

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE TÉRMICA DE UM REVESTIMENTO DE ALTA REFLETIVIDADE E SUA APLICAÇÃO  
NA REDUÇÃO DE CARGA SOLAR EM EDIFICAÇÕES.

por

STEFANO EIDELWEIN

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE TÉRMICA DE UM REVESTIMENTO DE ALTA REFLETIVIDADE E SUA APLICAÇÃO  
NA REDUÇÃO DE CARGA SOLAR EM EDIFICAÇÕES.

por

STEFANO EIDELWEIN

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Bardo E. J. Bodmann

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2017.

*Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais,  
Ester Maria Bervian Eidelwein e Heriberto Antonio Eidelwein.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por todo carinho, apoio e incentivo, pois sempre priorizaram meus estudos e me fizeram chegar até aqui.

Agradeço aos meus irmãos, pois sempre estiveram presentes quando precisei de algum conselho, e por toda carga de conhecimento obtida por eles.

Agradeço a minha namorada Victória Montenegro Candemil, pelo apoio incondicional, otimismo e paciência ao longo de nosso tempo juntos, que agregaram muito nessa etapa de conclusão do curso.

Agradeço ao meu orientador, Francis Henrique Ramos França, pelas inúmeras horas de atenção, conselhos, ensinamentos, e por ter me guiado neste caminho, cumprindo seu papel de maneira honrosa, cordial e exemplar.

Agradeço a equipe do Laboratório de Combustão da UFRGS, principalmente ao técnico Rafael Quines da Silva e o doutorando Isaías Mortari Machado, por abrirem as portas do laboratório e auxiliarem na realização de meu experimento.

Agradeço aos centros estudantis CEMEC e CEUE, dos quais fiz parte, pelas experiências e amizades obtidas, nos mais variados campos da engenharia.

Eidelwein, S. E. Análise Térmica de um Revestimento de Alta Refletividade e sua Aplicação na Redução da Carga Solar em Edificações. 2017. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## RESUMO

Revestimentos de alta refletividade são utilizados em superfícies externas para reduzir a troca de calor entre a edificação e o ambiente externo. O presente trabalho apresenta um estudo a fim de avaliar a eficiência de um revestimento com tal propriedade e seu potencial econômico. Faz-se uso de um experimento para estimar um dado que não foi informado pelo fabricante, a emissividade. Com ele é então analisada a carga térmica de resfriamento da cobertura de uma edificação, sendo utilizados balanço de energia, analogia do circuito térmico aplicada no equacionamento de climatização e o software *EnergyPlus* 8.8. O objetivo é comparar a redução da carga solar fazendo uso do revestimento com duas abordagens distintas: uma com o consumo de aparelhos de ar condicionado, e outra com este custo aliado a instalação e aquisição. Tais cenários são estudados através de ferramentas de análise econômica, buscando-se o mais vantajoso para investimento. Os resultados mostram que, ao longo do período de análise, é satisfatória a aplicação do revestimento no caso da edificação ainda não ter sido condicionada, alcançando “*payback*” simples no terceiro ano.

**PALAVRAS-CHAVE:** revestimento de alta refletividade, análise econômica, emissividade, carga térmica de resfriamento.

Eidelwein, S. E. Thermal Analysis of a High Reflectivity Coating and its Application in Edification Solar Load Reduction. 2017. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **ABSTRACT**

High reflectivity coatings are used in external surfaces for reduction of the heat transfer from the environment to the edification. The present work submits a study in order to evaluate the efficiency of a coating with such property. An experiment is made to estimate a parameter that has not been reported by the manufacturer, the emissivity. It is then analyzed the thermal cooling load over the ceiling of an edification, using energy balance, thermal circuit analogy and EnergyPlus 8.8 software. The objective is to compare the solar thermal load reduction provided by the coating with two views: one with the electricity consumption of the air conditioner, and the other allied with the installation and acquisition costs. Those scenarios are measured through economic tools, in order to select the best case to invest in. The results show that for the analysis period, the application of the coating is satisfactory in case the edification is not yet conditioned, achieving simple payback in the third year.

**KEYWORDS:** high reflectivity coating, economic analysis, emissivity, cooling thermal load.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
4.1.	EMISSIVIDADE, ABSORTIVIDADE E REFLETIVIDADE.....	2
4.2.	IRRADIAÇÃO SOLAR.....	3
4.2.1.	GEOMETRIA SOLAR.....	3
4.2.2.	CONSTANTE SOLAR E IRRADIAÇÃO SOLAR EXTRATERRESTRE.....	4
4.2.3.	MODELOS DE CÁLCULO CÉU CLARO.....	4
4.3.	COEFICIENTES CONVECTIVOS.....	5
4.4.	BALANÇO DE ENERGIA.....	6
4.4.1.	BALANÇO DE ENERGIA PARA A ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE.....	6
4.4.2.	BALANÇO DE ENERGIA PARA O CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA.....	6
4.5.	ABORDAGEM COMPUTACIONAL.....	7
4.6.	ARQUIVO CLIMÁTICO.....	7
5.	METODOLOGIA E DISCUSSÕES.....	8
5.1.	ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE.....	8
5.2.	ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA VIA BALANÇO DE ENERGIA.....	9
5.3.	ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA VIA ANALOGIA DO CIRCUITO TÉRMICO.....	11
5.4.	ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA VIA SOFTWARE <i>ENERGYPLUS</i> .....	12
5.5.	DISCUSSÕES ACERCA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS.....	13
6.	ANÁLISE ECONÔMICA E DISCUSSÕES.....	13
7.	CONCLUSÕES.....	14
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
	Apêndice I.....	16
	Anexo I.....	16
	Anexo II.....	17
	Anexo III.....	18

## 1. INTRODUÇÃO

Revestimentos de alta refletividade são basicamente tintas térmicas brancas fabricadas com micro esferas de vidro ou cerâmica contendo ar em seu interior. Essas tintas minimizam de forma considerável a absorção da radiação térmica, sendo amplamente utilizadas em telhas, paredes ou superfícies externas residenciais visando ao conforto térmico. Outras aplicações muito comuns são em coberturas de ambientes de produção, como granjas, galpões e armazéns.

Este tipo de revestimento começou a ser desenvolvido pelo Centro de Voos Espaciais Marshall da NASA em 1993, sendo testado pela primeira vez em voo em 1996, sendo tão bem sucedido que foi implementado em todos os voos subsequentes [NASA, 2007]. No Brasil, os primeiros relatos de utilização são de 2011, já para fins de conforto térmico residencial.

A questão ambiental e o desenvolvimento sustentável também estão presentes, pois a utilização do revestimento pode diminuir de maneira considerável o consumo de energia elétrica, e classificar o ambiente de aplicação como uma construção ou prédio verde. Mesmo que as fontes renováveis de energia brasileiras representem 81,7% da matriz instalada, elas ainda causam danos ambientais, e segundo a EPE, empresa ligada ao Ministério de Minas e Energia, há projeção de crescimento do consumo de energia elétrica para o próximo decênio.

## 2. OBJETIVOS

Com o intuito de um melhor entendimento deste material e fazendo uso de diversos métodos analíticos de transferência de calor, o objetivo deste trabalho é a verificação da eficiência de tais revestimentos de alta refletividade e seu potencial econômico quando aplicado em edificações comerciais e residenciais, levando em conta todos os custos relacionados.

Como a absorvidade e a refletividade do revestimento dependem do material da superfície, do seu acabamento, da temperatura superficial, do comprimento de onda e da direção da radiação incidente [Incropera, 2008], utilizamos algumas condições de contorno simplificadas e médias anuais para o problema transiente.

A metodologia empregada para apresentar a solução foi a de escolher uma edificação modelo e estimar as cargas térmicas relacionadas à cobertura. A edificação selecionada foi um estabelecimento das Lojas Quero-Quero S.A. situada em Gravataí-RS. Todas as variáveis pertinentes ao estudo são representativas da realidade.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos na área de conforto térmico residencial e climatização em geral se concentram principalmente na área da engenharia civil, como na otimização de edificações e ambientes. Não foram encontrados estudos semelhantes sobre o revestimento.

O método tradicional para resolução de problemas de conforto térmico é calcular a carga térmica escolhendo parâmetros em tabelas simplificadas e aplicar em equações reduzidas de transferência de calor, sem a necessidade de uma análise energética aprofundada. Com o uso de revestimentos de alta refletividade, fica inviável o cálculo por tal método, sendo necessário recorrer a técnicas mais abrangentes, como o balanço de energia ao redor do volume de análise e analogias como a de circuito térmico, além de *softwares* especializados nessa área de estudo como o *EnergyPlus*.

Ikematsu, 2007, comparou tintas refletivas com cores correspondentes às tintas convencionais, e verificou seu potencial para melhorar o desempenho térmico de edificações. O comportamento térmico relacionado à refletividade das tintas acabou sendo comprovado sob sua influência na temperatura superficial dos materiais.



Silveira *et al.*, 2012, avaliaram valores de absorvidade e temperatura superficial entre telhas de fibrocimento com diferentes acabamentos superficiais utilizadas na cobertura de edificações construídas no Campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). As opções com melhor desempenho na redução da carga solar foram as telhas novas ou lavadas pintadas de branco.

O uso do software *EnergyPlus* para cálculo de carga térmica de resfriamento pode ser encontrado em diversos trabalhos acadêmicos, entre eles [Liberali, 2010], [Padilha, 2010], [Stein, 2011], [Ness, 2012], [Pietzsch, 2012], [Grass, 2013], [Muller, 2013], [Bellver, 2014], [Schmidt, 2015] e [Rosa, 2015].

Novo *et al.*, 2014, discutiram os fundamentos básicos da teoria sobre emissividade e sua correlação com a composição química e aplicação de tintas refratárias visando a minimizar os custos de consumo energético. Constataram que existe uma falta de estudos específicos na área de medição de emissividade, e que o uso de tintas de alta emissividade é uma alternativa viável para a perda energética quando aplicadas internamente em equipamentos industriais.

Perin, 2009, desenvolveu um equipamento para medir emissividade através do método calorimétrico e radiométrico. Conclui que a emissividade é uma propriedade muito difícil de ser medida, e que para obtenção de valores precisos se faz necessário o uso de equipamentos complexos acoplados a instrumentos de alta precisão.

#### 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados alguns fundamentos de transferência de calor, além de métodos de climatização, a fim de facilitar o cálculo da carga térmica sobre a cobertura da edificação analisada. Foi também utilizada uma abordagem computacional que representa os fenômenos físicos envolvidos.

##### 4.1. EMISSIVIDADE, ABSORTIVIDADE E REFLETIVIDADE

Uma das propriedades radiantes da superfície é a emissividade, definida como a razão entre a radiação emitida pela superfície e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. A emissividade pode assumir diferentes valores de acordo com o fato de se estar interessado na emissão em um dado comprimento de onda ou em uma dada direção, ou então em médias integradas ao longo de comprimentos de onda e direções. Uma generalização que pode ser feita é que a emissividade de materiais não-condutores é em geral superior a 0,6.

Na situação mais geral, a irradiação interage com um meio semitransparente, e porções dessa radiação podem ser refletidas, absorvidas ou transmitidas, como mostra a figura 4.1. Em uma situação mais simples, relacionada à maioria das aplicações em engenharia, o meio é opaco à radiação incidente, e nesse caso, a absorção e a reflexão podem ser tratadas como fenômenos de superfície. É, então, relevante comentar sobre a irradiação sendo absorvida e refletida pela superfície, com suas magnitudes dependendo do comprimento de onda e da natureza do material. Não há qualquer efeito líquido no meio do processo de reflexão, enquanto a absorção tem o efeito de aumentar a energia interna térmica do meio.

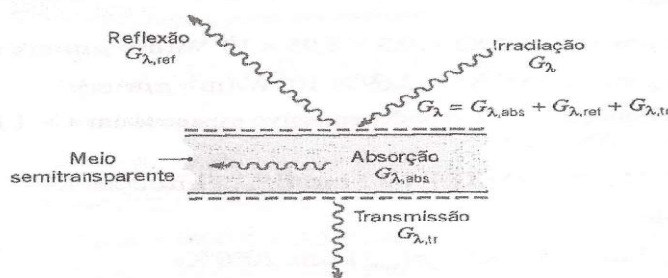


Figura 4.1 – Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente. (Fonte: Incropera, F. P., 2008).

A superfície da cobertura é considerada opaca, logo, a transmissibilidade é igual a zero, e aplicando um balanço de energia, leva à equação abaixo, onde  $\alpha$  é a absorptividade e  $\rho$  a refletividade:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4.1)$$

A irradiação terrestre devido à emissão atmosférica é escrita na seguinte forma:

$$G_{atm} = \sigma T_{c\acute{e}u}^4 \quad (4.2)$$

na qual  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, que é igual a  $5,669 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ , e  $T_{c\acute{e}u}$  é conhecida como a temperatura efetiva do céu. Seu valor depende das condições atmosféricas, variando de um valor baixo como 230K para um céu frio e claro, até um valor de 286K para quente e encoberto.

Como a radiação do céu estará concentrada aproximadamente na mesma região espectral da radiação emitida pela superfície de análise, é razoável admitir que:

$$\alpha_{c\acute{e}u} = \varepsilon \quad (4.3)$$

## 4.2. IRRADIAÇÃO SOLAR

Um método para estimar a irradiação solar sobre qualquer ponto são os modelos de céu limpo, que levam em consideração um céu sem nuvens em função do ângulo de elevação solar, altitude, massa de ar relativa, entre outros.

### 4.2.1 GEOMETRIA SOLAR

A intensidade do Sol depende da posição relativa do observador na superfície da Terra. Em ângulos de zênite maiores, a radiação passa por uma maior massa de ar, logo os modelos de céu claro requerem parâmetros geométricos que descrevem esses ângulos ao longo do ano, e estes são citados abaixo.

Um deles é a declinação solar, que é o ângulo entre o Equador e a Celeste Eclíptica, e varia ao longo do ano pelo fato da Terra ser desalinhada em aproximadamente  $23,45^\circ$  no seu plano orbital, como mostra a Figura 4.2.

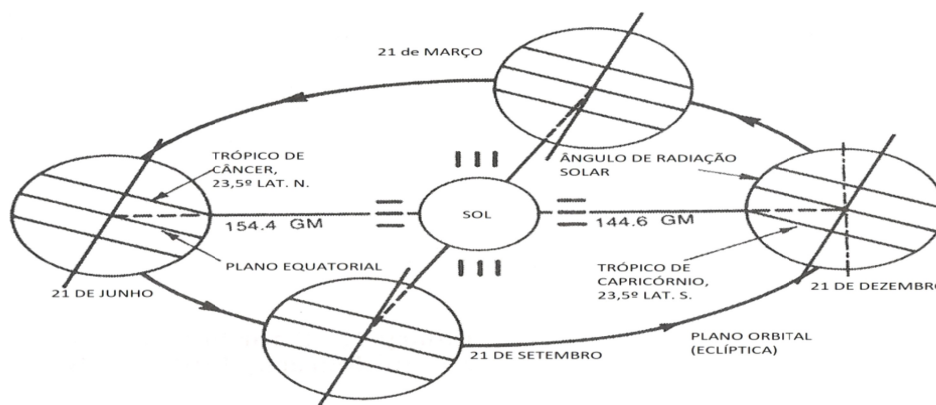


Figura 4.2 – Translação da Terra. (Fonte: ASHRAE Handbook: Fundamentals; 2009)

Para a maioria das aplicações de engenharia, a declinação solar tem precisão suficiente com a seguinte equação, dada em graus:

$$\delta = 23,45 \text{ sen}(d) \quad (4.4)$$

onde  $n$  é o dia do ano e  $d$  é a correção para o dia do ano, com valor entre 1 e 365:

$$d = \frac{360^\circ}{365}(n - 81) \quad (4.5)$$

O ângulo horário ( $\omega$ ) é o ângulo entre o meridiano local e o meridiano que contém o astro, em graus, onde cada hora solar aparente ( $AST$ ) representa uma variação de  $15^\circ$ , como representado na equação (4.5):

$$\omega = 15(AST - 12) \quad (4.6)$$

em que

$$AST = LST + EOT - 4LSM \quad (4.7)$$

onde  $LST$  é a hora local já contabilizado horário de verão,  $EOT$  é a equação do tempo, que representa a variação do tempo médio mantido por um relógio a uma taxa uniforme e  $LSM$  é o meridiano padrão local, sendo  $EOT$  calculado abaixo:

$$EOT = 9,87\text{sen}(2d) - 7,53 \cos(d) - 1,5\text{sen}(d) \quad (4.8)$$

O ângulo de zênite ( $z$ ) para qualquer data, local e horário pode ser calculado com a equação que segue [Reno *et al.*, 2012]:

$$\cos(z) = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \text{sen}\phi \text{sen}\delta \quad (4.9)$$

com  $\phi$  igual a latitude.

#### 4.2.2 CONSTANTE SOLAR E IRRADIAÇÃO SOLAR EXTRATERRESTRE

A constante solar  $E_{sc}$  é definida como a taxa solar que incide sobre uma superfície com orientação normal aos raios solares no limite externo da atmosfera terrestre. Ela vale  $E_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ . A irradiação solar extraterrestre,  $E_o$ , definida para uma superfície normal aos raios solares, depende da hora do dia e do dia do ano. Ela pode ser determinada por uma expressão com a forma

$$E_o = E_{sc} \left\{ 1 + 0,033 \cos \left[ 360^\circ \frac{n-3}{365} \right] \right\} \quad (4.10)$$

#### 4.2.3 MODELOS DE CÁLCULO CÉU CLARO

Existem vários modelos para determinar a irradiação solar em um dia claro, e a maioria possui equacionamento simples, pois levam em consideração somente a irradiação solar extraterrestre normal aos raios solares ( $E_o$ ), e o ângulo de zênite ( $z$ ). Quanto maior este ângulo, maior a massa de ar que os raios solares percorrem, e conseqüentemente, menor a irradiação solar incidente. Dentre esses modelos, três são considerados para o trabalho:

-[Berger-Duffie, 1979]:

$$G_{sol} = 0,7E_o \cos(z) \quad (4.11)$$

onde  $G_{sol}$  é a irradiação solar, em  $\text{W/m}^2$ .

-[Meinel, 1976]:

$$G_{sol} = E_0 0,7 AM^{0,678} \quad (4.12)$$

onde  $AM$  é a massa de ar reduzida, parâmetro adimensional representado pela equação abaixo:

$$AM = \frac{1}{\cos(z)} \quad (4.13)$$

-[Adnot–Bourges–Campana–Gicquel, 1979]:

$$G_{sol} = 951,39(\cos(z))^{1,15} \quad (4.14)$$

### 4.3 COEFICIENTES CONVECTIVOS

A troca de calor por convecção tem papel fundamental no problema do trabalho, pois está presente na superfície externa e interna da cobertura, fazendo-se necessário encontrar os coeficientes convectivos a partir de correlações estabelecidas para cada caso.

Para a superfície externa, a telha ondulada foi considerada uma placa plana, e seu escoamento calculado como laminar, logo seu coeficiente de transferência de calor médio é

$$\bar{h}_x = k 0,664 Re_x^{-1/2} Pr^{1/3} / x \quad (4.15)$$

onde  $\bar{h}_x$  é o coeficiente de transferência de calor médio,  $k$  é a condutividade térmica do fluido,  $Pr$  é o número de Prandtl (razão entre a difusividade de momento e a difusividade térmica), propriedade do material,  $x$  é o comprimento característico da placa, e  $Re_x$  é o número de Reynolds, calculado a partir de

$$Re_x = \rho u_\infty x / \mu \quad (4.16)$$

onde  $u_\infty$  é a velocidade de corrente livre do fluido,  $\rho$  é a massa específica e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica, ambas tabeladas a temperatura do fluido.

A superfície interna da cobertura é considerada como um espaço confinado, com cavidade retangular, pé direito ( $L$ ) de 3m, largura ( $H$ ) de 12m, com número de Rayleigh

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_1 - T_2) L^3}{\varpi \nu} \quad (4.17)$$

em que  $g$  é a aceleração da gravidade,  $T_1$  é a temperatura da superfície aquecida,  $T_2$  é a temperatura da superfície resfriada,  $\varpi$  é o coeficiente de energia cinética do fluido,  $\nu$  é a viscosidade dinâmica do fluido e  $\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrica térmica com valor válido para gases ideais:

$$\beta = 1/T_f \quad (4.18)$$

onde  $T_f$  é a temperatura de filme.

Considerando estes valores, chegamos à correlação abaixo, de [Catton, 1978]

$$\bar{h} = (0,22k \left( \frac{Pr}{0,2+Pr} Ra_L \right)^{0,28} \left( \frac{H}{L} \right)^{-1/4}) / L \quad (4.19)$$

em que  $\bar{h}$  é igual ao coeficiente de transferência de calor médio.

#### 4.4 BALANÇO DE ENERGIA

A fim de solucionar o problema proposto, tanto para a análise da carga térmica quanto para a determinação do valor da emissividade do revestimento, foram avaliados balanços de energia em duas regiões: uma na superfície externa da cobertura, e outra considerando a cobertura da edificação como um sistema.

##### 4.4.1 BALANÇO DE ENERGIA PARA A ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE

Os fenômenos considerados para a superfície externa da cobertura foram a troca líquida de calor por radiação para a sua vizinhança  $q_{rad}''$ , a convecção para um fluido  $q_{cv}''$  e a irradiação solar incidente.



Figura 4.3 – Balanço de energia em uma superfície submetida à radiação solar.

Considerando a superfície difusa e não cinza, obtém-se:

$$\alpha_{sol} G_{sol} - h(T_s - T_{\infty}) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{céu}^4) = 0 \quad (4.20)$$

em que  $T_s$ ,  $T_{\infty}$  e  $T_{céu}$  são as temperaturas de superfície, fluido e vizinhança, respectivamente.

##### 4.4.2 BALANÇO DE ENERGIA PARA O CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

Para a cobertura da edificação, foram considerados os fluxos térmicos vistos na figura 4.4, onde  $T_{s,e}$  é a temperatura da superfície externa,  $T_{\infty,e}$  é a temperatura do fluido externo,  $E_{CN,s}$  é a radiação emitida pelo corpo negro à temperatura da superfície externa,  $q_{cv,e}''$  é o fluxo de calor por convecção externo por unidade de área,  $T_{s,i}$  é a temperatura da superfície interna, logo abaixo do forro,  $T_i$  é a temperatura interna,  $q_{rad3}''$  é o fluxo de calor por radiação por unidade de área da camada de ar e os termos  $q_{cd}''$ ,  $q_{cd}''$ ,  $q_{cd3}''$  e  $q_{cd4}''$ , representam os fluxos de calor por condução do revestimento, telha, camada de ar e o forro, respectivamente.

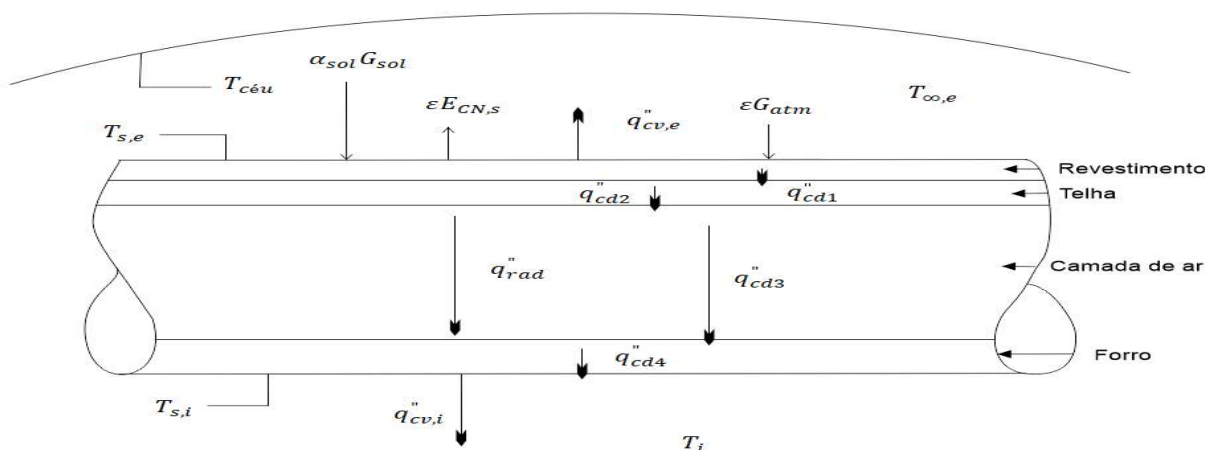


Figura 4.4 – Balanço de energia na cobertura da edificação.

Considerando  $q_{RF}''$  como o fluxo de calor do revestimento ao forro, temos:

$$q_{RF}'' = -q_{cv,e}'' + \alpha_{sol} G_{sol} - \varepsilon E_{CN,s} + \varepsilon G_{atm} \quad (4.21)$$

$$q_{RF}'' = q_{cv,i}'' \quad (4.22)$$

#### 4.5 ABORDAGEM COMPUTACIONAL

A ferramenta computacional utilizada foi o *EnergyPlus*, desenvolvido pelo departamento de energia dos Estados Unidos (DOE), e atualmente na versão 8.8. O programa se destaca por sua versatilidade, podendo ser empregado em qualquer problema conhecidas as condições de contorno.

Conforme o Engineering Reference, 2015, a equação utilizada pelo programa nas zonas térmicas é:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superf.}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m} C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (4.23)$$

em que  $C_z \frac{dT_z}{dt}$  é a energia acumulada no volume de ar da zona térmica,  $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  é a soma das cargas internas convectivas,  $\sum_{i=1}^{N_{superf.}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é o termo de transferência de calor convectivo pelas superfícies das zonas,  $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m} C_p (T_{zi} - T_z)$  é o termo de transferência de calor pela infiltração de ar de outras zonas,  $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  é o termo de transferência de calor pela infiltração de ar externo, e  $\dot{Q}_{sys}$  é o fluxo de calor pelo sistema de condicionamento de ar.

#### 4.6 ARQUIVO CLIMÁTICO

Para estimar dados do ambiente empregados na metodologia de solução do problema e para aplicação computacional, um arquivo climático se faz necessário, pois ele contém informações como temperatura, umidade relativa, temperatura de orvalho, radiação solar, pressão atmosférica, velocidade do vento, azimute do vento.

O arquivo foi produzido pelo LABEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC, que reúne as informações supracitadas para certos locais, de no mínimo 10 anos, na forma de ano climático com 8760 horas.

Na Figura 4.5 abaixo é possível visualizar uma dessas informações.

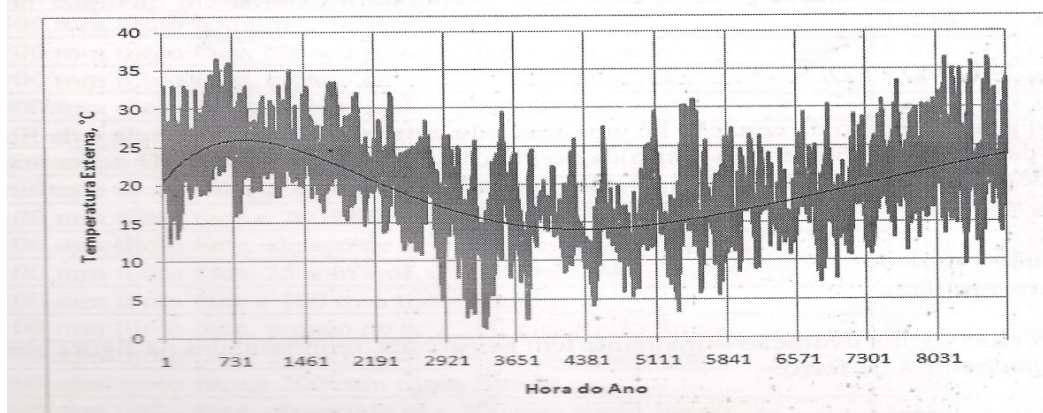


Figura 4.5 – Temperatura de bulbo seco x horas do ano em Porto Alegre. (Fonte: Beyer P.O.; 2013)

## 5. METODOLOGIA E DISCUSSÕES

Neste capítulo o problema será descrito e tratado, com todas suas peculiaridades e condições de contorno envolvidas.

### 5.1. ESTIMATIVA DA EMISSIVIDADE

Não havendo dados do fabricante sobre a emissividade, montou-se um experimento para sua estimativa. Foi usada uma estrutura que consiste em uma telha de fibrocimento de área quadrada com 0,5m de lado, revestida com o material de estudo. Sua superfície inferior foi isolada com lã de vidro, para se negligenciar de maneira efetiva o fluxo de calor para a estrutura. A figura abaixo ilustra de maneira clara a estrutura.

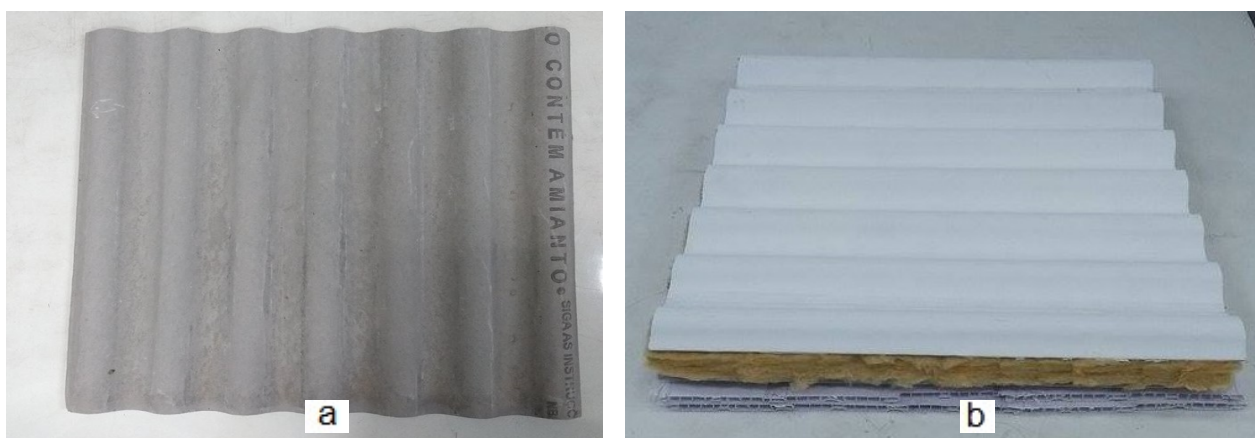


Figura 5.1 – (a) Telha de fibrocimento utilizada na edificação; (b) Estrutura montada, com a aplicação do revestimento.

A estrutura foi então submetida à radiação solar e conectada a termopares tipo R (Platina/Ródio-Platina) ligados a um sistema com interface computacional para medir a temperatura em diversos pontos, sendo eles: na superfície superior da telha revestida, na superfície inferior da telha e na superfície abaixo do isolante térmico. Esses pontos, juntos com suas disposições, podem ser vistos na Figura 5.2.

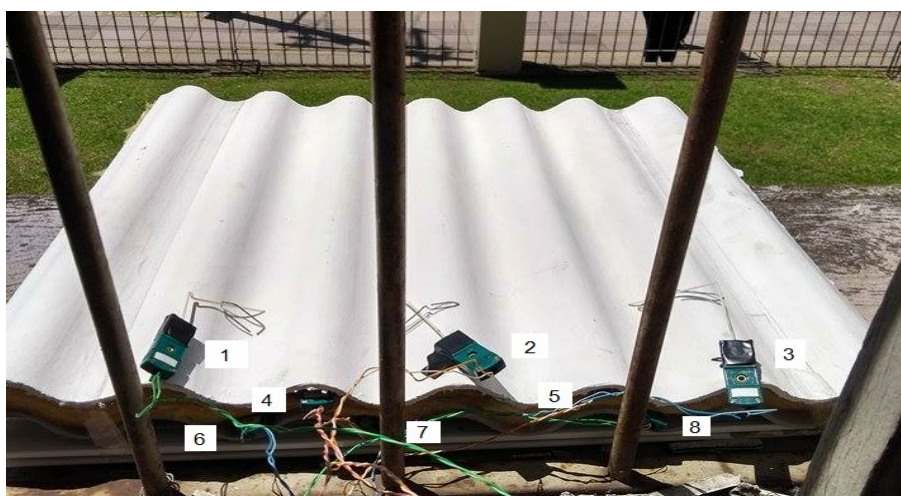


Figura 5.2 – Experimento durante sua medição com a disposição dos termopares: Superfície superior da telha revestida (1,2 e 3), superfície inferior da telha (4 e 5) e superfície abaixo do isolante térmico (6,7 e 8).

Foram coletados dados de temperatura de diversos períodos. A Figura 5.3 mostra os resultados obtidos em um dia de céu claro:

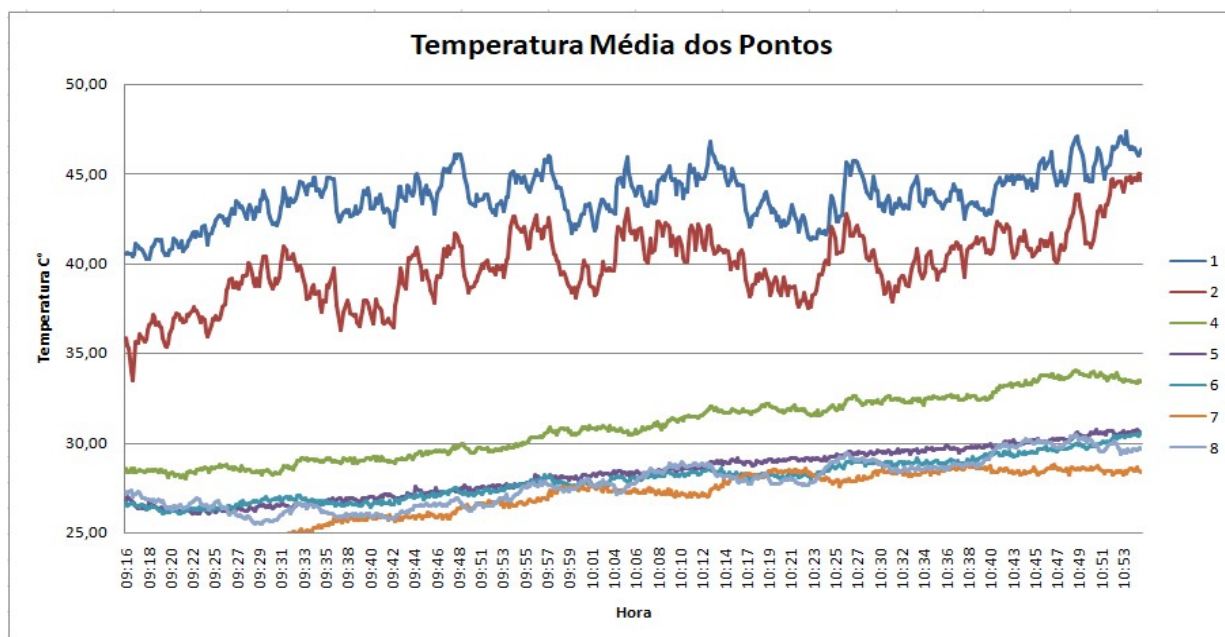


Figura 5.3 – Temperatura medida VS hora do dia, termopar “3” ficou fora do gráfico, pois apresentou defeito após montagem.

Considerando-se as médias das temperaturas e horários, as condições climáticas de Porto Alegre, junto com  $\alpha_{sol} = 0,237$  e  $T_{céu} = 286K$ , temos, aplicando na equação 4.20 de balanço da superfície superior da telha, o valor de  $\varepsilon = 0,65$  para a emissividade do revestimento. Percebe-se que segundo [Incropera, 2008], o valor é adequado para um material não condutor.

A incerteza da medição pela propagação de erros de acordo com a equação 5.1 foi de  $\Delta\varepsilon = 8,48\%$ , para o limite de erro na faixa de temperatura de cada termopar utilizado  $\sigma_T$  de  $1,5^\circ C$ .

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial T}\right)^2 \sigma_T^2} \quad (5.1)$$

## 5.2. ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA VIA BALANÇO DE ENERGIA

A carga térmica é resolvida na maioria das aplicações de engenharia por equações reduzidas de transferência de calor, pois o balanço de energia nas fronteiras de edificação tornaria o problema com dimensões e variáveis complexas. Todavia, na análise térmica do revestimento enfrentamos este problema, visto que as equações e tabelas de climatização não contemplam materiais específicos.

Para começar a determinação dessas variáveis, é necessário conhecer primeiro as resistências à transferência de calor pelos mecanismos físicos envolvidos (condução, convecção e radiação), e são intrínsecas aos materiais utilizados na cobertura da edificação, podendo ser avaliados na Tabela 5.1.



Tabela 5.1 – Materiais utilizados com seus índices de condutividade térmica e espessuras.

<b>Material</b>	<b>Condutividade Térmica (k)</b>	<b>Dimensão na direção da Transferência de Calor (L)</b>
Revestimento	0,00345	0,00025
Telha Fibrocimento	0,35	0,005
Camada de Ar Parado	0,024	0,5
Forro PVC	0,21	0,01

O equacionamento que rege o caso é derivado das equações (4.21) e (4.22), que podem ser expressas como

$$\frac{T_{s,e} - T_i}{R_{cd1} + R_{cd2} + \left( \frac{1}{R_{cd3}} + \frac{1}{R_{rad3}} \right) + R_{cd4} + R_{cv,i}} = \frac{T_{\infty,e} - T_{s,e}}{R_{cv,e}} + \alpha_{sol} G_{sol} - \varepsilon \sigma T_{s,e}^4 + \varepsilon \sigma T_{céu}^4 \quad (5.2)$$

$$\frac{T_{s,e} - T_{s,i}}{R_{cd1} + R_{cd2} + \left( \frac{1}{R_{cd3}} + \frac{1}{R_{rad3}} \right) + R_{cd4}} = \frac{T_{s,i} - T_i}{R_{cv,i}} \quad (5.3)$$

onde, considerando  $R_{cv,e}$  com valor encontrado na medição da emissividade, temos as temperaturas  $T_{s,e}$  e  $T_{s,i}$ , junto com a resistência a convecção interna  $R_{cv,i}$ , incógnitas do problema. De acordo com a equação 4.19 aplicada ao problema, os dois últimos termos se relacionam, deixando o problema com duas equações e duas incógnitas, passível de solução. A tabela 5.2 mostra os valores das resistências térmicas, com a resistência a radiação  $R_{rad3}$  dada pela ABNT NBR 15220-2 (2003).

Tabela 5.2 – Valores das resistências térmicas que compõe o problema.

<b>Resistência Térmica</b>	<b>Valor (<math>m^2 K/W</math>)</b>
$R_{cd1}$	0,0714
$R_{cd2}$	0,0142
$R_{cd3}$	20,8333
$R_{rad3}$	0,21
$R_{cv,e}$	0,1029
$R_{cv,i}$	Iterado
$R_{cd4}$	0,0476

Aplicando nas equações 5.2 e 5.3 os valores de resistências, as temperaturas prescritas para conforto térmico no verão  $T_i$ , e das condições do local  $T_{\infty,e}$  e  $T_{céu}$ , radiação solar incidente no seu pico, além da emissividade calculada e resolvendo o sistema de modo iterativo, foi encontrado o fluxo térmico por unidade de área  $Q'' = 12,02 W/m^2$ , ou então, adicionando a área, a carga térmica de resfriamento de  $Q = 10.940 W$ .

De maneira análoga, foi calculada a carga térmica sem a aplicação do revestimento, considerando segundo [Ikematsu, 2007] e [Silveira et al., 2012],  $\alpha_{sol} = 0,593$  e  $\varepsilon = 0,9$ . Os valores para o fluxo térmico e taxa de transferência de calor foram, respectivamente  $Q'' = 28,09 W/m^2$  e  $Q = 25.564 W$ .

### 5.3. ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA VIA ANALOGIA DO CIRCUITO TÉRMICO

Resolvendo-se o problema pelo equacionamento reduzido de climatização, nos deparamos com a seguinte equação solução para a carga térmica de resfriamento sobre a cobertura [Beyer P.O.; 2013]:

$$Q = UA\Delta T = UA[(DTCR + LM)K_f + CTIE]f \quad (5.4)$$

onde  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor,  $A$  é a área da cobertura e  $\Delta T$  (diferença de temperatura) é calculado a partir do conhecimento dos fatores  $DTCR$ , que é o Diferencial de Temperatura da Carga de Resfriamento em  $^{\circ}\text{C}$ ,  $LM$  que representa uma correção para Latitude e Mês de cálculo em  $^{\circ}\text{C}$ ,  $K_f$  que é um fator de correção que leva em conta a cor das telhas,  $CTIE$  que significa Correção para Temperaturas Interna e Externa e  $f$  fator de correção para a ventilação do forro.

Para resolvê-la, encontra-se o valor de  $U$  em uma tabela com os tipos de forro, porém nenhum deles corresponde ao forro de PVC utilizado na edificação, fazendo-se necessária a solução do problema por outra abordagem.

A analogia do circuito térmico permite relacionar o coeficiente global de transferência de calor  $U$ , com associações de resistências a transferência de calor unidimensional, pela seguinte equação:

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} \quad (5.5)$$

em que  $R_{tot}$  é a resistência em  $\frac{\text{K}}{\text{W}}$  entre os dois lados do forro, com sua discretização ilustrada na figura abaixo.

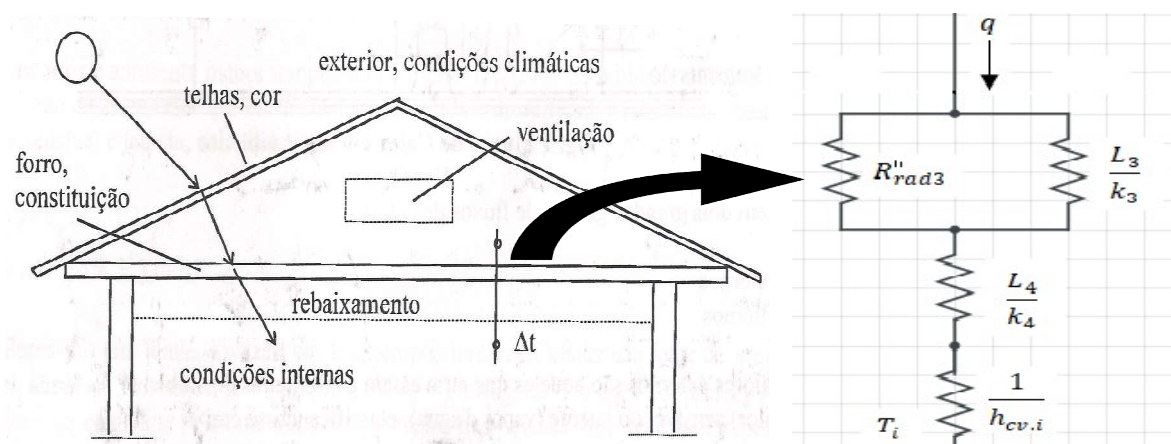


Figura 5.4 – Circuito térmico com as resistências para a cobertura da edificação. (Fonte: Beyer P.O.; 2013)

De modo simplificado, aplicando os valores de resistência encontrados nos outros itens, temos que  $U = \frac{1}{1,270} \text{W}/\text{m}^2\text{K}$  ou  $U = 0,787 \text{W}/\text{m}^2\text{K}$ .

Para estimar a carga térmica de resfriamento, foram considerados os fatores da equação 5.2, as condições meteorológicas de projeto, a orientação da edificação e selecionado um forro com características semelhantes para podermos estimar a inércia térmica para o  $DTCR$ . Também foi modificado o termo relativo à cor da telha  $K_f$  para a absorvidade  $\alpha_{sol}$ . Assim, com o auxílio das tabelas I.1 a III.1 do anexo, foi encontrado o valor de  $Q = 8935 \text{W}$ . De

maneira análoga, foi estimada a carga de resfriamento sem o revestimento, que foi de  $Q = 22916W$  com  $U = 0,909W/m^2K$ .

#### 5.4. ANÁLISE DA CARGA TÉRMICA VIA SOFTWARE ENERGYPLUS

Para complementar os cálculos já realizados, foi utilizado o cálculo da carga também pelo método computacional.

Primeiro foram colocados os dados climáticos de Porto Alegre, por falta de dados climáticos da cidade de Gravataí. Após foram modelados os materiais das paredes e piso, somente com o cuidado do material ter resistência térmica semelhante aos da edificação original, pois o interesse é na cobertura, que foi devidamente selecionada com suas diferentes camadas.

Foi colocado ponto de controle no interior da edificação para manter a temperatura às condições de conforto térmico para o verão,  $T_i = 24,5^\circ C$ , e então simulado o programa para se obter a carga térmica de resfriamento para o período selecionado, com os valores obtidos abaixo.



Figura 5.5 – Valores de carga de resfriamento para a edificação com uso do revestimento em um dia de análise com carga solar média para o verão. (Fonte: *EnergyPlus 8.8*)

De maneira análoga, foi obtido o valor para a edificação sem o uso do revestimento.

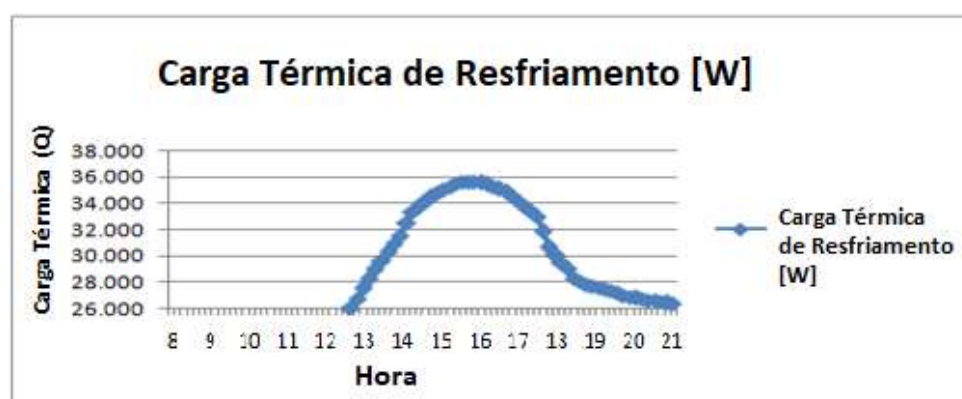


Figura 5.6 – Valores de carga de resfriamento para a edificação sem uso do revestimento em um dia de análise com carga solar média para o verão. (Fonte: *EnergyPlus 8.8*)

A carga térmica apresentou valores diferentes dos calculados pelos outros métodos, dada a carga completa da edificação. O interesse, porém, é analisar a diferença dos valores obtidos pelos dois gráficos, que se mantêm coerentes com a redução de aproximadamente  $14.000W$  dos outros dois métodos.

## 5.5. DISCUSSÕES ACERCA DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

A Tabela 5.3 apresenta a comparação entre os resultados encontrados através dos métodos utilizados no capítulo. O uso do revestimento apresentou uma redução próxima de 60% na carga de resfriamento na edificação, o que aponta sua eficiência na redução da carga solar. A diferença percentual entre os valores obtidos no método do balanço com o da analogia do circuito térmico para o uso do revestimento é levemente alta, porém pode ser explicada de maneira que o segundo não levou em consideração a emissividade do revestimento. A possível explicação é que como a maioria dos materiais de cobertura tem emissividades próximas à unidade, as equações reduzidas de transferência de calor levam em conta um valor padrão como  $\varepsilon = 0,95$ . No software *EnergyPlus*, a entrada de dados para os materiais utilizados também não permite selecionar este valor. Este é o possível motivo do fabricante do revestimento não informar o valor de  $\varepsilon$ .

Tabela 5.3 – Valores de carga de resfriamento obtidos nos métodos.

Método	Q (Aplicado o Revestimento) (W)	Q (Sem o Revestimento) (W)	$\Delta Q$ (W)	Percentual de Redução
Balanço	10.940	25.564	14.624	57,2%
Circuito	8.935	22.916	13.981	61,0%
Computacional	-	-	14.224	-

## 6. ANÁLISE ECONÔMICA E DISCUSSÕES

Com os dados obtidos no capítulo anterior, foi feita uma análise econômica baseada na eficiência do revestimento. As ferramentas utilizadas foram o método do “payback” simples e do Valor Presente Líquido (VPL), que aliado de fluxo de caixa acumulado, consegue prever qual a melhor situação para investimento. A taxa utilizada no método VPL é a taxa mínima de atratividade, que representa o mínimo de retorno que o executor do investimento deseja. Esse método compara possíveis investimentos, e na análise do trabalho, tem valor positivo se a aplicação do revestimento é economicamente viável.

Considerando os dados de carga térmica, todos os custos envolvidos (Apêndice I), a inflação, o tempo de operação anual do sistema de condicionamento de ar, o coeficiente de desempenho dos aparelhos de ar-condicionado e que  $3,517kW = 12.000BTU/h$ , tem-se o fluxo de caixa para uma edificação que ainda não possui aparelhos de ar-condicionado na Tabela 5.4. Para uma edificação que já possui tais aparelhos, os resultados são apresentados na Tabela 5.5. Neste tipo de caso a despesa pode ficar positiva, pois os fluxos de caixas ao invés de apresentarem somente um investimento estão fazendo uma comparação entre dois deles.

Tabela 5.4 – Análises econômicas para edificação sem condicionamento de ar (Comparação entre aplicar o revestimento e adquirir aparelhos de ar-condicionado).

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Despesa Produto	R\$ 241,56	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Despesa Aplicação/Instalação	-R\$ 7.500,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Economia Energia	R\$ -	R\$ 2.940,51	R\$ 3.049,31	R\$ 3.162,13	R\$ 3.279,13	R\$ 3.400,46
Fluxo de Caixa	-R\$ 7.258,44	R\$ 2.940,51	R\$ 3.049,31	R\$ 3.162,13	R\$ 3.279,13	R\$ 3.400,46
Fluxo de Caixa Acumulado	-R\$ 7.258,44	-R\$ 4.317,93	-R\$ 1.268,62	R\$ 1.893,51	R\$ 5.172,65	R\$ 8.573,11
Payback (Meses)	29	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
VPL	R\$ 3.612,44	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -

E para uma edificação que já possui tais aparelhos:

Tabela 5.5 – Análises econômicas para edificação com condicionamento de ar (Comparação entre aplicar o revestimento e usar aparelhos de ar-condicionado já existentes).

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
<i>Despesa Produto</i>	-R\$ 4.558,44					
<i>Despesa Aplicação/Instalação</i>	-R\$ 9.100,00					
<i>Economia Energia</i>		R\$ 2.940,51	R\$ 3.049,31	R\$ 3.162,13	R\$ 3.279,13	R\$ 3.400,46
<i>Fluxo de Caixa</i>	-R\$ 13.658,44	R\$ 2.940,51	R\$ 3.049,31	R\$ 3.162,13	R\$ 3.279,13	R\$ 3.400,46
<i>Fluxo de Caixa Acumulado</i>	-R\$ 13.658,44	-R\$ 10.717,93	-R\$ 7.668,62	-R\$ 4.506,49	-R\$ 1.227,35	R\$ 2.173,11
<i>Payback (Meses)</i>	52					
<i>VPL</i>	-R\$ 2.099,29					

Embasando-se nas tabelas, é possível afirmar que o investimento neste tipo de revestimento no caso da edificação não condicionada é viável, pois a diferença no custo de investimento é relativamente pequena, sendo recuperada ao longo do terceiro ano. De modo análogo, à taxa mínima de atratividade de 12,05%, e inflação de 3,7%, o investimento em uma edificação condicionada é economicamente desfavorável, apesar do fluxo de caixa zerar no quinto ano.

Isso acontece devido ao alto custo de aplicação e aquisição do revestimento, e a razão de eficiência energética de aparelhos de ar-condicionado, com valor médio  $REE = 3$ , ou seja, para cada 3J que tiram de calor do ambiente, consomem somente 1J em energia elétrica.

Apesar da dificuldade de aplicação do revestimento na cobertura, ela não precisa ser necessariamente feita por mão-de-obra terceirizada, eliminando a maior despesa associada e tornando o investimento da edificação já condicionada vantajoso.

## 7. CONCLUSÕES

O principal objeto de estudo proposto foi à eficiência do revestimento na redução da carga solar e seu possível potencial econômico.

Os diferentes métodos propostos apresentaram bons resultados e diferenças entre si consideradas adequadas dentro de um projeto de conclusão de curso. Uma dificuldade encontrada foi a de trabalhar com o programa *EnergyPlus* com eficiência. O software encontra-se com uma interface pouco interativa e com bibliografia de suporte não aplicável a diversos casos.

O revestimento se mostrou eficiente na redução da carga solar, com reduções por volta de 60% devido à sua alta refletividade. Apesar dessa informação, ele mostrou que não é solução imediata para o alto consumo de energia elétrica devido ao condicionamento de ar, sendo aplicado de forma economicamente eficiente somente em novos projetos de condicionamento.

O tema é de fundamental importância com o crescimento de alternativas ecológicas e sustentáveis, provando que prédios verdes podem ser economicamente viáveis. O revestimento apresenta uma boa alternativa a projetos de edificações visando à certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), concedida pela Organização não governamental americana U.S. Green Building Council, que incentiva critérios de racionalização de recursos.

A continuidade do trabalho se divide no aperfeiçoamento dos modelos utilizados e no estudo desse revestimento em paredes externas. Para o primeiro caso, recomenda-se refinar as condições de contorno utilizadas e aplicar em locais com diferentes cargas solares. Para o segundo, pode-se analisar pelos mesmos métodos a possível redução das cargas e inércias térmicas oriundas da carga solar. A aplicação em paredes oferece uma possibilidade de redução no custo de aplicação, e possivelmente oferece retorno financeiro mesmo com diferença de carga térmica menos significativa.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15520-2 2003: **“Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações”**.

ASHRAE; **“ASHRAE Handbook: Fundamentals”**, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009.

Beyer, P.O.; **“Climatização: Ventilação, aquecimento, refrigeração e ar condicionado”**. 1ª Edição. Porto Alegre: 2013.

ENERGYPLUS; **“Getting Started with EnergyPlus – Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running EnergyPlus”**, Version 8.3, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, EUA, 2015.

Incropera, F.P.; Dewitt, D.P.; **“Fundamentos de transferência de Calor e de Massa”**, LTC, 6. Ed.; Rio de Janeiro, 2008.

Ikematsu, P.; **“Estudo da Refletância e sua Influência no Comportamento Térmico de Tintas Refletivas e Convencionais de Cores Correspondentes”**, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NASA; **“SPINOFF 2007”**, National Aeronautics and Space Administration, 2007.

Novo, M.M.M.; Bitencourt, C.S.; Tiba, P.R.T.; Silva, D.G.M.; Pandolfelli, V.C.; **“Fundamentos Básicos da Emissividade e sua Correlação com os Materiais Refratários, Conservação de Energia e Sustentabilidade”**, Universidade Federal de S. Carlos, S. Carlos, 2014.

Perin, A.L.; **“Desenvolvimento de um Equipamento para Medição de Emissividade”**, Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Reno, M.J.; Hansen C.W.; Stein, J.S.; **“Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis”**, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2012.

Silveira, R.; Marinoski, D.L.; Lamberts, R.; **“Avaliação da Absortância à Radiação Solar e Temperatura Superficial de Telhas de Fibrocimento Utilizadas nas Coberturas de Edificações do Campus da UFSC”**, Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Juiz de Fora, 2012.

## APÊNDICE I – Custos envolvidos na análise econômica.

<i>Item</i>	<i>Quantidade Necessária</i>	<i>Custo Base (R\$)</i>	<i>Valor Total (R\$)</i>
Revestimento ( Balde - 77 m <sup>2</sup> )	12	390	4680
Aplicação Revestimento (m <sup>2</sup> )	910	10	9100
Aparelho Ar-condicionado 12.000 BTU/h	4	1200	4800
Instalação Ar-Condicionado	4	400	1600
kWh (Utilização: 10h/dia;25 dias/mês;4 meses/ano)	4820	0,61	2940

ANEXO I – Tabela para  $U$  e  $n^{\circ}$  de forro.Tabela I.1 – Valores de número de forro e  $U$  para diversos tipos de forro.

Descrição da Construção	Sem rebaixamento		Com rebaixamento	
	Forro N <sup>o</sup>	$U, W/m^2\text{°C}$	Forro N <sup>o</sup>	$U, W/m^2\text{°C}$
Chapa aço + isolante 25 mm	1	1.209	19	0.761
Chapa aço + isolante 50 mm	2	0.704	20	0.522
Madeira 25 mm + isolante 25 mm	3	0.965	21	0.653
Concreto leve 100 mm	4	1.209	22	0.761
Concreto pesado 50 mm + isol. 25 mm	5	1.170	23	0.744
Concreto pesado 50 mm + isol. 50 mm	6	0.693	24	0.515
Madeira 25 mm + isol. 50 mm	7	0.619	25	0.471
Concreto leve 150 mm	8	0.897	26	0.619
Madeira 64 mm + isol. 25 mm	9	0.738	27	0.545
Concreto leve 200 mm	10	0.715	28	0.528
Concreto pesado 100 mm + isol. 25 mm	11	1.136	29	0.727
Concreto pesado 100 mm + isol. 50 mm	12	0.681	30	0.511
Madeira 64 mm + isol. 50 mm	13	0.528	31	0.409
Terraço	14	0.602	32	0.466
Concreto pesado 150 mm + isol. 25 mm	15	1.090	33	0.710
Concreto pesado 150 mm + isol. 50 mm	16	0.664	34	0.499
Madeira 100 mm + isol. 25 mm	17	0.602	35	0.465
Madeira 100 mm + isol. 50 mm	18	0.443	36	0.363

ANEXO II – Tabela para fator *DTCR*Tabela II.1 – Valores para *DTCR*.

Fo	Hora Solar																							
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	-1	-2	-2	-3	-2	3	11	19	27	34	40	43	44	43	39	33	25	17	10	7	5	3	1
2	0	-1	-2	-2	-3	-2	3	11	19	27	34	40	43	44	43	39	33	25	17	10	7	5	3	1
3	3	2	0	-1	-2	-2	-1	2	8	15	22	29	35	39	41	41	39	35	29	21	15	11	8	5
4	5	3	1	0	-1	-2	-2	1	5	11	18	25	31	36	39	40	40	37	32	25	19	14	10	7
5	7	5	3	2	0	-1	0	2	6	11	17	23	28	33	36	37	37	34	30	25	20	16	12	10
6	7	5	3	2	0	-1	0	2	6	11	17	23	28	33	36	37	37	34	30	25	20	16	12	10
7	2	0	-2	-3	-4	-4	-4	-2	3	9	15	22	27	32	35	36	35	32	27	20	14	10	6	3
8	12	10	7	5	3	2	1	0	2	4	8	13	18	24	29	33	35	36	35	32	28	24	19	16
9	16	13	11	9	7	6	4	3	4	5	8	11	15	19	23	27	29	31	31	30	27	25	22	19
10	20	17	14	12	10	8	6	5	4	4	5	7	11	14	18	22	25	28	30	30	29	27	25	22
11	14	12	10	8	7	5	4	4	6	8	11	15	18	22	25	28	29	30	29	27	24	21	19	16
12	14	12	10	8	7	5	4	4	6	8	11	15	18	22	25	28	29	30	29	27	24	21	19	16
13	18	15	13	11	9	8	6	5	5	5	7	10	13	17	21	24	27	28	29	29	27	25	23	20
14	19	17	15	14	12	11	9	8	7	8	8	10	12	15	18	20	22	24	25	26	25	24	22	21
15	18	16	14	12	11	10	9	8	8	9	10	12	15	17	20	22	24	25	25	25	24	22	20	19
16	18	16	14	12	11	10	9	8	8	9	10	12	15	17	20	22	24	25	25	25	24	22	20	19
17	21	20	18	17	15	14	13	11	10	9	9	9	10	12	14	16	18	20	22	23	24	24	23	22
18	21	20	18	17	15	14	13	11	10	9	9	9	10	12	14	16	18	20	22	23	24	24	23	22
19	1	0	-1	-2	-3	-3	0	5	13	20	28	35	40	43	43	41	37	31	23	15	10	7	5	3
20	1	0	-1	-2	-3	-3	0	5	13	20	28	35	40	43	43	41	37	31	23	15	10	7	5	3
21	11	8	6	5	3	2	1	2	4	7	12	17	22	27	31	33	35	34	32	28	24	20	17	14
22	10	8	6	4	2	1	0	0	2	6	10	16	21	27	31	34	36	36	34	30	26	21	17	13
23	16	14	13	11	10	8	7	7	8	9	11	14	17	19	22	24	25	26	26	25	23	21	20	18
24	16	14	13	11	10	8	7	7	8	9	11	14	17	19	22	24	25	26	26	25	23	21	20	18
25	14	11	9	7	5	4	3	3	4	6	10	14	18	23	27	30	31	32	31	29	26	26	19	16

Tabela II.2 – Valores para *DTCR*, continuação.

26	18	15	13	11	9	7	6	4	4	4	6	9	12	16	20	24	27	29	30	30	28	26	23	20
27	19	18	16	14	13	12	10	9	8	8	9	10	12	14	17	19	21	23	24	25	24	23	22	21
28	22	20	18	16	15	13	11	10	9	8	8	8	9	11	14	16	19	21	23	25	25	25	24	23
29	17	16	15	14	13	13	12	11	11	11	12	13	15	16	18	19	20	21	21	21	21	20	19	18
30	17	16	15	14	13	13	12	11	11	11	12	13	15	16	18	19	20	21	21	21	21	20	19	18
31	19	18	17	16	14	13	12	11	10	10	10	11	12	14	16	18	19	21	22	23	23	22	22	21
32	17	16	16	15	15	14	13	13	13	12	12	13	13	14	15	16	16	17	18	18	19	18	18	18
33	16	16	15	15	14	13	13	12	12	12	12	13	14	15	16	17	18	18	19	19	19	18	18	18
34	16	16	15	15	14	13	13	12	12	12	12	13	14	15	16	17	18	18	19	19	19	18	18	18
35	20	19	19	18	17	16	15	14	14	13	12	12	12	12	13	14	15	16	18	19	20	20	20	20
36	20	19	19	18	17	16	15	14	14	13	12	12	12	12	13	14	15	16	18	19	20	20	20	20



ANEXO III – Tabela para fator *LM*Tabela III.1 – Valores para *LM*.

Lat.,°	Mês	Forro	Orientação da Parede				
			Horiz.	S ou Sombra	SE ou SO	E ou O	NE ou NO
0	MAR	<b>0</b>	-1.6	0.5	<b>-0.5</b>	<b>-1.6</b>	<b>-4.4</b>
	FEV	-1.1	2.7	1.6	-1.1	-3.3	-4.4
	JAN	-2.2	5.5	2.7	-1.6	-4.4	-4.4
	DEZ	-2.7	<b>6.6</b>	<b>2.7</b>	-1.6	-5.0	-4.4
8	MAR	<b>0</b>	-1.6	-0.5	<b>-0.5</b>	<b>-1.1</b>	<b>-2.2</b>
	FEV	-0.5	1.1	1.1	-0.5	-2.7	-3.8
	JAN	-1.1	3.8	2.2	-1.1	-3.8	-3.8
	DEZ	-4.4	<b>5.0</b>	<b>2.2</b>	-1.1	-4.4	-3.8
16	MAR	-0.5	-1.6	-1.1	-0.5	<b>0</b>	<b>0</b>
	FEV	<b>0</b>	-0.5	-0.5	<b>-0.5</b>	-1.6	-3.3
	JAN	0	2.2	1.6	-0.5	-2.7	-3.8
	DEZ	0	<b>3.3</b>	<b>2.2</b>	-0.5	-3.3	-3.8
24	MAR	-1.6	-1.6	-1.6	-0.5	<b>0.5</b>	<b>2.2</b>
	FEV	0	-1.1	0	-0.5	-0.5	-1.6
	JAN	<b>0.5</b>	0.5	1.1	0	-1.6	-3.3
	DEZ	0.5	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>0</b>	-2.2	-3.3
32	MAR	-2.7	-1.6	-2.2	-1.1	<b>1.6</b>	<b>3.8</b>
	FEV	-0.5	-1.1	-2.2	-1.1	1.6	3.8
	JAN	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5
	DEZ	<b>1.1</b>	<b>0.5</b>	<b>1.1</b>	<b>0</b>	-1.1	-2.2