XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO, LIMPEZA E PINTURA DA SUPERFÍCIE DE TELHAS DE FIBROCIMENTO SOBRE O DESEMPENHO TÉRMICO DA COBERTURA

Amanda F. Krelling (1); Milena P. Silva (2); Rodrigo V. Souza (3); Deivis L. Marinoski (4); Saulo Güths (5)
(1) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, krellingamanda@gmail.com
(2) Engenheira de Energia, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, milena.paim@posgrad.ufsc.br
(3) MSc, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, arquitetura.rodrigo@hotmail.com
(4) Dr., Professor do Departamento de Engenharia Civil, deivis.marinoski@ufsc.br
(5) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, saulo@lmpt.ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx Postal 476, Florianópolis–SC, 88040-900

RESUMO
O objetivo deste trabalho consistiu em analisar a influência do envelhecimento, limpeza e pintura da superfície de telhas de fibrocimento, sobre a emitância térmica e a refletância solar, no desempenho térmico da cobertura. A avaliação foi realizada por meio de medições dessas propriedades em amostras, nas cores cinza e branca, com longa exposição às intempéries da cidade de Florianópolis. Os dados medidos foram inseridos em uma simulação computacional no programa EnergyPlus, observando-se a variação do desempenho térmico de uma residência unifamiliar. Foi observado que o envelhecimento das amostras provocou a redução da refletância solar e aumento da emitância, levando ao acréscimo de 9,4% e 7,8% do somatório da carga térmica anual de refrigeração para as amostras cinza e branca, respectivamente. A limpeza da telha permitiu a recuperação das propriedades originais, com redução de carga térmica de 10,5% (cinza) e 13,4% (branca), quando comparadas ao material envelhecido. A pintura mostrou-se relevante apenas quando há intenção de mudança para uma coloração que favoreça o desempenho térmico.
Palavras-chave: desempenho térmico, telha de fibrocimento, envelhecimento, limpeza, pintura.

ABSTRACT
This work aims to analyze the influence of aging, cleaning and painting of the surface of fiber cement roof tiles, over its thermal emittance and solar reflectance, on the thermal performance of the roof. The evaluation was carried out by means of measurements of these properties in gray and white samples with long exposure to the weather in the city of Florianópolis. The measured data were inserted in a computational simulation in the EnergyPlus software, observing the variation of thermal performance of a detached house. It was observed that the aging of the samples caused a reduction in solar reflectance and an increase in emittance, leading to the addition of 9.4% and 7.8% of the sum of annual cooling load for gray and white samples, respectively. Cleaning the tiles allowed the recovery of the original properties, with a reduction of 10.5% (gray) and 13.4% (white), when compared to the aged material. Painting the tiles was only relevant when it is intended to change the color of the roof in order to improve thermal performance.
Keywords: thermal performance, fiber cement roof tile, aging, cleaning, painting.

1. INTRODUÇÃO

Análises termo energéticas de edifícios são comumente desenvolvidas durante a etapa de projeto, onde são consideradas características de materiais tabelados ou dados de fornecedores, que oferecem informações a respeito de materiais novos. Ao longo da vida útil da edificação, contudo, tais características podem ser afetadas devido à exposição às intempéries e outras condições que levam ao envelhecimento. A cobertura representa uma porção da área edificada em constante exposição ao meio ambiente e que exerce grande ação sobre o balanço térmico da edificação (ZINZI; AGNOLI, 2012). São muitos os fatores que influenciam no seu processo de envelhecimento, tais como os gases atmosféricos, e poluentes transportados para uma superfície por deposição seca ou úmida, cuja interação pode provocar oxidação e corrosão. Ademais, outro fator de influência é o crescimento biológico, como fungos, cianobactérias e outros microrganismos (JACQUES, 2000, BERDAHL *et al.,* 2008).

A refletância solar e emitância térmica são propriedades importantes para o desempenho térmico das coberturas. A radiação solar incidente sobre um elemento construtivo é absorvida, transmitida ou refletida. A razão entre a energia radiante refletida por um corpo e a incidente sobre ele é definida como a refletância solar, podendo variar entre 0 e 1 (BRADY; WAKE, 1992). Em contrapartida, também em escala de 0 a 1, a emitância é uma medida da capacidade da superfície de irradiar o calor absorvido, em comparação com um corpo negro na mesma temperatura (SYNNEFA; SANTAMOURIS; APOSTOLAKIS, 2007). Santamouris, Synnefa e Karlessi (2011) descrevem os materiais "frios" (*cool materials*) como elementos com alta refletância solar e alta emitância no infravermelho. Dentro desse nicho de materiais, enquadram-se as "coberturas frias", mais conhecidas como *cool roofs*. A determinação do Índice de Refletância Solar, do inglês "*Solar Reflectance Index*" (SRI), representa outra maneira de quantificar o comportamento da superfície de um material quando exposto a incidência da radiação solar. Este índice indica a capacidade que uma superfície tem de refletir a radiação solar e emitir radiação térmica, reduzindo o aumento da temperatura causada por esta exposição (JACINTO *et al*., 2016).

Segundo Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007), a refletância solar e a emitância térmica de uma superfície exposta a condições externas podem mudar ao longo do tempo como resultado do envelhecimento, intemperismo e sujeira. Essa alteração foi menos evidente quando analisada a emitância, enquanto e refletância solar sofreu maior variação, especialmente em materiais com alta refletância solar original. Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007) ainda verificaram que a limpeza das amostras permitiu restaurar 93% das propriedades, evidenciando que a redução da refletância solar se relacionou especialmente com a presença de sujeira, não representando uma alteração permanente.

Em um estudo na Califórnia, Estados Unidos, foi constatado que a refletância solar dos *cool roofs* pode diminuir em até 0,15 devido à deposição de fuligem e poeira, principalmente dentro do primeiro ano de exposição (BERDAHL; BRETZ, 1997). No Japão, Takebayashi *et al.* (2016) verificaram uma redução entre 0,10 e 0,25 da refletância solar de coberturas no período de alguns anos. Ainda segundo os autores, a refletância solar caiu entre 0,05 e 0,10 dentro dos primeiros 50 dias. Levinson *et al.* (2005) analisaram 15 amostras de coberturas de policloreto de vinila, mais conhecido como PVC, com diferentes níveis de envelhecimento, em diversas cidades dos Estados Unidos. Essas amostras tiveram a refletância solar medida sob a condição envelhecida, passando por sucessivos processos de limpeza. Para a amostra em pior condição, com perda de aproximadamente 60% da refletância solar devido à sujeira acumulada, o processo de lavação permitiu a redução da perda para 14%. Nesse contexto, Bretz e Akbari (1997) demostraram que a limpeza da superfície do telhado poderia quase restaurar a refletância solar original. Se aplicados processos regulares de limpeza, o efeito do envelhecimento pode ser refletido na perda de apenas 10% da refletância solar, conforme constataram Mastrapostoli *et al.* (2013). Dentre os autores que estudaram o envelhecimento e restauração de telhas, também pode-se citar Ferrari *et al.* (2014), com foco em telhas cerâmicas, e Mastrapostoli *et al.* (2016), abrangendo *cool roofs*.

No Brasil, Silva e Etulain (2010) descrevem o estudo, desenvolvido pela SBK Business, que estimou a participação dos tipos de telhas no mercado brasileiro de coberturas entre 2005 e 2006. Nesse levantamento, as telhas de fibrocimento apareceram como as mais utilizadas nas edificações, representando 49% das coberturas. Dentro deste cenário, Shirakawa *et al.* (2014) e Coelho, Gomes e Dornelles (2017) estudaram o processo de envelhecimento de telhas de fibrocimento, porém não abordaram o possível efeito da restauração desses materiais. A partir da análise dos citados trabalhos, percebeu-se a necessidade da avaliação do envelhecimento, restauração e consequente efeito desses processos sobre o desempenho térmico de uma edificação no clima brasileiro. Nesse sentido, o presente artigo dedicou-se ao estudo da variação das propriedades, emitância térmica e refletância solar, de telhas de fibrocimento após o processo de envelhecimento natural, seguido pela restauração através de limpeza e pintura. Cada uma dessas etapas foi

acompanhada pela simulação do seu desempenho térmico em uma cobertura de uma residência unifamiliar, desempenhada por meio do *software* EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2019a).

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a análise da influência do envelhecimento, limpeza e pintura da superfície de telhas de fibrocimento, sobre a emitância térmica e a refletância solar, no desempenho térmico da cobertura.

3. MÉTODO

O desenvolvimento deste artigo foi subdividido em quatro etapas principais:

1. Seleção e preparação das amostras;
2. Medição da emitância térmica e da refletância solar;
3. Cálculo do Índice de Refletância Solar (SRI);
3. Simulação do desempenho térmico das amostras em uma edificação unifamiliar.

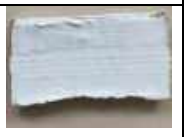
3.1. Seleção e preparação das amostras

Nesta pesquisa foram utilizadas duas telhas de fibrocimento, nas cores cinza e branco, com aproximadamente 15 e 2 anos de uso, respectivamente. Estas foram substituídas de coberturas dos prédios do campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis, pois se encontravam trincadas. Uma das amostras estava em sua cor natural, cinza, sem pintura, mas com muita sujeira acumulada em sua superfície, enquanto a outra havia sido pintada de branco nas duas faces com tinta acrílica com dióxido de titânio em sua composição (Tinta A). A pintura da segunda amostra provocou a diminuição da porosidade de suas superfícies, porém, esta também se encontrava com acumulo de sujeira.

Conforme exibido na Tabela 1, foram produzidas três amostras a partir de cada telha coletada: uma das amostras permaneceu com as condições de uso em que foi obtida, sem nenhum tipo de intervenção; a segunda foi lavada com água e escovada, removendo-se a sujeira superficial; enquanto a terceira foi lavada com água, escovada e pintada com tinta de proteção térmica refletiva de cor branca, que utiliza nano partículas em sua composição (Tinta B). A critério de referência, todas essas condições de envelhecimento e restauração foram também comparadas com as medições desempenhadas por Krelling *et al.* (2018), que analisaram as propriedades ópticas e térmicas de diversos tipos de telhas novas, dentre elas, duas de fibrocimento: uma produzida em cor cinza e outra produzida com a camada externa pigmentada com cimento branco e dióxido de titânio.

Para a avaliação da emitância, foram utilizadas amostras em tamanho maior, sendo realizadas medições em diferentes pontos. Quando medida a refletância solar, as suas dimensões precisaram ser reduzidas devido à limitação de espaço do equipamento.

Tabela 1- Amostras das telhas de fibrocimento nas condições envelhecida, lavada e pintada.

Cor da amostra	**Condição da amostra**		
	Envelhecida	**Lavada**	**Pintada**
Cinza	 Telha, fabricada em cor cinza, após 15 anos de envelhecimento	 Telha cinza envelhecida após lavação e escovação	 Telha cinza envelhecida após lavação, escovação e pintura com Tinta B
Branca	 Telha pintada de branco com Tinta A, após 2 anos de envelhecimento	 Telha branca envelhecida após lavação e escovação	 Telha branca envelhecida após lavação, escovação e pintura com Tinta B

3.2. Medição da emitância térmica e refletância solar

A avaliação da emitância térmica das amostras foi realizada com o uso de um emissômetro fabricado pela empresa *Devices and Services Company* (D&S), modelo AE1 (Figura 1). Além disso, as medições foram realizadas utilizando-se um multímetro; um dissipador de calor; e duas amostras padrão, com alta (0,88) e baixa (0,06) emitância, empregadas na calibração do equipamento.

O procedimento de medição foi adotado segundo as recomendações da Norma ASTM C1371-15: *Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers* (ASTM, 2015), onde o detector foi continuamente calibrado, a partir das amostras padrão,

entre cada uma das medições de emitância das amostras do material. Cada uma das seis amostras foi medida em cinco pontos diferentes da telha. Para todos os casos, o tempo de contato entre o detector e a amostra foi de 90 segundos, objetivando possibilitar a estabilização da medição, assim como padronizar o procedimento.

Na avaliação da refletância solar foi utilizado um espectrofotômetro fabricado pela empresa PerkinElmer, modelo Lambda 1050, o qual permite a medição da refletância, absortância e transmitância de materiais opacos e transparentes, dentro de uma faixa espectral de 175 nm a 3300 nm. O equipamento conta com diferentes módulos e acessórios para medição, sendo a esfera integradora de 150 mm (Figura 2) o módulo empregado na avaliação da refletância solar. Na esfera estão incorporados internamente dois detectores de radiação que captam distintas faixas do espectro, sendo o detector UV/VIS responsável pelas faixas entre 160 e 800 nm e o NIR de 800 a 2500 nm. O ensaio foi realizado com base na Norma ASTM E903: *Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres* (ASTM, 2012), na faixa espectral de 300 a 2500 nm, com intervalos de 5 nm. Após cada medição do espectrofotômetro, foi realizada a correção dos valores de refletância espectral com base na intensidade de radiação solar para cada comprimento de onda, obtida por meio de um espectro solar padrão. O índice de refletância solar é obtido após a integração desses valores no intervalo de medição.

1 - Detector;
2 - Adaptador do detector;
3 - Dissipador de calor;
4 - Padrão de calibração;
5 - Multímetro;
6 - Módulo da esfera integradora;
7 - Local de posicionamento da amostra com tampa de proteção.

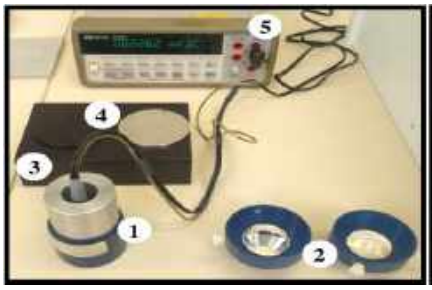




Figura 1 - Emissômetro D&S AE1.

Figura 2 - Espectrofotômetro Lambda 1050.

3.3. Cálculo do Índice de Refletância Solar (SRI)

Segundo a Norma ASTM E1980: *Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces* (ASTM, 2011), o Índice de Refletância Solar representa a temperatura de uma superfície em relação ao padrão branco (SRI = 100) e padrão negro (SRI = 0) sob condições ambientais típicas. Dentro destas condições padrão, o SRI foi calculado a partir das Equações 1 e 2, onde h_c representa o coeficiente de convecção [W/m²K]; ε a emissividade térmica; e ∝ refere-se à absortância solar. A absortância solar foi encontrada a partir da sua relação com a refletância (absortância = 1 – refletância) que, por sua vez, teve adotado o valor medido no espectrofotômetro.

Segundo a Norma ASTM E1980 (ASTM, 2011), o cálculo do SRI leva em consideração três possíveis valores para o coeficiente convectivo (h_c): 5, 12 e 30 W/m²K, que correspondem, respectivamente, à baixa, média e alta condição de transferência de calor entre a superfície e o ar em movimento. Neste estudo, foi considerado o coeficiente convectivo intermediário, igual a 12 W/m²K.

$$\chi = \frac{(\propto -0{,}029.\varepsilon).(8{,}797 + h_c)}{9{,}5205.\varepsilon + h_c} \qquad \text{Equação 1}$$

$$SRI = 123{,}97 - 141{,}35.\chi + 9{,}655.\chi^2 \qquad \text{Equação 2}$$

Esta prática abrange o cálculo do Índice de Refletância Solar de superfícies opacas horizontais e de baixa inclinação em condições padrão. O método destina-se a calcular o SRI para superfícies com emissividade superior a 0,1 (ASTM, 2011).

3.4. Parâmetros para simulação computacional

O desempenho térmico de cada uma das amostras foi avaliado por meio de simulação computacional através do *software* EnergyPlus, versão 9.0.1, onde modelou-se o efeito da cobertura em uma residência unifamiliar em Florianópolis, Brasil, mesma cidade onde ocorreu o processo de envelhecimento das amostras. A simulação foi executada para um período anual, com passo de tempo de 5 minutos e dados de saída gerados a cada 5 minutos, considerando o arquivo climático INMET (CRAWLEY; LAWRIE, 2019). A geometria e

materiais construtivos da edificação foram extraídos do trabalho de Triana, Lamberts e Sassi (2015), que caracterizaram as tipologias mais representativas dentre as habitações de interesse social no Brasil.

A Figura 3 ilustra o modelo simulado, que conta com sala e cozinha integradas, dois dormitórios, banheiro e ático como zonas térmicas. No desenvolvimento deste trabalho, futuras menções ao ambiente integrado de sala e cozinha serão referenciadas apenas como "sala". Ademais, foram alvo das avaliações desse artigo os Ambientes de Permanência Prolongada (APPs), sala e dormitórios, conforme abordagem da nova Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (CB3E, 2018).

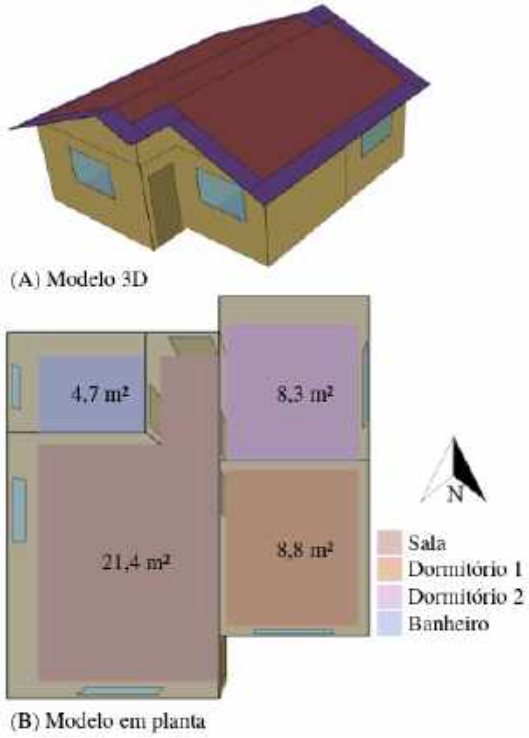


Figura 3 – Modelo simulado no EnergyPlus.

Com base em Triana, Lamberts e Sassi (2015), foram adotados como parâmetros construtivos:

- Pé direito de 2,5 m;
- Paredes com espessura de 13 cm, compostas por tijolo cerâmico furado de 9x14x19 cm, com revestimento interno e externo (transmitância de 2,43 W/m².K, capacidade térmica de 132,0 kJ/m².K e absortância solar das paredes externas de 0,6);
- Cobertura com duas águas e beiral de 50 cm, composta por telhas de fibrocimento e forro de PVC;
- Janelas de correr com duas folhas na sala e quartos, com área de 1,5 m² e peitoril igual a 1,1 m; janela de correr com duas folhas na cozinha, com área de 1,2 m²; janela de 0,48 m² e peitoril de 1,5 m no banheiro;
- Vidros transparentes de 4 mm.

Como cargas internas, foi considerada uma densidade de potência de iluminação igual a 5 W/m² em todas as APPs, com equipamentos de potência igual a 120 W na sala e ocupação equivalente a duas pessoas por dormitório. A Tabela 2 apresenta as taxas metabólicas para cada atividade nas diferentes APPs, enquanto a Figura 4 descreve o padrão de ocupação dos ambientes e utilização da iluminação e equipamentos, adotado na proposta INI-R.

Tabela 2 – Taxa metabólica por atividade

Ambiente	Atividade	Calor produzido [W/m²]	Calor produzido para área de pele de 1,8 m² [W]
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: CB3E (2018).

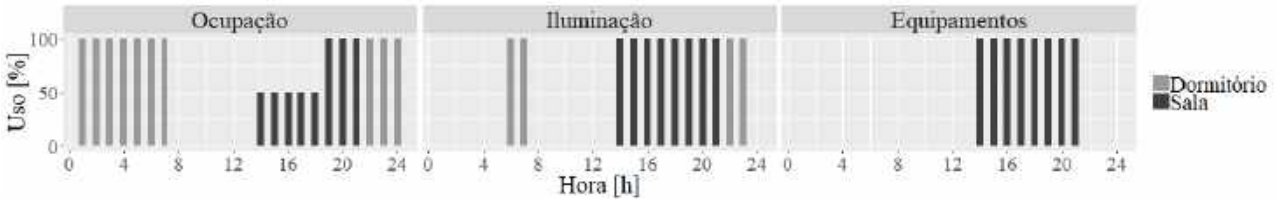


Figura 4 – Padrão INI-R para a ocupação dos ambientes e utilização da iluminação e equipamentos.

Foi adotado um sistema misto de condicionamento ambiental, com o seguinte padrão de operação:

- O condicionamento artificial do ambiente é adotado somente quando há ocupação, com seu acionamento condicionado a ocorrência de temperaturas operativas iguais ou superiores a 26 ºC

para resfriamento e iguais ou inferiores a 16 ºC para aquecimento. Uma vez acionado o condicionamento artificial, este não será desligado até que finalizada a ocupação do ambiente;

- A consideração do sistema de condicionamento artificial na modelagem foi feita a partir da adoção do grupo de objetos *Ideal Loads Air System*, configurado para manter a temperatura do ar em 23 ºC quando acionado o resfriamento, e em 18 ºC quando necessário o aquecimento;
- Entre as temperaturas operativas de 16 e 26 ºC, adota-se a ventilação natural se a temperatura de ar na APP for maior do que a temperatura do ar externo e se esta for maior do que 19 ºC;
- Durante a ocupação da sala com utilização da ventilação natural, é permitida a ventilação natural nos dormitórios se igualmente atendidas as condições de temperatura descritas no item anterior.

As medidas consideradas na avaliação do desempenho térmico da cobertura da residência foram:

- Temperatura externa na superfície da cobertura (*Surface Outside Face Temperature*), em ºC, considerando a parcela da cobertura voltada para o oeste;
- Taxa de ganho de calor por radiação térmica por área na superfície externa da cobertura (*Surface Outside Face Net Thermal Radiation Heat Gain Rate per Area*), em W/m², considerando a parcela da cobertura voltada para o oeste. Esta medida representa a transferência de calor atribuída às trocas de radiação térmica infravermelha de onda longa entre a superfície e os arredores da face externa (ENERGYPLUS, 2019b), admitindo valores positivos e negativos. A adoção desse parâmetro possibilitou a observação da influência da emitância no comportamento térmico da edificação, onde valores negativos da taxa indicam a perda de calor por emissão;
- Taxa de ganho de calor por radiação solar por área na superfície externa da cobertura (*Surface Outside Face Solar Radiation Heat Gain Rate per Area*), em W/m², considerando a parcela da cobertura voltada para o oeste. Esta medida representa a transferência de calor atribuída a absorção de radiação solar na face externa (ENERGYPLUS, 2019b), admitindo apenas valores positivos. A adoção desse parâmetro possibilitou a observação da influência da refletância solar no comportamento térmico da edificação. Visto a relação entre absortância e refletância, cuja soma deve ser igual a um, entende-se que, quanto maior for a taxa de ganho de calor por radiação solar, menor foi a energia refletida pela superfície;
- Somatório anual das cargas térmicas de resfriamento e aquecimento (*Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy* e *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy*), em kWh, divididas pela área total condicionada artificialmente. Representam a quantidade de calor a ser inserida ou retirada do ar, de modo a manter o ambiente nas condições desejadas.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados provenientes das medições, dos cálculos realizados e das simulações computacionais para cada uma das amostras.

4.1. Emitância térmica e refletância solar das amostras

A Figura 5 apresenta os índices obtidos para a emitância térmica e refletância solar de todas as amostras consideradas, sendo que os resultados para as telhas novas de cor cinza e branca foram obtidos a partir das medições de Krelling *et al.* (2018), as quais são utilizadas como referência de um material não degradado.

É necessário alertar que a comparação direta entre os resultados de envelhecimento e restauração das amostras cinzas e brancas é desaconselhado, visto os diferentes períodos e condições de exposição de cada telha ao meio ambiente. A análise individual de cada um dos tipos, por outro lado, é o que conduz o presente trabalho na observação dos efeitos do envelhecimento sobre as coberturas, e na investigação das consequências da limpeza e pintura para com as propriedades dos materiais, bem como o seu desempenho térmico em edificações.

A partir da Figura 5, pode-se observar que o envelhecimento das telhas trouxe acréscimos de 1,7% e 10,7% nos valores de emitância térmica das amostras cinza e branca, respectivamente. O processo de limpeza e pintura foi capaz de restituir aproximadamente os valores de emitância de uma telha nova, com pouca diferença entre o efeito da lavação e da lavação seguida por pintura.

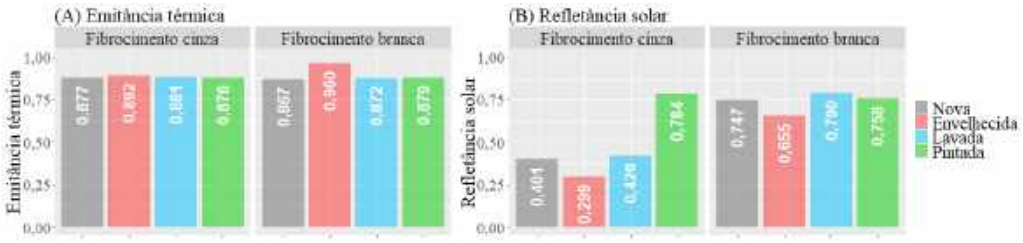


Figura 5 - Resultados das medições de (A) emitância térmica e (B) refletância solar das amostras.

A influência do envelhecimento e restauração das amostras foi mais evidente quando observados os resultados de refletância solar. A amostra de cor cinza apresentou uma redução de 25,4% do índice de refletância solar decorrente do seu envelhecimento. Tal valor foi possível de ser recuperado integralmente por meio da limpeza. A pintura da amostra cinza resultou na superação em 95,5% da refletância solar da telha cinza nova, o que pode ser atribuído a mudança de coloração devido à pintura de cor branca, assim como às características de refletância espectral dos diferentes componentes químicos da tinta. A telha branca sofreu redução de 12,3% da refletância solar devido ao envelhecimento, sendo esta perda totalmente compensada pela restauração da amostra.

A variação da refletância espectral em função do comprimento de onda pode ser visualizada por meio da Figura 6. Em comparação com as demais, o envelhecimento da amostra cinza provocou a redução da refletância espectral nos comprimentos de onda de 300 a 1000 nm, compreendendo o espectro ultravioleta, visível e parte do infravermelho. A limpeza do material promoveu o aumento da reflexão para comprimentos de onda maiores que 600 nm, enquanto a pintura da amostra cinza fez com que a sua refletância espectral se aproximasse do obtido para as amostras brancas, o que pode ser atribuído às propriedades da tinta, além da alteração da cor.

Na telha branca, a pintura resultou em refletâncias espectrais próximas ao observado na amostra nova. A amostra lavada, por outro lado, obteve uma grande elevação da refletância espectral para todos os comprimentos de onda maiores do que 400 nm. Esse resultado indica que a Tinta A, nas proporções e concentrações específicas aplicadas pela equipe de manutenção da Universidade antes do processo de envelhecimento, levou a valores de refletância superiores do que os obtidos para uma telha de fibrocimento fabricada na cor branca, assim como para a amostra pintada com a tinta de proteção térmica refletiva, com nano partículas na composição (Tinta B). Para outras condições de lavação e pintura, no entanto, tal desempenho pode ser diferente.

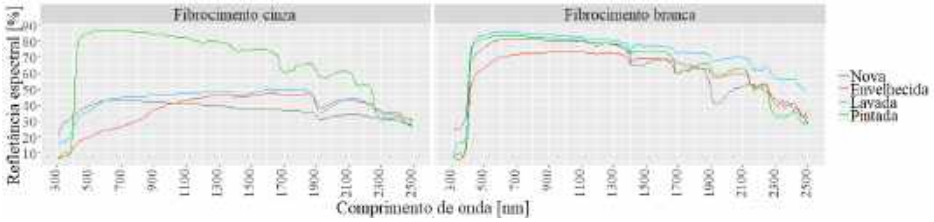


Figura 6- Refletância espectral das amostras cinzas e brancas.

4.2. Índice de refletância solar (SRI) das amostras

A Figura 7 apresenta os resultados do Índice de Refletância Solar, obtidos a partir das Equações 1 e 2.

A análise do SRI, que pondera tanto emitância térmica quanto refletância solar, confirma a redução do desempenho das amostras após um período de exposição ao meio ambiente, assim como a possibilidade de recuperação das propriedades originais após a restauração. Esses resultados vão de encontro ao obtido por autores como Synnefa, Santamouris e Apostolakis (2007), que concluíram que a degradação das propriedades de fato ocorre, mas pode ser revertida com considerável eficiência. Para as amostras deste trabalho, a redução do SRI foi de 28,6% para o material cinza, e 11,6% para o branco, quando comparadas as amostras envelhecidas e novas.

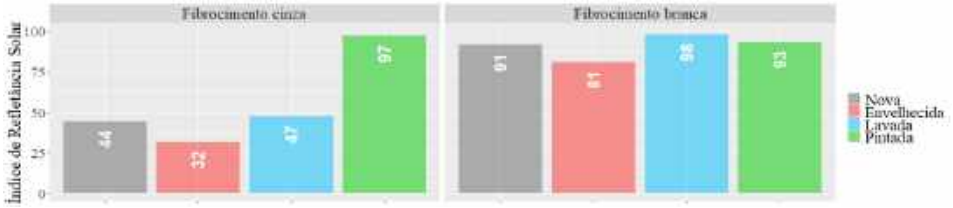


Figura 7- Índice de Refletância Solar (SRI) das amostras cinzas e brancas.

4.3. Desempenho térmico

Nesta subseção são apresentados os resultados provenientes da simulação computacional utilizando o *software* EnergyPlus. Na Figura 8 são exibidos histogramas de diferenças relativas, onde os resultados das amostras envelhecidas e restauradas para a temperatura na superfície da cobertura, a taxa de ganho de calor por radiação térmica e a taxa de ganho de calor por radiação solar foram subtraídos pelos resultados obtidos para as amostras novas. Dessa forma, entende-se que valores positivos indicam que os resultados das amostras envelhecidas ou restauradas superaram o obtido para as novas, enquanto valores negativos representam o oposto.



Figura 8- Histogramas de diferenças relativas entre os dados de saída do programa EnergyPlus para as amostras envelhecidas e restauradas em relação às amostras novas.

Para a diferença na temperatura da superfície da cobertura, obteve-se uma variação entre aproximadamente -15 ºC e +5 ºC com relação a telha nova, considerando amostras cinzas e brancas. O envelhecimento das telhas resultou no aumento de cerca de 2,5 ºC em 12,5% do tempo, com máximo aumento próximo a 5 ºC para as duas cores de amostras. A limpeza de ambas as amostras possibilitou a sua completa recuperação, quando analisada a temperatura, visto os resultados concentrados entre -2,5 ºC e zero.

A simulação da taxa de ganho de calor por radiação térmica resultou em valores negativos para todas as amostras durante todo o ano, indicando que, em diferentes intensidades, a superfície da cobertura está sempre emitindo calor. Devido a esse padrão, essa variável foi analisada de acordo com o seu valor absoluto. Portanto, a influência da emitância pode ser visualizada a partir da observação das diferenças nos valores absolutos da taxa de ganho de calor por radiação térmica na superfície da cobertura, cujos valores positivos indicam que a superfície emite mais calor por radiação de ondas longas do que uma amostra nova. Tal comportamento é o que se verifica para as amostras envelhecidas, cujo aumento na emissão de calor chega próximo a 25 W/m² em 12,5% do ano. Novamente se observa que as amostras lavadas voltaram a ter o potencial de emissão das telhas novas para todo o período.

A taxa de ganho de calor por radiação solar na cobertura evidencia a influência da refletância solar, onde diferenças positivas representam maior calor sendo absorvido pela superfície, ou seja, menor efeito de reflexão. Nesse cenário, o envelhecimento das telhas levou ao aumento da taxa de ganho de calor em até 100 W/m², enquanto a limpeza permitiu a manutenção da capacidade de reflexão antiga ao longo de todo o ano.

Para todos os parâmetros analisados, a pintura das amostras brancas manteve o desempenho de uma telha nova, enquanto a pintura das amostras cinza causou reduções maiores do que 15 ºC na temperatura da telha e variações superiores a 100 W/m² nas taxas de ganho de calor por radiação térmica e solar. Contudo, esse comportamento pode ser atribuído à mudança de cor da amostra de cinza para branco após o processo de pintura, assim como ao efeito das características dos componentes químicos da tinta.

A Figura 9 compara o somatório da carga térmica anual de refrigeração entre as amostras envelhecidas e restauradas com relação à amostra nova. A carga térmica de aquecimento não foi avaliada pois resultou em valores inferiores a 0,75 kWh/m² para todo o ano. A linha pontilhada, ilustrada na Figura 9, representa a igualdade da carga térmica anual entre os casos com telhas novas e com telhas envelhecidas ou restauradas.

A carga térmica anual de refrigeração obtida com a aplicação da telha cinza nova foi igual a 47,0 kWh/m². O envelhecimento dessa amostra provocou o aumento de 9,4% da carga anual, sendo compensado pela limpeza da telha, que reduziu 10,5% da carga obtida com a amostra envelhecida. A pintura branca na amostra cinza promoveu a redução de 34,2% da carga de refrigeração anual, em comparação com a cinza nova, passando a ter valor igual a 30,9 kWh/m². O resultado obtido para a telha cinza pintada assemelha-se a magnitude obtida com a aplicação das telhas originalmente brancas.

Com o uso da telha branca nova foi obtida uma carga térmica de refrigeração igual a 32,9 kWh/m², cujo envelhecimento foi responsável pelo aumento de 7,8% desse valor. A limpeza da amostra branca fez com que a carga fosse reduzida em 13,4% em relação a telha envelhecida, enquanto a pintura provocou a diminuição de apenas 8,9% em relação a mesma amostra.

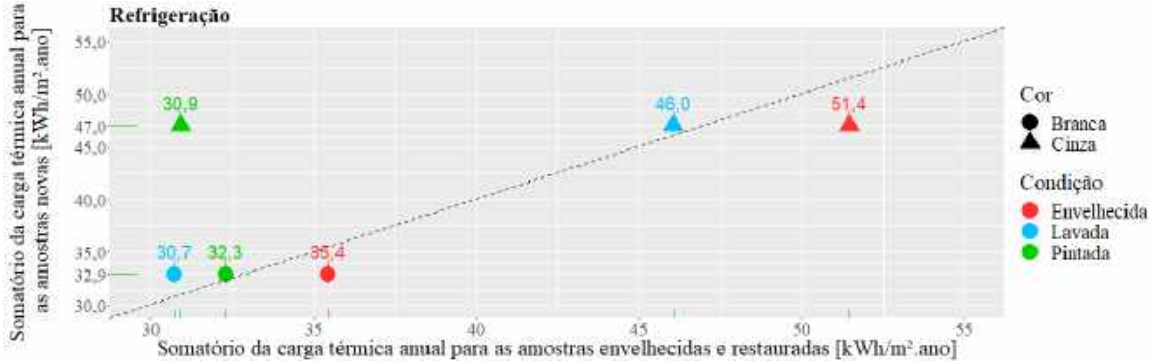


Figura 9- Carga térmica anual de refrigeração obtida com a aplicação de cada amostra em simulação no EnergyPlus.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou avaliar o efeito do envelhecimento e restauração (limpeza e pintura) de telhas de fibrocimento sobre a refletância solar e emitância térmica, assim como sobre o seu desempenho térmico, simulado para uma residência unifamiliar na cidade de Florianópolis.

A partir da análise conjunta dos resultados de medição de propriedades e simulação computacional, pode-se verificar que o envelhecimento das amostras influenciou especialmente na capacidade de reflexão, que tendeu a diminuição. Para a amostra cinza, a redução da refletância solar foi de 25,4%. A alteração da emitância devido ao envelhecimento dessa amostra foi de menor magnitude, com aumento de 1,7%. Quando observado o SRI, que pondera ambas as propriedades, foi obtido uma redução de 28,6%. A variação dos parâmetros citados, devido ao envelhecimento, incorreu no aumento da carga térmica anual para refrigeração das Áreas de Permanência Prolongada na proporção de 9,4% para a telha cinza. A limpeza dessa amostra foi capaz de recuperar as propriedades da amostra nova, com redução de 10,5% da carga térmica anual de refrigeração quando comparado com a amostra envelhecida. A ação conjunta de limpeza e pintura de telhas cinza, com alteração de cor para o branco, permitiu que seu comportamento passasse a ser muito semelhante ao de uma amostra originalmente branca.

O envelhecimento da telha branca provocou a redução de 12,3% da refletância solar e aumento de 10,7% da emitância térmica, com SRI passando a diminuir 11,6%. A limpeza dessa amostra fez com que o desempenho térmico da edificação fosse melhorado, com redução de 13,4% da carga anual de refrigeração, em relação a amostra envelhecida. O processo de limpeza e pintura resultou em valores inferiores do que quando realizada apenas a limpeza da telha branca, o que evidencia a diferença de desempenho de distintos materiais de acabamento superficial de uma mesma cor.

A partir desses dados, pode-se concluir que o processo de envelhecimento das coberturas acarreta em significativa alteração do desempenho térmico do modelo simulado no *software* EnergyPlus, o que potencialmente reflete o que deve ocorrer em edificações reais em climas semelhantes, visto a medição e análise prévia das propriedades térmicas e ópticas dos materiais após condições reais de exposição às intempéries. Nesse cenário, a limpeza das amostras permitiu restaurar completamente o desempenho de um material novo, o que representa uma alternativa viável para a manutenção das propriedades da cobertura em edifícios já construídos. A limpeza seguida por pintura mostrou-se significativa apenas quando existe o interesse da mudança da coloração da cobertura, cujo desempenho térmico foi promovido com a mudança da cor cinza para branca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C1371-15: Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers. ASTM International, 2015.

_____. E1980-11: Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces. ASTM International, ASTM International, 2011.
_____. E903-12: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. ASTM International, 2012.
BERDAHL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy Buildings**, v. 25, p. 149-158, 1997.
BERDAHL, P.; AKBARI, H.; LEVINSON, R.; MILLER, W.A. Weathering of roofing materials – an overview. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 423–433, 2008.
BRADY, R.F., WAKE, L.V. Principles and formulations for organic coatings with tailored infrared properties. **Progress in Organic Coatings**, v. 20, p. 1-25, 1992.
BRETZ, S.E.; AKBARI, H. Long-term performance of high-albedo roof coatings. **Energy and Buildings**, v. 25, p. 159-167, 1997.
CB3E (Florianópolis). **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2018. Disponível em: < http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas >. Acesso em: 2 mar. 2019.
COELHO, T.C.C.; GOMES, C.E.M.; DORNELLES, K.A. Desempenho térmico e absortância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 147-161, 2017.
CRAWLEY, D.; LAWRIE, L. **Climate One Building**. Disponível em: < http://climate.onebuilding.org >. Acesso em: 4 mar. 2019.
ENERGYPLUS. **EnergyPlus.** Disponível em: < https://energyplus.net/ >. Acesso em: 4 mar. 2019a.
ENERGYPLUS. **EnergyPlus™ Version 9.0.1 Documentation - Input Output Reference**. Disponível em: < https://energyplus.net/documentation>. Acesso em: 4 mar. 2019b.
FERRARI, C.; TOUCHAEI, A.; SLEIMAN, M.; LIBBRA, A.; MUSCIO, A.; SILIGARDI, C.; AKBARI, H. Effect of aging processes on solar reflectivity of clay roof tiles. **Advances in Building Energy Research**, v. 8, p. 28-40, 2014.
JACINTO, L.I.; SILVA, M.E.X.; MARINOSKI, D.L.; FREDEL, M.C.; SCHABBACH, L.M. Determination of solar reflectance index of ceramic coatings for use in outside surfaces. **Materials Science Forum**, v. 881, p. 251-256, 2016.
JACQUES, L. Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings. **Progress in Polymer Science**, v.25, p.1337-1362, 2000.
KRELLING, A.F.; SILVA, M.P.; SOUZA, R.V.; MARINOSKI, D.L.; GÜTHS, S. **Análise laboratorial de propriedades ópticas e térmicas de dezesseis amostras de telhas disponíveis no mercado brasileiro**. In: Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Foz do Iguaçu, Brasil, 2018.
LEVINSON, R.; BERDAHL, P.; BERHE, A.A.; AKBARI, H. Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 7807-7824, 2005.
MASTRAPOSTOLI, E., SANTAMOURIS, M., KOLOKOTSA, D., VASSILIS, P., VENIERI, D., GOM-PAKIS, K. **A numerical and experimental analysis of the aging of the cool roofs for buildings in Greece**. In: Proceedings of the 34th AIVC Conference Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials. Atenas, Grécia, 2013.
MASTRAPOSTOLI, E.; SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTSA, D.; VASSILIS, P.; VENIERI, D.; GOMPAKIS, K. On the ageing of cool roofs: Measure of the optical degradation, chemical and biological analysis and assessment of the energy impact. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 191-199, 2016.
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.
SILVA, A.L.G.; ETULAIN, C. **Avaliação do Impacto Econômico da Proibição do Uso do Amianto na Construção Civil no Brasil** - Convênio de Cooperação Técnica 4416 – ABIFibro/Unicamp – Relatório Final de Pesquisa. 2010. Disponível em: < https://inverde.files.wordpress.com/2010/10/estudo-unicamp-impacto-economico-da-proibicao-do-amianto.pdf >. Acesso em: 2 mar. 2019.
SHIRAKAWA, M.A.; WERLE, A.P.; GAYLARDE, C.C.; LOH, K.; JOHN, V.M. Fungal and phototroph growth on fiber cement roofs and its influence on solar reflectance in a tropical climate. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 95, p. 332-337, 2014.
SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, M., APOSTOLAKIS, K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. **Solar Energy**. v. 81, p. 488-497, 2007.
TAKEBAYASHI, H.; MIKI, K.; SAKAI, K.; MURATA, Y.; MATSUMOTO, T.; WADA, S.; AOYAMA, T. Experimental examination of solar reflectance of high-reflectance paint in Japan with natural and accelerated aging. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 173-179, 2016.
TRIANA, M.A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, p. 524-541, 2015.
ZINZI, M., AGNOLI, S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 66-76, 2012.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos financeiros concedidos, e ao Departamento de Manutenção Predial e de Infraestrutura (DMPI) da Universidade Federal de Santa Catarina pelo auxílio na obtenção das amostras utilizadas neste estudo.