

Análise comparativa entre espectrômetro portátil e espectrofotômetro com esfera integradora para medição da refletância solar de telhas

Comparative analysis between portable spectrometer and integrating sphere spectrophotometer for measuring solar reflectance of tiles

Lorena Santos Bezerra Couto 
Kelen Dornelles 

Resumo

Conhecer as propriedades termofísicas das superfícies do envelope construtivo, como a refletância solar, é primordial para a adoção de estratégias passivas de melhoria do desempenho térmico das edificações. Contudo, ainda é escassa a divulgação desses dados por fabricantes de revestimentos nacionais, devido à dificuldade de acesso aos equipamentos e necessidade de técnicos especializados para seu manuseio. Buscando auxiliar o acesso a esses dados, este trabalho apresenta a avaliação do espectrômetro portátil ALTA II como alternativa aos métodos normatizados de medição da refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento. Para isso, foram comparados os valores de refletância solar obtidos a partir de um espectrofotômetro com esfera integradora e aqueles medidos com o ALTA II para 39 telhas. Análises de desempenho do ALTA II a partir de variações no método de medição (com e sem aparato escuro em ambiente interno e sem aparato em ambiente externo) foram inconclusivos para determinar a influência da ausência de um aparato para a medição nas amostras selecionadas. Apesar da incerteza observada, os resultados demonstraram forte correlação entre os dados medidos no ALTA II com aparato e com o espectrofotômetro, indicando o espectrômetro como uma alternativa para a medição de refletância solar das amostras.

Palavras-chave: Refletância solar. Telha. Método de medição. Espectrômetro.

Abstract

Knowing the thermal properties of the surfaces of building envelope, such as the solar reflectance, is essential for the use of passive strategies to improve thermal performance of buildings. However, there is a lack of data for coatings produced in Brazil, because of the low availability of equipment and the need of specialized technicians. In order to simplify the access to these data, this work proposes the portable spectrometer ALTA II as an alternative to standardized measurement methods for solar reflectance of ceramic and fiber cement tiles. Therefore, solar reflectance data measured with a spectrophotometer with an integrating sphere were compared with those measured with the ALTA II for 39 tiles. Performance analyses of ALTA II from variations in the measurement method (with and without dark apparatus indoors and without apparatus outdoors) were inconclusive in determining the influence of the absence of a dark apparatus for the measurement on the selected samples. Despite the observed uncertainty, the research results showed strong correlation between the data measured on the ALTA II with the apparatus and with the spectrophotometer, indicating the spectrometer as an alternative for the solar reflectance measurement of these samples.

¹Lorena Santos Bezerra Couto

¹Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

²Kelen Dornelles

²Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 03/08/22

Aceito em 28/10/22

Keywords: Solar reflectance. Tile. Measurement method. Spectrometer.

Introdução

Estudos a respeito das relações entre o desempenho térmico e energético das edificações, assim como o conforto delas, e a refletância solar de suas envoltórias tiveram início nos anos 1990 com pesquisas do *Lawrence Berkeley National Laboratory*, realizadas pelos pesquisadores Taha, Sailor e Municipal (1997), os quais apresentam métodos de medição dessa propriedade para as superfícies opacas, em busca da construção de uma biblioteca de dados.

As investigações realizadas pelos pesquisadores desse laboratório, localizado na Califórnia – EUA, já apontavam o grande impacto da refletância solar das superfícies do envelope construtivo na quantidade de calor que chega ao interior das edificações, e também no consumo de energia para resfriamento dos edifícios (AKBARI *et al.*, 1997). Nesse sentido, os materiais que compõem a envoltória são de grande importância para o desempenho térmico das edificações (SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011).

Entre as superfícies que compõem a envoltória da edificação, a cobertura tem função importante em seu ganho térmico, principalmente em edificações térreas e de poucos pavimentos. Isso porque, na maior parte do dia, a incidência da radiação solar é direta sobre sua superfície, diferente do que ocorre com as fachadas onde a incidência dependerá da posição do Sol ao longo do dia e do ano. Esse fenômeno é preponderante para latitudes menores, mais próximas da linha do Equador. Pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas em diversos países comprovam essa relação, como aquelas apresentadas por Dornelles (2008), Gilbert, Mandel e Levinson (2016), Parker e Barkaszi Junior (1997), Pomerantz (2017), Prado e Ferreira (2005) e Synnefa, Santamouris e Akbari (2007), que estudaram as relações entre a refletância solar das superfícies da envoltória da edificação e da pavimentação urbana com o desempenho termoenergético de edificações e a temperatura das cidades.

As pesquisas a respeito da refletância solar a relacionam, não somente com os efeitos imediatos em cada edificação, mas também com os impactos climáticos negativos nas cidades, como as ilhas de calor urbanas, consequência do rápido adensamento urbano que leva à redução da paisagem natural, substituída por superfícies menos reflexivas diretamente responsáveis pelo aumento da temperatura das superfícies e do ar em áreas urbanas (SANTAMOURIS; KOLOKOTSA, 2015). Dentre as estratégias para mitigação dos efeitos negativos das ilhas de calor urbanas, recomenda-se o emprego de materiais com alta refletância solar, tanto no envelope construtivo quanto na pavimentação urbana (SYNNEFA; SANTAMOURIS; LIVADA, 2005).

De forma geral, para edificações residenciais as coberturas são responsáveis por 70% do calor transmitido para seu interior (VIJAYKUMAR; SRINIVASAN; DHANDAPANI, 2007). Isso posto, Pisello *et al.* (2016) e Miller (2005) apresentam que telhas cerâmicas com alta refletância solar (75%) podem garantir redução no consumo de energia para refrigeração de até 51%, quando comparadas às telhas de mesma aparência, porém com menor refletância solar.

Percebe-se, assim, a importância da utilização de materiais com alta refletância solar para essa superfície da edificação. Para isso, torna-se primordial o conhecimento da refletância solar dos materiais disponíveis no mercado nacional para coberturas de edifícios.

Apesar de diversas pesquisas (GAO *et al.*, 2017; GILBERT *et al.*, 2017; PISELLO *et al.*, 2015), já terem sido realizadas mundialmente a respeito da refletância solar de materiais utilizados na construção civil, no Brasil os dados de refletância solar são pouco medidos, consequentemente pouco difundidos. A grande maioria dos trabalhos referentes aos materiais utilizados na construção civil nacional consideram a refletância solar estabelecida em normas com valores genéricos, se considerada a pluralidade de materiais disponíveis. Portanto, há uma deficiência de valores medidos de refletância solar de superfícies de coberturas empregadas nas edificações brasileiras. Dentre os materiais de divulgação existentes, é importante citar a Biblioteca de Absortância de Telhas (DORNELLES, 2021), na qual são apresentados valores de absortância solar para diferentes tipos de telhas amplamente utilizadas no mercado brasileiro, fruto de algumas pesquisas realizadas recentemente (COUTO, 2019; ARAUJO, 2022; ARAUJO; DORNELLES, 2022). Salientam-se ainda os trabalhos realizados por Bonin e Pezzuto (2013), Muniz e Pezzuto (2014) e Louzich *et al.* (2016) como pesquisas que abordam a refletância solar de telhas cerâmicas.

A dificuldade de medição da refletância solar dos revestimentos disponíveis para a composição da envoltória construtiva se dá, principalmente, a fatores como o alto custo dos equipamentos normatizados e a dificuldade de acesso a eles. Atualmente, os métodos de medição normatizados internacionalmente consideram o uso do espectrofotômetro com esfera integradora a partir da E903 (AMERICAN..., 2020a), o piranômetro segundo a E1918 (AMERICAN..., 2021) e o refletômetro portátil conforme método apresentado na C1549 (AMERICAN..., 2016). Além do alto custo, o manuseio desses equipamentos exige profissional qualificado, o que dificulta o acesso a dados medidos por profissionais da construção civil, mas principalmente por pesquisadores da área.

Considerando a importância de conhecer a refletância solar dos materiais que compõem a envoltória das edificações, Dornelles e Roriz (2007) estudam métodos alternativos de medição dessa propriedade, utilizando o espectrômetro portátil ALTA II, e os parâmetros cromáticos digitais das amostras, obtidos através de scanner comum.

No Brasil, o ALTA II tem sido utilizado com frequência por pesquisadores e pela comunidade acadêmica, pois, além de possuir baixo custo em relação aos equipamentos atualmente normatizados e ser portátil, estudos realizados com esse espectrômetro avaliam sua confiabilidade para superfícies opacas. Contudo, as pesquisas que avaliam o uso desse equipamento para medição de refletância solar foram realizadas, em sua maioria, em superfícies revestidas com tintas, havendo pouca análise de possíveis variações na medição de refletância solar de telhas. Assim, esse estudo se faz importante considerando as especificidades das superfícies das telhas, principalmente cerâmicas, que apresentam diferenças em níveis de brilho, rugosidade, acabamento e materialidade quando comparadas às películas de tintas, para as quais o equipamento já foi avaliado (PEREIRA *et al.*, 2015).

Nesse contexto, salientando-se a importância de enriquecer as investigações a respeito do equipamento já utilizado no cenário acadêmico nacional e contribuir com a elucidação de dúvidas a respeito do desempenho do ALTA II para as diferentes superfícies presentes na construção civil, esta pesquisa apresenta a análise do espectrômetro ALTA II na medição de refletância solar de telhas, como alternativa aos métodos atualmente normatizados.

Espectrômetro ALTA II

Desenvolvido pelo *Lunar and Planetary Institute* localizado em Houston – Texas, nos Estados Unidos, o ALTA II (Figura 1) é um espectrômetro portátil que mede refletâncias de onze comprimentos de onda do espectro solar, sendo eles 470 nm, 525 nm, 560 nm, 585 nm, 600 nm, 645 nm, 700 nm, 735 nm, 810 nm, 880 nm e 940 nm. Os sete primeiros comprimentos de onda são referentes à região do espectro visível, e os últimos quatro relativos à região do infravermelho próximo.

Na parte posterior do equipamento, onde as amostras que serão medidas devem ser posicionadas, existe uma abertura com onze pequenas lâmpadas de LED referente a cada comprimento de onda medido pelo equipamento (Figura 1). Ao pressionar cada um dos botões as lâmpadas são acionadas e emitem certa quantidade de energia. Nesse mesmo local há um sensor que capta o quanto a superfície refletiu dessa energia emitida.

No ano de 2020 o instituto que produz o espectrômetro ALTA II, *Lunar and Planetary Institute* (LPI), lançou uma nota informando a descontinuidade do equipamento, porém seu uso entre os pesquisadores brasileiros já é difundido para a medição de refletância de tintas. Desse modo, ressalta-se a importância de que esse equipamento também seja avaliado para a medição de refletância solar de telhas, visto que é uma alternativa já adotada pela academia brasileira reforçando-se, portanto, seu uso e a confiabilidade de seus dados.

No Brasil, estudo realizado pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) concluiu que os dados encontrados a partir de medições com esse equipamento se aproximam dos obtidos com o espectrofotômetro com esfera integradora. Os resultados indicaram diferenças máximas de 2,8% absoluto, considerando os comprimentos de onda medidos pelo ALTA II, e 10,12% considerando de 300 a 2.500 nm, para refletâncias variando de 0 a 100% (PEREIRA *et al.*, 2015). Essa pesquisa, no entanto, o avaliou para a medição de refletância de tintas de um pequeno grupo de amostras, que apesar de contar com investigações aprofundadas sobre seu uso, não considera outras superfícies com suas particularidades, como os diferentes acabamentos presentes em telhas, que variam entre si e também se comparadas às tintas.

Figura 1 - ALTA II (à esquerda) e visão posterior do equipamento (à direita)



O amplo uso do ALTA II nas pesquisas a respeito da envoltória da edificação pode ser observado no Quadro 1, o que reforça a necessidade de confirmar sua confiabilidade para a medição da refletância solar de telhas e materiais para a cobertura das edificações.

Quadro 1 - Publicações onde o ALTA II foi utilizado para medição de refletância solar (Continua...)

Autores	Título	Amostras	Ano
Almeida <i>et al.</i> (2013)	Avaliação da envoltória de habitações de interesse social de Florianópolis de acordo com o método prescritivo do RTQ-R.	Fachadas de edificações	2013
Araújo e Dornelles (2019)	Refletância solar e o desempenho térmico de telhas expostas ao tempo.	Telhas cerâmicas e de concreto	2019
Baumbach <i>et al.</i> (2019)	Portland versus alkali-activated cement wall panels containing mine tailing as aggregate: one-story house thermal performance simulation in a Brazilian and Portuguese hot and humid climate.	Materiais cimentícios	2019
Bonin e Pezzuto (2013)	Medição de refletância e análise de sua influência nos materiais de cobertura.	Telhas cerâmicas	2013
Cordeiro <i>et al.</i> (2020)	Caracterização termofísica de solo laterítico para produção de taipa.	Amostra de solo para confecção de taipa	2020
Couto (2019)	ALTA II: uma alternativa aos métodos de medição de refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento.	Telhas cerâmicas e de fibrocimento	2019
Couto, Abile e Dornelles (2017)	Potencial de uso de espectrômetro portátil para determinação da refletância solar de telhas cerâmicas para cobertura de edifícios.	Telhas cerâmicas e de fibrocimento	2017
Dornelles (2008)	Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA.	Tintas	2008
Dornelles e Roriz (2006b)	Identificação da absortância solar de superfícies opacas por meio de espectrômetro de baixo custo.	Tintas	2006
Dornelles e Roriz (2006a)	A method to identify the solar absorbance of opaque surfaces with a low-cost spectrometer.	Tintas	2006
Dornelle e Roriz (2007)	Métodos alternativos para identificar a absortância solar de superfícies opacas.	Tintas	2007
Duarte <i>et al.</i> (2018)	Modelo termoenergético calibrado do restaurante estudantil do CEFETMG campus II.	Revestimento cerâmico para fachada e cobertura metálica	2018
Duarte, Lima e Oliveira (2019)	Estudo do desempenho energético e de estratégias para a geração de conforto térmico em refeitório estudantil.	Fachadas e cobertura	2019
Gomes <i>et al.</i> (2022)	Thermal characterization of soil-cement bricks using mining tailings.	Solo-cimento	2020
Kowalski <i>et al.</i> (2020)	Implicações da morfologia urbana na temperatura superficial de pavimentos.	Pavimentação urbana	2020
Kowalski, Fernandes e Masiero (2019)	Influência do teor de umidade na absortância de pavimentos intertravados de concreto.	Pavimentação urbana	2019
Lamberts, Ghisi e Ramos (2006)	Impactos da adequação climática sobre a eficiência energética e o conforto térmico de edifícios de escritórios no Brasil.	Fachadas de edifícios	2006
Louzich <i>et al.</i> (2016)	Refletância de telhas cerâmicas novas e degradadas pela ação do intemperismo.	Telhas cerâmicas	2016
Marinoski <i>et al.</i> (2013)	Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório.	Revestimento cerâmico para fachada	2013
Morais <i>et al.</i> (2021)	Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings.	Materiais cimentícios	2021
Muniz e Pezzuto (2014)	Medições de refletância através do espectrômetro portátil ALTA II.	Telhas cerâmicas e de concreto	2014
Muniz-Gaal <i>et al.</i> (2018)	Eficiência térmica de materiais de cobertura.	Telhas cerâmicas e de concreto	2018
Ordenes e Garcia (2012)	Verificação da absortância em superfícies opacas não homogêneas utilizando um espectrômetro.	Material cerâmico para fachada	2012

Quadro 1 - Publicações onde o ALTA II foi utilizado para medição de refletância solar (continuação)

Autores	Título	Amostras	Ano
Pereira <i>et al.</i> (2017)	Avaliação experimental do espectrômetro ALTA II e sua aplicação na normatização brasileira.	Tintas	2017
Pereira <i>et al.</i> (2015)	Relatório de avaliação do espectrômetro portátil ALTA II.	Tintas	2015
Pereira <i>et al.</i> (2021)	Utilização do espectrômetro ALTA II para obtenção da absorvância solar de superfícies opacas.	Tintas, porcelanato e argamassa	2021
Poloni e Pezzuto (2020)	Influência da temperatura superficial em materiais de superfícies verticais.	Pavimentação urbana	2020
Poloni e Pezzuto (2015)	Medidas de refletância de materiais de superfície urbana utilizando o espectrômetro portátil ALTA II	Pavimentação urbana	2015
Rodrigues e Pezzuto (2013)	Avaliação da temperatura superficial de materiais de superfície urbana.	Materiais cimentícios	2013
Ramos <i>et al.</i> (2018)	Estudo comparativo entre cimento Portland e materiais álcali-ativados na construção de painéis de vedação.	Materiais cimentícios	2018
Rundquist e Vandeberg (2013)	Fully engaging students in the remote sensing process through field experience	Revestimentos urbanos	2013
Sá e Oliveira (2019)	Análise de medidas aplicáveis à edificação pública escolar para obtenção da classificação A na etiqueta nacional de conservação de energia.	Fachadas e cobertura	2019
Sangoi, Ramos e Lamberts (2010)	Análise das medições de absorvância através do espectrômetro ALTA II.	Revestimento cerâmico para fachada, tintas e telhas metálicas	2010
Santos (2013)	Comparação de métodos para medição de absorvância solar em elementos opacos.	Tintas	2013
Santos <i>et al.</i> (2011)	Influência da rugosidade superficial sobre os valores da absorvância solar determinados com o espectrômetro portátil ALTA II.	Tintas	2011
Schaefer <i>et al.</i> (2014)	Influência da absorvância solar no desempenho térmico de habitações populares.	Fachadas de edifícios	2014
Schabbach <i>et al.</i> (2018)	Pigmented glazed ceramic roof tiles in Brazil: thermal and optical properties related to solar reflectance index.	Telhas cerâmicas	2018
Vieira <i>et al.</i> (2019)	Estudo de classificação da eficiência energética do prédio 20 do CEFET-MG.	Fachadas de edifícios	2019
Vieira, Silva e Japiassú (2019)	Avaliação de desempenho energético de uma edificação histórica em Goiânia.	Fachadas de edifícios	2019

A partir do levantamento apresentado no Quadro 1, percebe-se que, apesar de haver diversos trabalhos já publicados utilizando o ALTA II, do total de 38 observados, 15 têm o intuito de descrever os procedimentos para que sejam realizadas medições com o ALTA, ou ainda avaliar a eficiência ou desempenho desse espectrômetro como alternativa para a medição de refletância solar de superfícies – salientados no quadro com a cor azul. Desses 15 trabalhos, somente 4 apresentam o uso do equipamento para telhas ou materiais de coberturas, sendo que as telhas cerâmicas aparecem em somente 3 dessas pesquisas, e as de fibrocimento apenas em 2.

A maioria das análises do ALTA II foi realizada utilizando como amostras superfícies com tintas utilizadas na construção civil, o que reforça a necessidade de avaliar o desempenho do espectrômetro para a medição de refletância de telhas, considerando-se as especificidades de cada superfície e tipo de material.

Para as demais pesquisas levantadas (23 do total de 38), o ALTA II é utilizado como método de medição de refletância, sem haver testes prévios ou comparações com métodos de medição normatizados. Dessas pesquisas, 8 avaliam desempenho ou características termofísicas de superfícies de telhas ou materiais para cobertura. Portanto, pode-se notar que o equipamento é utilizado no meio acadêmico nacional para medição de refletância desses materiais, todavia, com poucos estudos sobre seu desempenho nesse tipo de superfície.

Método

A partir de uma metodologia experimental, esta pesquisa utilizou 39 telhas divididas em grupos a partir da matéria-prima e do acabamento superficial (Quadro 2), sendo 10 (dez) telhas cerâmicas com acabamento esmaltado (TCE), 10 (dez) telhas cerâmicas com acabamento resinado (TCR), 11 (onze) telhas cerâmicas com acabamento natural (TCN) e 8 (oito) telhas de fibrocimento (TFC). Dentre as últimas, 2 possuem revestimento

frio branco – com altos valores de emitância térmica e refletância solar. Para as medições em laboratório, foram cortadas amostras de menores dimensões de cada telha com o auxílio de uma furadeira com serra-copo acoplada, e ainda uma serra circular, para que as amostras apresentassem dimensões máximas aproximadas de 10 cm de lado, e não menores que 5 cm de lado ou diâmetro.

Quadro 2 - Relação das telhas, modelos e acabamentos

Imagem	Código	Modelo	Acabamento	Imagem	Código	Modelo	Acabamento
	TCN01	Americana	Natural		TCR01	Romana	Resinada
	TCN02	Italiana	Natural		TCR02	Portuguesa	Resinada
	TCN03	Romana	Natural		TCR03	Americana	Resinada
	TCN04	Portuguesa	Natural		TCR04	Italiana	Resinada
	TCN05	Romana	Natural		TCR05	Romana	Resinada
	TCN06	Portuguesa	Natural		TCR06	Portuguesa	Resinada
	TCN07	Americana	Natural		TCR07	Francesa	Resinada
	TCN08	Italiana	Natural		TCR08	Cumeeira	Resinada
	TCN09	Francesa	Natural		TCR09	Cumeeira	Resinada
	TCN10	Cumeeira	Natural		TCR10	Paulistinha	Resinada
	TCN11	Paulistinha	Natural		TCE01	Americana	Esmaltada
	TFC01	Fibrocimento	Natural		TCE02	Americana	Esmaltada
	TFC02	Fibrocimento	Natural		TCE03	Americana	Esmaltada
	TFC03	Fibrocimento	Natural		TCE04	Americana	Esmaltada
	TFC05	Fibrocimento	Natural		TCE05	Americana	Esmaltada
	TFC06	Fibrocimento	Refletivo		TCE06	Americana	Esmaltada
	TFC07	Fibrocimento	Refletivo		TCE07	Americana	Esmaltada
	TFC08	Fibrocimento	Natural		TCE08	Americana	Esmaltada
					TCE09	Americana	Esmaltada

As amostras foram ensaiadas no espectrofotômetro com esfera integradora marca Varian, modelo CARY 5G, do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica da Universidade Federal de São Carlos, a fim de obter os valores de refletância solar de cada telha, a partir da refletância espectral por comprimento de onda, medida em intervalos de 1 nanômetro, no intervalo entre 300 e 2.500 nm. Essa medição seguiu o especificado pela norma E903 (AMERICAN..., 2020a) e, posteriormente, os dados coletados foram ajustados ao espectro solar segundo a norma G173 (AMERICAN..., 2020b), obtendo-se assim o valor da refletância solar de cada telha. Esses valores foram utilizados como referência para comparação e análise dos dados obtidos com o método avaliado neste artigo, utilizando o espectrômetro ALTA II.

A segunda medição de refletância solar foi realizada com o equipamento espectrômetro portátil ALTA II, que considera 11 comprimentos de onda (470, 525, 560, 585, 600, 645, 700, 735, 810, 880 e 940 nm), de acordo com o proposto pelo laboratório de sua fabricação (TREIMAN, 2000) e com o método proposto por Pereira *et al.* (2015). Por fim, o mesmo procedimento de cálculo a partir da norma G173 (AMERICAN..., 2020b) foi realizado, para chegar ao valor de refletância solar ajustada ao espectro solar padrão.

Conforme o método adotado para essas medições, foi inicialmente utilizado um aparato escuro (tecido preto opaco dobrado em quatro camadas com abertura somente para encaixe do equipamento, conforme apresentado na Figura 2), de forma a observar a influência da iluminação no local de medição sobre os resultados de refletância.

De posse da voltagem de fundo de cada comprimento de onda, calcula-se a refletância solar das amostras a partir da Equação 1, conforme apresentado por Pereira *et al.* (2017).

$$\rho_{\lambda,amostra} = \left(\frac{V_{\lambda,amostra} - V_{f,amostra}}{V_{\lambda,ref} - V_{f,ref}} \right) \times \rho_{\lambda,ref} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

$\rho_{\lambda,amostra}$: refletância da amostra, para um determinado comprimento de onda λ (%);

$V_{\lambda,amostra}$: voltagem da amostra, medida no comprimento de onda λ (mV);

$V_{f,amostra}$: voltagem de fundo da amostra (mV);

$V_{\lambda,ref}$: voltagem da amostra de referência medida no comprimento de onda λ (mV);

$V_{f,ref}$: voltagem de fundo da amostra de referência (mV); e

$\rho_{\lambda,ref}$: refletância da amostra de referência (já conhecida), no comprimento de onda λ (%).

Posteriormente à obtenção da refletância para cada comprimento de onda medido pelo ALTA II, um ajuste é realizado para o espectro solar padrão. Conforme apresentado por Pereira *et al.* (2017) e seguindo as orientações da norma G173 (AMERICAN..., 2020b), a refletância solar ajustada ao espectro solar padrão é calculada dividindo a soma das intensidades de irradiação refletida, pela soma das intensidades de irradiação solar global, como apresentado na Equação 2.

$$\rho_{solar} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\lambda i} \times E_{\lambda i} \times \Delta \lambda_i}{\sum_{i=1}^n E_{\lambda i} \times \Delta \lambda_i} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo:

ρ_{solar} : refletância solar (%);

$\rho_{\lambda i}$: refletância espectral no comprimento e onda λ_i (%);

$E_{\lambda i}$: irradiação solar global espectral (W/m².nm); e

λ_i : comprimento de onda (nm).

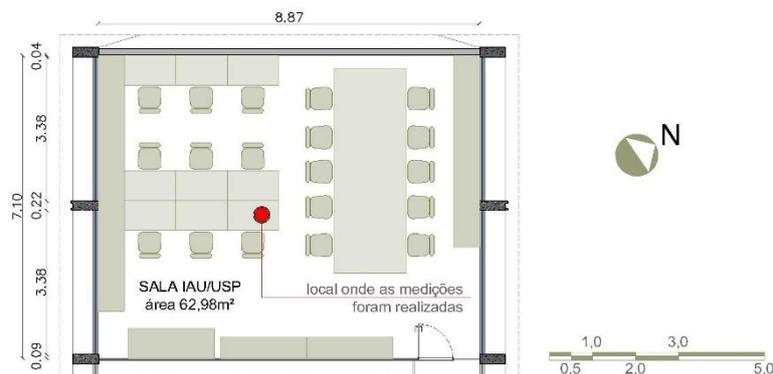
Para o espectrômetro portátil, foram considerados somente para os 11 (onze) comprimentos de onda medidos pelo equipamento.

As medições com o ALTA II foram realizadas em uma sala de estudos do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU/USP), na cidade de São Carlos, em um dia de céu claro, quando a iluminação natural atinge toda a sala. A medição se deu aproximadamente no centro do ambiente, que possui janelas de vidro amplas em duas paredes, conforme o esquema observado na Figura 3. Salienta-se que as janelas permaneceram abertas e sem a utilização de cortinas durante a realização desses ensaios; contudo, os raios solares não atingiram diretamente o equipamento, visto que no horário em que a medição foi realizada (aproximadamente às 12h), não há radiação solar direta no interior da sala. Nesse local, foram realizadas medições com o aparato escuro previamente descrito, e também sem esse aparato, buscando observar o impacto da luminosidade do ambiente no resultado final medido.

Figura 2 - Aparato escuro (esquerda), ALTA II com aparato escuro (direita)



Figura 3 - Planta esquemática da sala onde a medição em ambiente interno foi realizada



Além das medições de refletância com o ALTA em ambiente interno, foram selecionadas amostras de cada um dos tipos de acabamento estudados e repetido todo o procedimento para obtenção da refletância solar com o espectrômetro, em um ambiente externo. A seleção dessas amostras foi feita a partir de uma análise observacional delas, sendo escolhidas aquelas com maior uniformidade de cor e acabamento, buscando com isso minimizar os impactos das características da superfície, focando na avaliação da necessidade ou não do uso do aparato escuro para medição da refletância solar de cada telha. Os dados para o ambiente externo foram medidos sem o aparato, em um dia de céu claro e sem nuvens, em local aberto e sem interferência de sombras sobre o equipamento (a radiação solar incidiu diretamente sobre ele), seguindo o mesmo procedimento realizado em ambiente interno, sendo a única diferença que as medições externas foram realizadas somente sem a utilização do aparato escuro (Figura 4).

Pereira *et al.* (2015), em seu relatório de avaliação do ALTA II, apresenta uma análise de repetibilidade, em que foram realizadas cinco medições para cada amostra, e a partir das voltagens obtidas foi calculada uma média que por fim foi utilizada para cálculo da refletância solar, além de ter sido realizado um cálculo de desvio padrão entre os valores obtidos. Para este trabalho, procedimento semelhante foi realizado, contudo para cada uma das situações em que os ensaios foram realizados, foram feitas três medições de cada amostra. Os valores obtidos na leitura de voltagem das três medições apresentaram baixa ou nenhuma variação, e foi adotada uma média entre esses três valores para o cálculo da refletância solar de cada telha.

De posse dos dados coletados, eles foram analisados a partir de correlações lineares calculadas com o auxílio do software Origin Pro versão 9.0, que apresentou as relações entre os valores obtidos para refletância solar com cada método. Ainda nessa etapa, foram geradas equações a partir de regressão linear, considerando-se os valores medidos no espectrofotômetro como variável X independente, e os medidos pelo ALTA II como variável dependente. Essas equações permitem a estimativa mais aproximada da refletância solar das telhas a partir de medições com o espectrômetro ALTA II, considerando-se as refletâncias que foram medidas em espectrofotômetro segundo o método da E903 (AMERICAN..., 2020a).

Figura 4 - Imagem do céu no dia da medição externa com o ALTA II



Resultados e discussões

Medição de refletância solar com espectrofotômetro com esfera integradora

Os resultados das medições de refletância das amostras analisadas são apresentados nas Figuras 5 e 6, nas quais se observam as curvas de refletância espectral para todas as telhas analisadas neste estudo. Esses dados permitem a compreensão do comportamento das telhas quanto à reflexão da radiação solar ao longo de todo o espectro solar (300 a 2.500 nm). Os valores de refletância solar obtidos para cada telha são apresentados na Tabela 1, para posterior análise comparativa entre os valores obtidos com cada método de medição.

Observando-se a Figura 5, percebe-se que existe uma grande variação entre os valores medidos para alguns grupos de telhas, como por exemplo para as telhas de fibrocimento e cerâmicas esmaltadas. Isso se dá devido ao fato de que as telhas esmaltadas possuem cores distintas, o que interfere diretamente na quantidade de radiação que refletem na região do espectro referente à luz visível. Além disso, a partir dos dados apresentados na Tabela 1, percebe-se que entre esse grupo de telhas cerâmicas (esmaltadas), as de cores mais claras apresentaram valores mais altos de refletância (TCE01 – $\rho=0,74$), e aquelas com cores mais escuras tiveram valores menores de refletância (TCE09 – $\rho=0,20$).

Para os grupos de telhas cerâmicas naturais e resinadas, percebe-se que em média os valores são bastante semelhantes (refletância variando entre 0,46 e 0,53), supõe-se que as diferenças no acabamento das superfícies quanto à sua rugosidade influenciaram no valor de refletância solar, considerando que esse fator foi analisado apenas de forma observacional. Observou-se que as telhas com maior refletância solar foram aquelas com acabamento mais uniforme e menos rugosas (TCN03 – $\rho=0,48$, TCR06 – $\rho=0,40$) e as menos refletoras aquelas com maior rugosidade superficial (TCN08 – $\rho=0,54$, TCR07 e TCR08 – $\rho=0,50$). A análise da rugosidade foi realizada de forma observacional, a partir da comparação do acabamento da superfície entre as amostras analisadas. Mesmo assim, foi possível identificar a influência da rugosidade, o que já foi comprovado por estudos anteriores apresentados por Dornelles (2008) e Roriz (2011).

Já para as telhas de fibrocimento, as telhas com acabamento refletivo (frio) foram aquelas com maiores valores de refletância solar (TFC06 – $\rho=0,76$, TFC07 – $\rho=0,96$), enquanto as demais mantiveram valores semelhantes, sendo a TFC04 ($\rho=0,41$) a menos refletiva. Todos esses dados numéricos são apresentados na Tabela 1.

É importante ressaltar, ainda sobre os valores medidos no espectrofotômetro, que os valores médios obtidos para as telhas cerâmicas diferem muito dos valores apresentados para esse tipo de material na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Na norma, o valor apresentado para absorvância solar de telhas cerâmicas é entre 0,75 e 0,80 (e refletância entre 0,25 e 0,20). Se for calculada a média entre as 21 telhas cerâmicas (resinadas e naturais) avaliadas nesta pesquisa, o valor de refletância solar encontrado é 0,49. Já se for calculada a média separada apenas para as telhas cerâmicas naturais, o valor é 0,52, e para as telhas cerâmicas resinadas é 0,47. Isso mostra a necessidade de que os valores de refletância e absorvância solar apresentados aos pesquisadores e profissionais sejam revisados.

Medição de refletância solar com ALTA II

Os valores de refletância solar medidos pelo ALTA II a partir das medições em ambiente interno, com e sem o uso do aparato escuro, já ajustados ao espectro solar padrão (AMERICAN..., 2020b) são apresentados na Tabela 1 em conjunto com os valores obtidos na medição com o espectrofotômetro com esfera integradora.

Inicialmente, fez-se a análise da influência do uso do aparato escuro e do ambiente de medição (interno ou externo) sobre os valores de refletância solar medidos com o espectrômetro ALTA II. Para as medições realizadas com o ALTA II em ambiente interno com e sem o aparato escuro, verificou-se que os valores são

próximos e em alguns casos iguais (Tabela 1), contudo não há um padrão entre o comportamento do equipamento com relação à presença ou não do aparato escuro, com variações em que a refletância sem ele pode ser maior ou menor ao valor medido com o aparato. A mesma tabela apresenta ainda a diferença entre as medições com o ALTA II sem o tecido escuro em comparação aos valores medidos com o espectrofotômetro, em que a maior diferença encontrada, para valores absolutos, foi para a telha cerâmica natural 11 (TCN11), com refletância 0,15 superior em valor absoluto.

Percebeu-se que para as telhas de fibrocimento o uso do aparato escuro foi dispensável, já que na comparação dos dados medidos com e sem o aparato escuro, com aqueles medidos pelo espectrofotômetro, apenas a telha TFC07 não apresentou valores iguais. Já para as telhas cerâmicas, as variações são mais presentes, pois apenas oito telhas apresentaram o mesmo valor na medição. Entre aquelas com diferenças entre as relações com os dados coletados, a maior distinção está para a medição da telha TCN11, que com o aparato apresentou diferença de 0,11 absoluto, em relação aos dados do espectrofotômetro, enquanto sem o aparato a diferença absoluta é de 0,14, ou seja, 0,03 de diferença absoluta entre ambas.

Figura 5 - Curvas de refletância espectral para todos os grupos de telhas

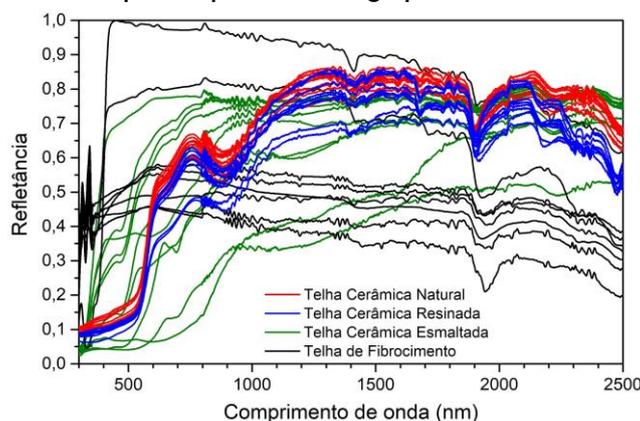


Figura 6 - Gráficos com curvas de refletância medidas no espectrofotômetro para telhas cerâmicas naturais (a), telhas cerâmicas resinadas (b), telhas cerâmicas esmaltadas (c) e telhas de fibrocimento (d)

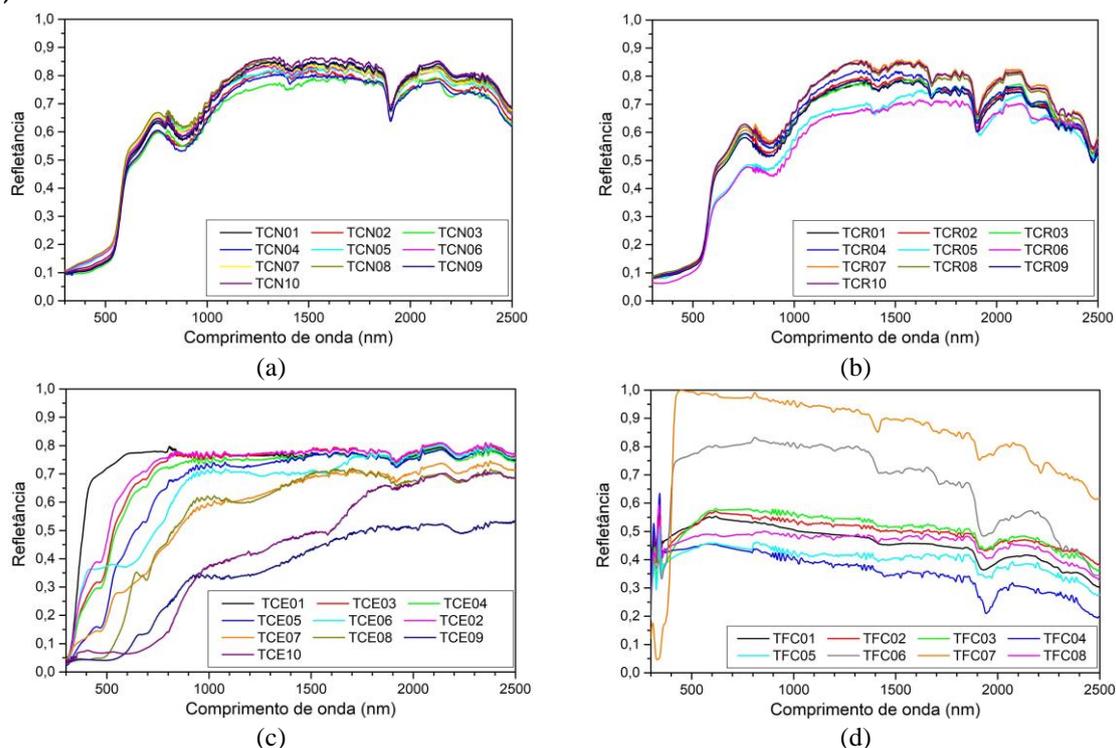


Tabela 1 - Valores de refletância solar medidos com o espectrofotômetro (ρ_{Espect}), com o ALTA II com aparato escuro (ρ_{Acom}) e com o ALTA II sem o aparato escuro (ρ_{Asem}), e relações entre os valores medidos

Telha	ρ_{Espect}	ρ_{Acom}	ρ_{Asem}	Diferença absoluta	
				$\rho_{\text{Espect}} \times \rho_{\text{Acom}}$	$\rho_{\text{Espect}} \times \rho_{\text{Asem}}$
TCN01	0,51	0,43	0,43	0,08	0,08
TCN02	0,49	0,39	0,40	0,10	0,09
TCN03	0,48	0,40	0,40	0,08	0,08
TCN04	0,48	0,40	0,40	0,08	0,08
TCN05	0,52	0,43	0,46	0,09	0,06
TCN06	0,53	0,45	0,46	0,08	0,07
TCN07	0,53	0,51	0,47	0,02	0,06
TCN08	0,54	0,47	0,46	0,07	0,08
TCN09	0,51	0,43	0,43	0,08	0,08
TCN10	0,51	0,45	0,43	0,06	0,08
TCN11	0,53	0,42	0,38	0,11	0,15
TCR01	0,47	0,40	0,41	0,07	0,06
TCR02	0,47	0,37	0,39	0,10	0,08
TCR03	0,48	0,39	0,39	0,09	0,09
TCR04	0,48	0,39	0,39	0,09	0,09
TCR05	0,41	0,35	0,33	0,06	0,08
TCR06	0,40	0,32	0,33	0,08	0,07
TCR07	0,50	0,38	0,36	0,12	0,14
TCR08	0,50	0,41	0,40	0,09	0,10
TCR09	0,46	0,40	0,42	0,06	0,04
TCR10	0,50	0,42	0,41	0,08	0,09
TCE01	0,74	0,76	0,75	0,02	0,01
TCE02	0,66	0,64	0,64	0,02	0,02
TCE03	0,63	0,64	0,63	0,01	0,00
TCE04	0,61	0,60	0,60	0,01	0,01
TCE05	0,53	0,50	0,48	0,03	0,05
TCE06	0,52	0,47	0,46	0,05	0,06
TCE07	0,52	0,36	0,38	0,16	0,14
TCE08	0,38	0,32	0,31	0,06	0,07
TCE09	0,20	0,16	0,15	0,04	0,05
TCE10	0,21	0,13	0,11	0,08	0,10
TFC02	0,52	0,42	0,42	0,10	0,10
TFC03	0,51	0,47	0,47	0,04	0,04
TFC04	0,41	0,42	0,42	0,01	0,01
TFC05	0,43	0,38	0,38	0,05	0,05
TFC06	0,76	0,69	0,69	0,07	0,07
TFC07	0,96	0,88	0,87	0,08	0,09
TFC08	0,48	0,41	0,41	0,07	0,07

De forma geral, das trinta e nove telhas analisadas, quinze apresentaram valores iguais de medição com e sem o aparato escuro, enquanto dez telhas mostraram que a relação entre os valores medidos sem o aparato escuro e o espectrofotômetro são mais próximas que aquelas medidas com o aparato. Além disso, para quatorze telhas a relação entre os dados medidos com o aparato escuro é mais próxima àqueles medidos no espectrofotômetro. Em relação à análise da influência da luminosidade do ambiente (interno x externo) foram realizadas medições para um pequeno grupo de telhas, utilizando o espectrômetro portátil ALTA II sem o aparato escuro e em um ambiente externo, buscando avaliar a interferência da radiação solar direta nas medições. As amostras foram selecionadas entre aquelas que apresentaram maior uniformidade de suas superfícies dentro de cada um dos grupos de acabamentos avaliados nesta pesquisa – de tal forma que as irregularidades de suas superfícies não interferissem no resultado das medições.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores de refletância solar medidos com o ALTA II com o aparato escuro e em ambiente interno (ρ_{Acom}), o mesmo equipamento sem o aparato escuro em ambiente interno (ρ_{Asem}), e ainda sem o aparato escuro em ambiente externo (ρ_{AEX}), assim como as relações entre os valores medidos. Comparando-se os valores medidos com o ALTA II das diferentes formas como a coleta de dados foi realizada, percebe-se que para os valores das medições em ambiente externo e aqueles obtidos em ambiente interno com o aparato escuro (método sugerido pelas pesquisas já desenvolvidas por Pereira *et al.* (2015, 2017, 2021), a telha cerâmica natural 7 (TCN07) apresenta a maior diferença de refletância solar em valores absolutos (0,06). Considerando-se o percentual de diferença entre os valores medidos em ambiente externo sem o aparato e interno com o aparato, o maior é observado para a TCE10, com 30%.

Comparando-se as medições realizadas tanto em ambiente interno quanto externo, sem o uso do aparato escuro, percebe-se que a telha cerâmica esmaltada 10 (TCE10) é aquela com maior diferença absoluta (0,4) entre os dados medidos.

De forma geral, analisando-se os valores obtidos nas diferentes formas de medição realizadas com o ALTA II, não foi observado um padrão que possibilite afirmar que o aparato escuro possa ser dispensado. Contudo, considerando-se que para 25 amostras os resultados foram iguais entre si (ALTA II com e sem o aparato) ou com maior aproximação aos medidos com o espectrofotômetro, percebe-se a possibilidade de medição com o espectrômetro portátil sem a presença deste aparato especificamente para o ambiente interno, principalmente para telhas de fibrocimento, que apresentaram resultados iguais (com e sem o aparato) para sete das oito telhas analisadas. O mesmo não pode ser afirmado para as medições em ambiente externo, considerando-se a ausência de dados de refletância solar medidos com o ALTA II em ambiente externo com o aparato escuro, e as análises até este ponto apresentadas.

Correlações entre refletâncias: espectrofotômetro X ALTA II (com aparato)

Nos gráficos da Figura 7 são apresentadas comparações entre os valores de refletância solar medidos no espectrofotômetro e no ALTA II com a utilização do aparato escuro (Tabela 1), a fim de observar as relações entre os dados obtidos em cada método de medição.

Analisando-se cada grupo de telhas separadas pela matéria prima e acabamento, observa-se que entre as telhas cerâmicas os valores obtidos são muito aproximados, principalmente para as cerâmicas esmaltadas onde os valores chegam a quase coincidir para algumas amostras, como é o caso das telhas TCE01, TCE02, TCE03 e TCE04.

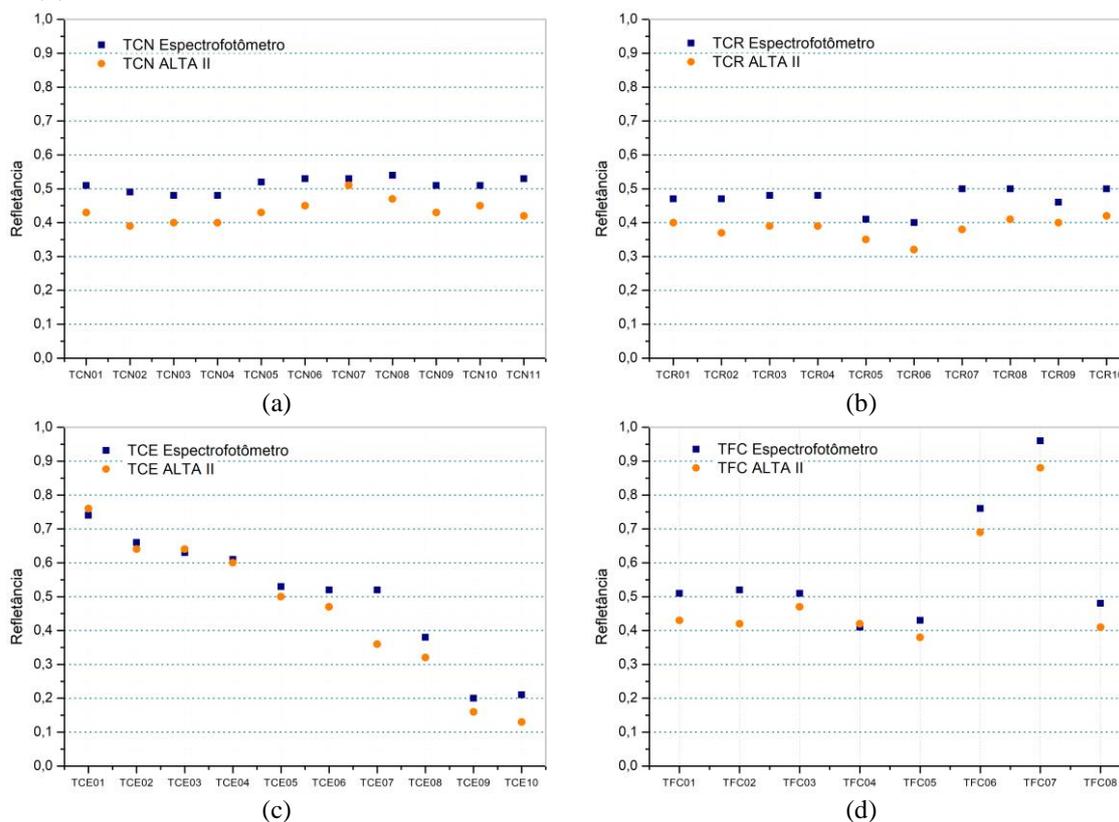
Tanto para as telhas cerâmicas quanto para as de fibrocimento, de uma forma geral, os valores obtidos com o ALTA II e o espectrofotômetro são semelhantes, sendo que das 39 telhas analisadas, apenas 6 (seis) possuem diferenças de refletância maior ou igual a 0,10. Sendo ainda que, para 8 (oito) entre as 10 (dez) telhas cerâmicas esmaltadas as diferenças foram ainda menores ou iguais a 0,05. Observou-se, ainda, que para trinta e oito amostras, os valores de refletância solar obtidos a partir do espectrofotômetro foram maiores que os medidos com o ALTA II, sendo a média entre essas diferenças de 0,07.

Ainda observando a Tabela 1, com relação à diferença entre os valores de refletância solar medidos com o espectrofotômetro e com o ALTA II (com aparato escuro), a telha com maior diferença entre os valores foi a TCE07, com diferença entre as refletâncias de 0,16. Percebe-se, por fim, que as telhas TCE03, TCE04 e TFC04 são aquelas em que as refletâncias medidas com o ALTA e com o espectrofotômetro são mais próximas, sendo a diferença entre os valores de apenas 0,01.

Tabela 2 - Valores de refletância solar medidos com o ALTA II em diferentes condições de medição, e as relações entre os valores

Telha	ρ_{Espect}	ρ_{Acom}	ρ_{Asem}	ρ_{AEX}	Diferença absoluta			
					$\rho_{Espect} X$	$\rho_{Acom} X$	$\rho_{Espect} X$	$\rho_{Acom} X$
					ρ_{Acom}	ρ_{Asem}	ρ_{AEX}	ρ_{AEX}
TCN07	0,53	0,51	0,47	0,45	0,02	0,06	0,13	0,06
TCN08	0,54	0,47	0,46	0,44	0,07	0,08	0,07	0,03
TCR01	0,47	0,40	0,39	0,41	0,07	0,06	0,07	-0,01
TCR07	0,50	0,38	0,39	0,36	0,12	0,14	0,1	0,02
TCE10	0,21	0,13	0,14	0,10	0,08	0,1	0,07	0,03
TFC01	0,51	0,43	0,43	0,43	0,08	0,08	0,06	0
TFC05	0,43	0,38	0,37	0,35	0,05	0,05	0,04	0,03

Figura 7 - Refletância solar das telhas em diferentes métodos de medição: TCN (a), TCR (b), TCE (c), TFC (d)



É importante salientar que a diferença entre a refletância das telhas cerâmicas aqui estudadas está relacionada tanto ao acabamento das superfícies como à sua rugosidade, assim como também às suas cores, que irão interferir principalmente na refletância da faixa visível do espectro. Já para as telhas de fibrocimento refletivas, essa propriedade está também relacionada à composição química do acabamento superficial aplicado nesses produtos, pois são comercializados como materiais frios, com aditivos em suas tintas que os fazem mais refletivos.

Com o objetivo de analisar as relações entre os dados obtidos a partir de cada método de medição aqui apresentado, além de avaliar a possibilidade de uso do espectrômetro portátil ALTA II como método alternativo para a medição da refletância solar de telhas cerâmicas e de fibrocimento, são apresentadas as correlações entre os dados nas Figuras 8 e 9.

Para todas as telhas analisadas, a correlação obtida entre as medições com o ALTA II e o espectrofotômetro foi positiva, o que indica que quando os valores de um dos métodos tendem a aumentar, os valores do outro método analisado também tendem a subir.

Observando-se as correlações apresentadas na Figura 8, percebe-se que para as telhas cerâmicas que possuem as cores convencionais a partir de sua matéria prima – aquelas com acabamento natural e resinado –, os coeficientes de determinação ($R^2_{TCN} = 0,76$, $R^2_{TCR} = 0,85$) são menores que para aquelas com adição de película de tinta ($R^2_{TCE} = 0,96$) – as telhas cerâmicas esmaltadas –, o que sugere que para estas últimas, a refletância solar medida no ALTA II é mais próxima àquela medida com o espectrofotômetro. Percebe-se, ainda, que para as telhas de fibrocimento, o método apresenta os dados mais próximos aos obtidos com o espectrofotômetro, entre todas as amostras estudadas, com valor do coeficiente de determinação ($R^2_{TFC} = 0,98$).

As curvas espectrais apresentadas na Figura 9 sugerem a causa para essa diferenciação entre o desempenho do equipamento para cada tipo de telha. Analisando-se as curvas das telhas cerâmicas naturais e resinadas, percebe-se que aproximadamente até o comprimento de onda de 940 nm (maior comprimento de onda registrado pelo espectrômetro portátil), a curva segue em ascensão, ou seja, com aumento da refletância, e esse comportamento continua de forma significativa até aproximadamente 1.400 nm, momento em que as curvas se tornam mais homogêneas. Entre os comprimentos de onda 2.100 nm e 2.500 nm, aproximadamente, as

curvas para as telhas cerâmicas naturais e esmaltadas se apresentam em queda. Já para as telhas cerâmicas esmaltadas, percebe-se que a maior variação da curva espectral se encontra até a faixa espectral de 940 nm, e aproximadamente a partir desse ponto, a curva aproxima-se de uma linha horizontal, o que indica pequena variação das refletâncias espectrais. Já para as telhas de fibrocimento, percebe-se que as curvas se assemelham a linhas horizontais, com uma inclinação descendente, desde o espectro solar visível até o final do infravermelho próximo (400 a 2.500 nm). Suas curvas implicam em valores aproximados de refletância espectral, especialmente quando observada a região dos valores medidos pelo ALTA II, ou seja, entre 470 nm e 940 nm.

Esta análise das curvas espectrais de cada grupo amostral (Figura 9), auxilia na compreensão das correlações observadas na Figura 8, já que para aquelas telhas com grande variação de refletância espectral a partir de 940 nm, ou seja, na região não abrangida pelo ALTA II, os coeficientes de determinação são menores. Isso implica o melhor desempenho do equipamento para esses grupos de telhas, o que permite concluir que para as telhas cerâmicas esmaltadas e telhas de fibrocimento, os dados obtidos para refletância solar a partir do ALTA II apresentam menos inconsistências que aqueles medidos para telhas cerâmicas com acabamento natural e resinado, o que, por sua vez, confirma a importância de avaliação do uso desse equipamento para a maior gama de materiais utilizados na construção civil, já que cada superfície, a depender de suas características como matéria-prima e acabamentos, implicará em desempenhos distintos.

Conclusões

A partir das medições realizadas e análise dos dados coletados, concluiu-se inicialmente que o acabamento superficial das telhas, assim como sua matéria-prima têm grande influência no valor de sua refletância solar. Além disso, observou-se que as telhas cerâmicas de acabamento natural foram aquelas com maior refletância solar média ($\rho=0,51$), seguidas pelas telhas de fibrocimento de acabamento natural ($\rho=0,48$). As telhas de fibrocimento com acabamento refletivo não foram consideradas para essa média, já que estas receberam acabamento específico que as tornam materiais frios.

Figura 8 - Correlação entre refletâncias medidas com o ALTA II e o espectrofotômetro

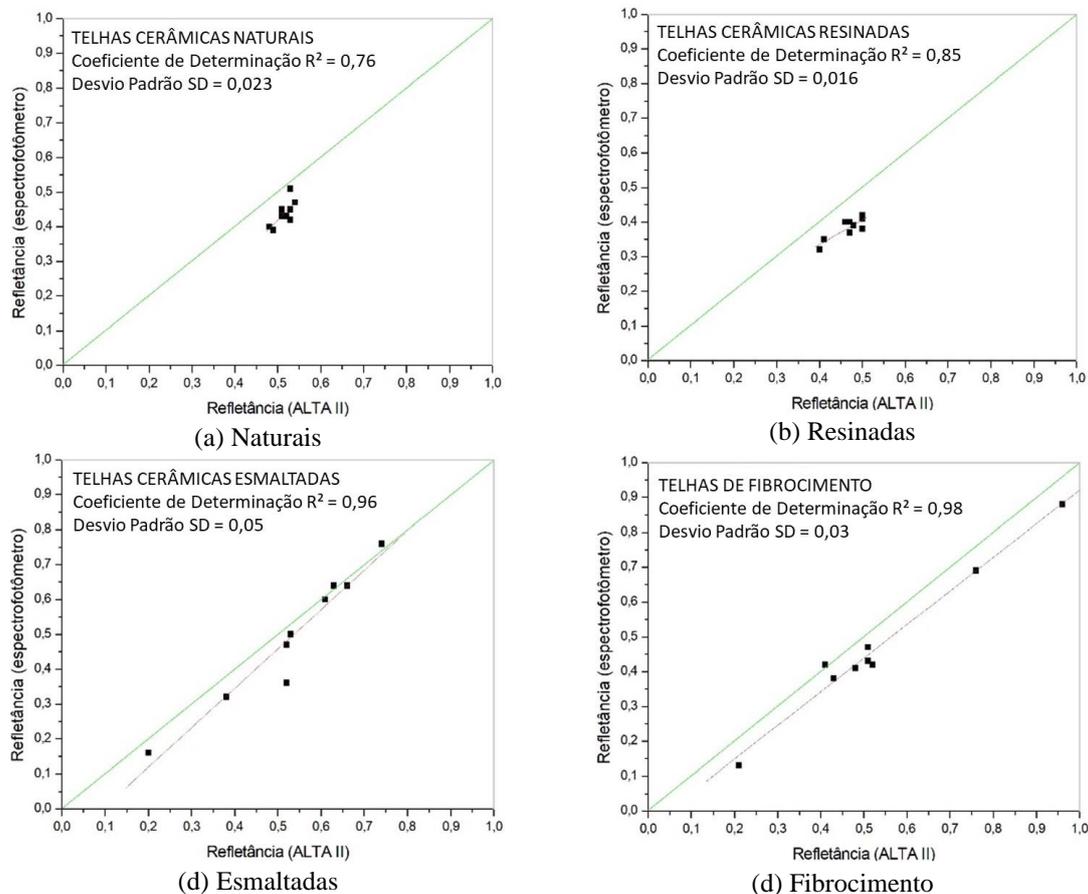
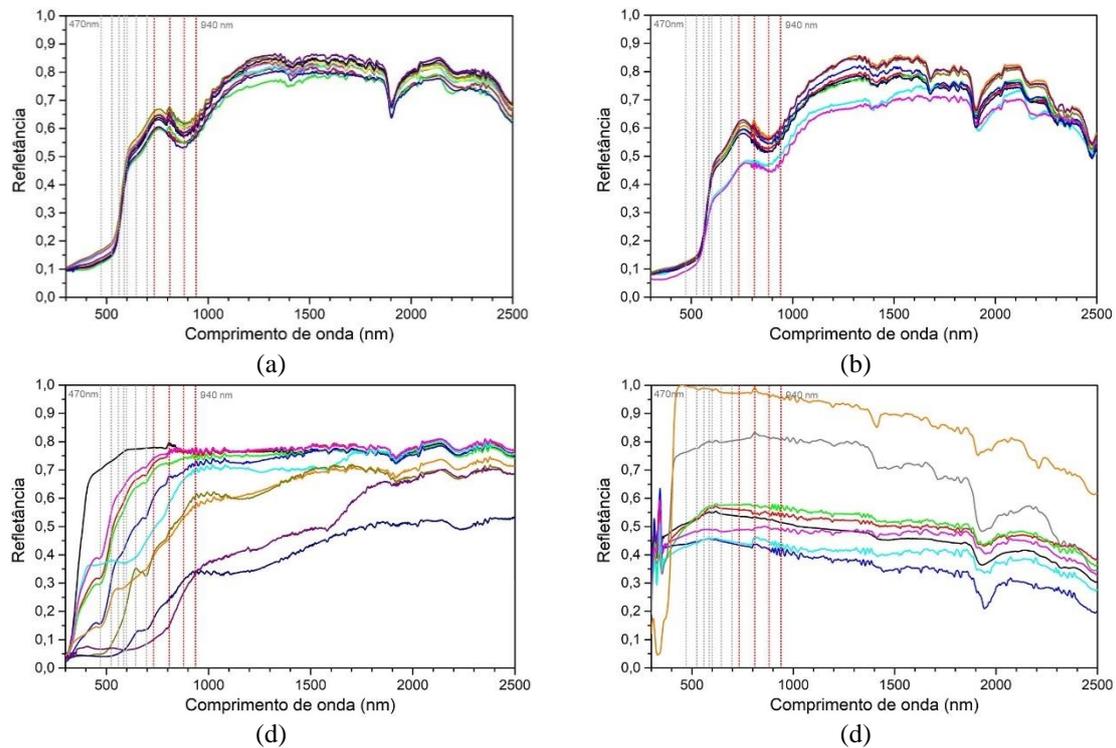


Figura 9 - Marcação de comprimentos de onda do ALTA II e curvas de refletância medidas no espectrofotômetro, para telhas cerâmicas naturais (a), telhas cerâmicas resinadas (b), telhas cerâmicas esmaltadas (c) e telhas de fibrocimento (d)



Analisando-se as medições realizadas com o ALTA II em diferentes métodos, percebeu-se a partir da comparação dos dados medidos em cada uma das situações – variando entre o ambiente interno com e sem a presença do aparato escuro, e ainda em ambiente externo sem o aparato escuro – que não houve um padrão no comportamento do equipamento, quando da ausência do aparato. Para 15 das 39 amostras selecionadas, a ausência do aparato escuro foi prejudicial, aumentando a diferença entre o valor medido pelo espectrômetro e pelo espectrofotômetro. Para 15 amostras os valores com e sem o aparato escuro foram iguais, e para 10 amostras, a ausência do aparato aproximou os valores obtidos daqueles medidos no método normatizado escolhido para esta pesquisa. Devido a esse desempenho do equipamento, para as amostras analisadas nesta pesquisa, não se pode afirmar com convicção o nível de influência do aparato escuro no resultado final de refletância solar obtido.

Ao se considerar os valores de refletância solar medidos com o espectrofotômetro e com o espectrômetro portátil, observa-se que para as telhas cerâmicas esmaltadas e de fibrocimento, os resultados obtidos com o ALTA II são mais confiáveis que aqueles obtidos para as telhas cerâmicas de acabamento natural e resinado, o que se confirma a partir das correlações lineares apresentadas. Todavia, o erro da refletância solar medida pelo ALTA II, em comparação ao medido no espectrofotômetro, ainda é significativo para a maioria das telhas, com poucas exceções em que esta diferença é menor que 0,05 em valores absolutos. Em geral, nota-se que os valores do ALTA II são inferiores aos medidos no espectrofotômetro, sendo essa diferença em média 0,07 em valores absolutos.

Contudo, a partir das correlações apresentadas entre os valores de refletância solar obtidas em cada método de medição, percebe-se que o equipamento ALTA II apresenta resultados que podem ser utilizados como base para a avaliação dessa propriedade óptica das telhas de fibrocimento e telhas cerâmicas, especialmente as esmaltadas, avaliadas neste estudo, pois, mesmo considerando as inconsistências apresentadas, os coeficientes de determinação ($R^2_{TCN} = 0,76$; $R^2_{TCR} = 0,85$; $R^2_{TCE} = 0,96$; $R^2_{TFC} = 0,98$) são fortes indicadores da correlação entre esses valores.

Referências

AKBARI, H. *et al.* Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. **Energy and Buildings**, v. 25, p. 117–126, 1997.

- ALMEIDA, L. S. S. *et al.* Avaliação da envoltória de habitações de interesse social de Florianópolis de acordo com o método prescritivo do RTQ-R. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., Brasília, 2013. **Anais [...]** Brasília, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1549-09**: standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer. West Conshohocken, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1918-06**: standard test method for measuring solar reflectance of horizontal and low-sloped surfaces in the field. West Conshohocken, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E903-20**: standard test method for solar absorptance, reflectance and transmittance of materials using integrating spheres. West Conshohocken, 2020a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G173-03**: standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. West Conshohocken, 2020b.
- ARAÚJO, A. C. H. **Absortância solar e o envelhecimento natural de telhas expostas ao tempo**. São Carlos, 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.
- ARAÚJO, A. C. H.; DORNELLES, K. A. Estação de envelhecimento natural para análise de degradação da absorptância de telhas e monitoramento de temperaturas superficiais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 247-267, abr./jun. 2022.
- ARAÚJO, A. C. H.; DORNELLES, K. A. Refletância solar e o desempenho térmico de telhas expostas ao tempo. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-03**: desempenho térmico das edificações: parte 2: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- BAUMBACH, M. O. *et al.* Portland versus alkali-activated cement wall panels containing mine tailing as aggregate: one-story house thermal performance simulation in a Brazilian and Portuguese hot and humid climate. **MATEC Web of Conferences**, v. 274, 2019.
- BONIN, T.; PEZZUTO, C. C. Medição de refletância e análise de sua influência nos materiais de cobertura. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18., Campinas, 2013. **Anais [...]** Campinas, 2013.
- CORDEIRO, C. C. M. *et al.* Caracterização termofísica de solo laterítico para produção de taipa. **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.
- COUTO, L. S. B. **Alta II**: uma alternativa aos métodos de medição de refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento. São Paulo, 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- COUTO, L.; ABILE, V.; DORNELLES, K. Potencial de uso de espectrômetro portátil para determinação da refletância solar de telhas cerâmicas para cobertura de edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., Balneário Camboriú, 2017. **Anais [...]** Balneário Camboriú, 2017.
- DORNELLES, K. A. **Absortância solar em superfícies opacas**: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA. Campinas, 2008. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.
- DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absorptância de telhas**: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. São Carlos: IAU/USP, 2021.
- DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. A Method to identify the solar absorptance of opaque surfaces with a low-cost spectrometer. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 23., Genebra, 2006. **Anais [...]** Genebra, 2006b.
- DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Identificação da absorptância solar de superfícies opacas por meio de espectrômetro de baixo custo In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., Florianópolis, 2006. **Anais [...]** Florianópolis, 2006a.

- DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Métodos alternativos para identificar a absorvância solar de superfícies opacas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 109-127, jul./set. 2007.
- DUARTE, M. A. *et al.* Modelo termoenergético calibrado do restaurante estudantil do CEFETMG campus II. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRuíDO, 17., Foz do Iguaçu, 2018. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2018.
- DUARTE, M. de A.; LIMA, F. R. S.; OLIVEIRA, R. D. Estudo do desempenho energético e de estratégias para a geração de conforto térmico em refeitório estudantil. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRuíDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa, 2019.
- GAO, Y. *et al.* Thermal performance and energy savings of white and sedum-traygarden roof: a case study in a Chongqing office Building. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 343-359, 2017.
- GILBERT H. E. *et al.* Energy and environmental consequences of a cool pavement campaign. **Energy and Buildings**, v. 157, p. 53-77, 2017.
- GILBERT, H.; MANDEL, B. H.; LEVINSON, R. Keeping California cool: recent cool community developments. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 20-26, 2016.
- GOMES, A. C. F. *et al.* Thermal characterization of soil-cement bricks using mining tailings. **REM - International Engineering Journal**, v. 75, n. 1, p. 19-26, 2022.
- KOWALSKI, L. F. *et al.* Implicações da morfologia urbana na temperatura superficial de pavimentos. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 13, n. 29, 2020.
- KOWALSKI, L. F.; FERNANDES, M. E.; MASIERO, E. Influência do teor de umidade na absorvância de pavimentos intertravados de concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRuíDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa, 2019.
- LAMBERTS, R.; GHISI, E.; RAMOS, G. **Impactos da adequação climática sobre a eficiência energética e o conforto térmico de edifícios de escritórios no Brasil**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. Relatório de Pesquisa.
- LOUZICH, K. M. D. *et al.* Refletância de telhas cerâmicas novas e degradadas pela ação do intemperismo. In: CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL E SUSTENTÁVEL, 7., Maceió, 2016. **Anais [...]** Maceió, 2016.
- MARINOSKI, D. L. *et al.* Análise comparativa de valores de refletância solar de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRuíDO, 12., Brasília, 2013. **Anais [...]** Brasília, 2013.
- MILLER, W. A. **Steep-slope assembly testing of clay and concrete tile with and without cool pigmented colors**. Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-2005/265, 2005.
- MORAIS, C. F. *et al.* Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, 2021.
- MUNIZ, L. P.; PEZZUTO, C. C. Medições de refletância através do espectrômetro Portátil ALTA II. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 19., Campinas, 2014. **Anais [...]** Campinas, 2014.
- MUNIZ-GÄAL, L. P. *et al.* Eficiência térmica de materiais de cobertura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 503-518, jan./mar. 2018.
- ORDENES, M.; GARCIA, E. Verificação da absorvância em superfícies opacas não homogêneas utilizando um espectrômetro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRuíDO, 14., Juiz de Fora, 2028. **Anais [...]** Juiz de Fora, 2012.
- PARKER, D. S.; BARKASZI JUNIOR, S. F. Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida. **Energy and Buildings**, v. 25, p. 105-115, 1997.
- PEREIRA, A. R.; HIRASHIMA, S. Q. da S.; OLIVEIRA, R. D. Utilização do espectrômetro Alta II para obtenção da absorvância solar de superfícies opacas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 17, n. 46, 2021.
- PEREIRA, C. D. *et al.* **Relatório de avaliação do espectrômetro portátil Alta II**. Florianópolis: Centro Brasileiro de Eficiência Energética nas Edificações. 2015.
- PEREIRA, C. D. *et al.* Avaliação experimental do espectrômetro Alta II e sua aplicação na normatização brasileira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 197-213, out./dez. 2017.

- PISELLO, A. L. *et al.* Combined thermal effect of cool roof and cool façade on a prototype building. **Energy Procedia**, v. 7, p. 1556-1561, 2015.
- PISELLO, A. L. *et al.* Investigation on the effect of innovative cool tiles on local indoor thermal conditions: finite element modeling and continuous monitoring. **Building Environment**, v. 97, p. 55–68. 2016.
- POLONI, M. P.; PEZZUTO, C. C. Influência da temperatura Superficial em materiais de superfícies verticais. In: CONGRESSO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 17., Poços de Caldas, 2020. **Anais [...]** Poços de Caldas, 2020.
- POLONI, M. P.; PEZZUTO, C. C. Medidas de refletância de materiais de superfície urbana utilizando o espectrômetro portátil ALTA II. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 5., Campinas, 2015. **Anais [...]** Campinas, 2015
- POMERANTZ, M. Are cooler surfaces a cost-effect mitigation of urban heat islands? **Urban Climate**, v. 24, p 393-397, 2017.
- PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy and Buildings**, v. 37, p. 295-300, 2005.
- RAMOS, L. T. da S. *et al.* Estudo comparativo entre cimento portland e materiais alcali-ativados na construção de painéis de vedação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., , Foz do Iguaçu, 2018. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2018.
- RODRIGUES, B. da C. B.; PEZZUTO, C. C. Avaliação da temperatura superficial de materiais de superfície urbana. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 5., Campinas, 2013. **Anais [...]** Campinas, 2013.
- RORIZ, V. F. **Efeitos de ondulação e rugosidade de superfícies sobre suas absorvâncias e emitâncias: modelo teórico e experimental.** Campinas, 2011. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- RUNDQUIST, B. C.; VANDEBERG, G. S. Fully engaging students in the remote sensing process through field experience. **Journal of Geography**, v. 112, n. 6, 262-270, 2013.
- SÁ, E. M. H.; OLIVEIRA, R. D. Análise de medidas aplicáveis à edificação pública escolar para obtenção da classificação A na etiqueta nacional de conservação de energia. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa, 2019.
- SANGOI, J. M.; RAMOS, G.; LAMBERTS, R. Análise das medições de absorvância através do espectrômetro ALTA II. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., Canela, 2010. **Anais [...]** Canela, 2010.
- SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. **Energy and Buildings**, v. 98, p. 125–133. 2015.
- SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, p. 3085–3102, 2011.
- SANTOS, E. I. **Comparação de métodos para medição de absorvância solar em elementos opacos.** Florianópolis, 2013. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.
- SANTOS, E. I. *et al.* Influência da rugosidade superficial sobre os valores da absorvância solar determinados com o espectrômetro portátil ALTA II. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., Búzios, 2011. **Anais [...]** Búzios, 2011.
- SCHABBACH, L. M. *et al.* Pigmented glazed ceramic roof tiles in Brazil: Thermal and optical properties related to solar reflectance index. **Solar Energy**, v. 159, p. 113-124, 2018.
- SCHAEFER, A. *et al.* Influência da absorvância solar no desempenho térmico de habitações populares. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., Maceió, 2014. **Anais [...]** Maceió, 2014.

- SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; AKBARI, H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. **Energy and Buildings**, v. 39, p. 1167–1174, 2007.
- SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. A comparative study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE “PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, Santorini, 2005. **Anais [...]** Santorini, 2005.
- TAHA, H.; SAILOR, D.; MUNICIPAL, S. **High-albedo materials for reducing building cooling energy use**. Energy and Environmental Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California. Berkeley, 1997.
- TREIMAN, A. H. **Reflectance spectrometer and classroom lesson plans**. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2000.
- VIEIRA, J. A. *et al.* Estudo de classificação da eficiência energética do prédio 20 do CEFET-MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa, 2019.
- VIEIRA, J. A.; SILVA, L. V.; JAPIASSÚ, P. Avaliação de desempenho energético de uma edificação histórica em Goiânia. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., João Pessoa, 2019. **Anais [...]** João Pessoa, 2019.
- VIJAYKUMAR, K. C. K.; SRINIVASAN, P. S. S.; DHANDAPANI, S. A performance of hollow clay tile (HCT) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer climates. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 8, p. 886–892, 2007.

Lorena Santos Bezerra Couto

Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Instituto de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Centro | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel.: (16) 3373-9285 | E-mail: lorenasbcouto@hotmail.com

Kelen Dornelles

Conceitualização, Recebimento de financiamento, Metodologia, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Instituto de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | E-mail: kelend@usp.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
www.scielo.br/ac
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.