2, n. 8, p. 5, 2013.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PCC 5726 – Princípios da Ciência dos Materiais Aplicados aos Materiais de Construção Civil
Dr. Antonio Domingues de Figueiredo e Dr^a. Renata Monte

KURPINSKA M. Możliwości wykorzystania betonu. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Gdańsk, 2013.

MAININI, A. G. et al. Spectral Light Transmission Measure and Radiance Model Validation of an innovative Transparent Concrete Panel for Façades. **Energy Procedia**, v. 30, p. 1184–1194, 2012.

MOSALAM, K. M.; CASQUERO-MODREGO, N. Sunlight Permeability of Translucent Concrete Panels as a Building Envelope. **Journal of Architectural Engineering**, v. 24, n. 3, p. 04018015, set. 2018.

SANTOS, S. Sistema Avançado de Iluminação Natural: Estudo Comparativo de Vidros Prismáticos, Laser-cut Panels e Channel Panels. Lisboa, 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009.

SCARTEZZINI, J.; COURRET, G. ANIDOLIC DAYLIGHTING SYSTEM, SOLAR ENERGY, v.73, n.2, p. 123-135, 2002.