

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PATRICIA PANNO

**TECNOLOGIAS DE ARREFECIMENTO TÉRMICO EM TELHADOS PARA
CONDICIONAMENTO AMBIENTAL**

**Alegrete
2017**

PATRICIA PANNO

**TECNOLOGIAS DE ARREFECIMENTO TÉRMICO EM TELHADOS PARA
CONDICIONAMENTO AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Elvira Luiza Arantes Ribeiro
Mancini

**Alegrete
2017**

Patricia Panno

**TECNOLOGIAS DE ARREFECIMENTO TÉRMICO EM TELHADOS PARA
CONDICIONAMENTO AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26, Junho de 2017.

Banca examinadora:

Elvira Mancini

Prof. Mestre Elvira Luiza Arantes Ribeiro Mancini
Orientadora
Unipampa

Jose Wagner Maciel Kaehler

Prof. Doutor José Wagner Maciel Kaehler
Unipampa

Simone Venquiaruto

Prof. Doutora Simone Dornelles Venquiaruto
Unipampa

Dedico este trabalho aos meus pais, Eliceo e Zélia, irmã Tamara e ao Raul, com carinho.

AGRADECIMENTO

A Universidade Federal do Pampa, que através de seus funcionários e recursos, que colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao professor José Wagner Maciel Kaehler, pela dedicação, apoio, exemplo, amizade, paciência, incentivo nesta área de pesquisa e ajuda constante durante a execução do trabalho.

A professora Elvira, pelo importante papel de orientadora trazendo importantes contribuições e ajuda constante durante a execução do trabalho.

A professora Simone, por gentilmente aceitar participar da banca de avaliação deste trabalho de conclusão de curso e colaboração.

A minha irmã Tamara pelo companheirismo e carinho, por ser minha melhor amiga.

Ao Raul, por todo carinho e suporte em todos os momentos.

Aos meus pais, pelo incentivo, apoio e segurança, fundamentais na realização de qualquer tarefa.

A todos que de alguma forma ajudaram nesta trajetória.

RESUMO

Nesta pesquisa é apresentado o estudo sobre resfriamento evaporativo por percolação de água sobre coberturas na zona bioclimática 2. Buscou-se prospectar soluções construtivas de coberturas que permitissem melhorar as condições de conforto ambiental em ambientes confinados das edificações. As soluções foram prototipadas através de cinco células-teste dotadas cobertas com telhas de aluzinco, fibrocimento e vidro. Com base nas equações da NBR 15220-2003 foram modelados os parâmetros das células-teste como: resistência térmica e transmitância térmica. Através das células-teste foram ensaiadas duas condições de uso uma com telhado sem arrefecimento nos modelos fibrocimento e aluzinco e outra com arrefecimento nos modelos de fibrocimento, aluzinco e vidro, sendo que ambas demonstraram a melhoria das condições ambientais.

Palavras-Chave: eficiência energética, refrigeração evaporativa, percolação.

ABSTRACT

This research presents the study on evaporative cooling, by water sprinkling on roofs, in the bioclimatic zone 2. Constructive solutions of roofs that allowed the improvement of the environmental conditions of comfort in buildings confined environments were prospected. The solutions were prototyped through six test cells covered with aluzinco tiles, fiber cement and glass. Based on the equations of NBR 15220-2003, the parameters of the test cell were modeled as: thermal resistance and thermal transmittance.

Through the test cells, two non-cooling roofing conditions were tested in the asbestos-cement, alloy-cement and cooling models in the asbestos, alloy and glass models, both of which demonstrated improved ambient conditions.

Keywords: energy efficiency, evaporative cooling, sprinkling.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Contextualização do tema e do problema de pesquisa	9
1.2	Objetivo Geral	10
1.3	Objetivos específicos	10
1.4	Justificativas	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	Caracterização climática da região de Alegrete	12
2.2	Zoneamento bioclimático brasileiro e a carta bioclimática	13
2.3	Alegrete segundo o zoneamento bioclimático	17
2.4	Conforto térmico	19
2.5	Eficiência energética em edificações	20
2.6	Propriedades térmicas dos elementos construtivos	21
2.7	NBR 15575 Edificações habitacionais - Desempenho	22
2.8	Desempenho de Coberturas	23
2.9	Transmissão de calor em coberturas	24
2.10	Classificação dos materiais que diminuem a transmissão de calor em coberturas	25
2.11	Coberturas comumente utilizadas	27
2.12	Sistemas de refrigeração evaporativa	30
2.12.1	Percolação de água sobre coberturas	31
2.12.2	Aspersão de água sobre a cobertura	32
2.13	Recurso solar	33
2.14	Variáveis arquitetônicas	36
2.14.1	Resistência térmica	37
2.14.2	Transmitância térmica	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Células-teste	41
3.2	Sistema de percolação	42
3.3	Sistema de monitoramento e aquisição de dados	45
3.4	Câmera infravermelha	49
4	RESULTADOS	50
4.1	Cálculo da transmitância térmica	50
4.2	Célula-teste de fibrocimento	50
4.3	Célula-teste de aluzinco	52
4.4	Célula-teste de vidro	54
4.4.1	Fibrocimento x Aluzinco x Vidro	55
4.5	Análise térmica das células-teste	59
5	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXO A – Gráficos célula-teste de fibrocimento	67
	ANEXO B – Gráficos célula-teste de aluzinco	74
	ANEXO C – Gráficos célula-teste de vidro	80
	ANEXO D – Cálculos de transmitância térmica (U)	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema e do problema de pesquisa

Diante do quadro mundial, no qual se verifica que o aumento do consumo de energia vem gerando sérios danos ambientais, medidas se fazem necessárias para promover o uso eficiente da energia e em particular da energia elétrica. Assim, segundo Lamberts (1997), a economia de energia elétrica proporcionada pela eficiência energética reduz a obrigatoriedade de investimentos do setor público, custo este que seria repassado a sociedade como um todo, direta ou indiretamente, proporcionando uma manutenção no custo de materiais utilizados na construção civil, por exemplo. Permite ainda postergar possíveis impactos ambientais causados por usinas (inundações, deslocamento de população, etc.), poluição e riscos com a segurança pública.

O Plano Nacional de Eficiência Energética, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2011c), se faz necessário que a energia disponível seja utilizada de forma racional e sustentável. O desperdício de energia significa a degradação de recursos naturais e a inviabilização de outras possíveis atividades necessárias ao desenvolvimento do país. Devem colaborar com o uso racional da energia, tanto o Estado (por meio das ações induzidas) quanto o mercado (por meio das ações autônomas). Consequência disso, o conforto ambiental constitui-se num dos pontos passíveis de melhoramento e redução de consumo de energia. Ainda, segundo a Eletrobrás, em torno de 48% do consumo de energia do país corresponde aos setores comercial e residencial.

Segundo Lamberts (1983), uma das principais funções de uma habitação é exercer um efeito de filtro às variações climáticas, deixando o ambiente interno dentro dos limites de conforto térmico para os usuários. Para Lamberts et al. (1997), os materiais de construção têm muita influência sobre as condições de conforto do ambiente interno de uma edificação. Quando especificados corretamente, podem evitar ganhos térmicos demasiados, obtendo-se melhorias nas condições ambientais internas.

Além da escolha correta dos materiais, existem técnicas que se aplicadas corretamente, contribuem para o conforto térmico de edificações. O resfriamento por percolação é uma delas. Pode ser definida como uma técnica atraente em eficiência

energética para produzir ambientes internos confortáveis. A eficiência e o baixo custo dos sistemas de resfriamento de sprays de água os tornam uma boa alternativa na redução do consumo de energia. O sistema de percolação de água na cobertura utilizado para o resfriamento pode, segundo Roriz (2007), ser caracterizado como sistema refrigerador indireto, ou seja, não refrigera diretamente o ar que circula no ambiente, utiliza a estrutura como trocador de calor, neste caso, como absorvedor. O principal ganho em relação a outros sistemas é que não alteram a umidade do ar interno à edificação.

Para Roriz (2000), até pouco tempo supunha-se que este recurso fosse aplicável apenas em regiões áridas ou semi-áridas. Experiências recentes indicam que pode ser uma alternativa interessante mesmo para climas semi-úmidos ou até mesmo úmidos.

Segundo Mascaró (1985), a adequação do teto às condições climáticas não ocorre sempre, pois, para evitar um custo extra, às vezes deixa-se de projetar e de construir um teto adequado às condições climáticas do lugar. Ainda, segundo Mascaró (2010, p.121) em construções térreas, 80% do calor chega na cobertura, e somente 20% nas fachadas. Assim preocupar-se com a escolha do material na cobertura é fundamental para garantia do conforto térmico da edificação.

Além disso, em um projeto para construção de edificações todos os materiais escolhidos devem ser especificados de forma a alcançar o melhor conforto ambiental (térmico e acústico) possível para futuros usuários.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho térmico de telhas de aluzinco, fibrocimento e vidro, com e sem percolação de água sobre a cobertura, através do monitoramento de células-teste em Alegrete – RS.

1.3 Objetivos específicos

- Obter dados de monitoramento de temperatura em dois pontos em cinco células-teste.
- Avaliar resultados de conforto térmico para os modelos com arrefecimento e sem arrefecimento.
- Determinar o melhor modelo de cobertura para percolação de água.

1.4 Justificativas

Em decorrência das grandes variações de temperatura pertinentes a Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul é necessária a determinação de um modelo de telhado capaz de, no inverno, absorver a maior temperatura possível e que no verão mantenha-se arrefecido, proporcionando melhor conforto ambiental dentro das edificações. Neste trabalho, é desenvolvido um modelo de arrefecimento por sprays de água que tem efeito apenas para correção do conforto ambiental para as temperaturas de verão.

A água como agente mitigador do impacto térmico, ao evaporar diminui a temperatura da cobertura e indiretamente a temperatura interna, reduzindo assim os ganhos de calor do ambiente.

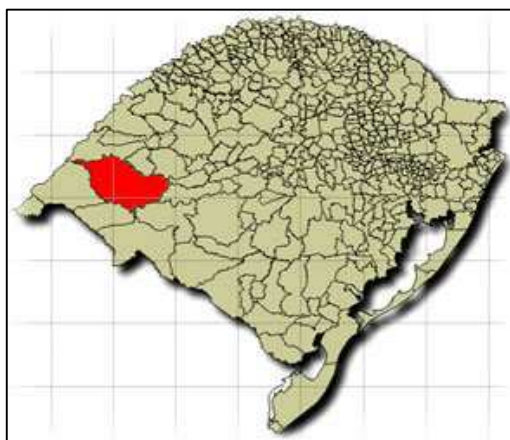
Além disso, o baixo consumo de água e energia empregados neste sistema justifica sua pesquisa para redução da temperatura. Isso porque a água utilizada pode ser proveniente da coleta e estocagem de água da chuva. Além disso, para o suprimento de energia elétrica necessária ao processo de arrefecimento, pode-se utilizar recursos energéticos solares ou eólicos. Dessa maneira, o sistema proposto torna-se sustentável do ponto de vista ambiental.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Caracterização climática da região de Alegrete

Alegrete situa-se na região fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), a 488 km da capital, com latitude 29°46'59" Sul e de longitude 55°47'31" Oeste, estando a 104 metros acima do nível do mar. Segundo a classificação de Koppen (1931), o clima da região é subtropical, temperado quente, com chuvas bem distribuídas e estações bem definidas.

Figura 1 - Mapa do estado do Rio Grande do Sul com indicação de Alegrete.



Fonte: Prefeitura municipal de Alegrete (2016, não paginado)

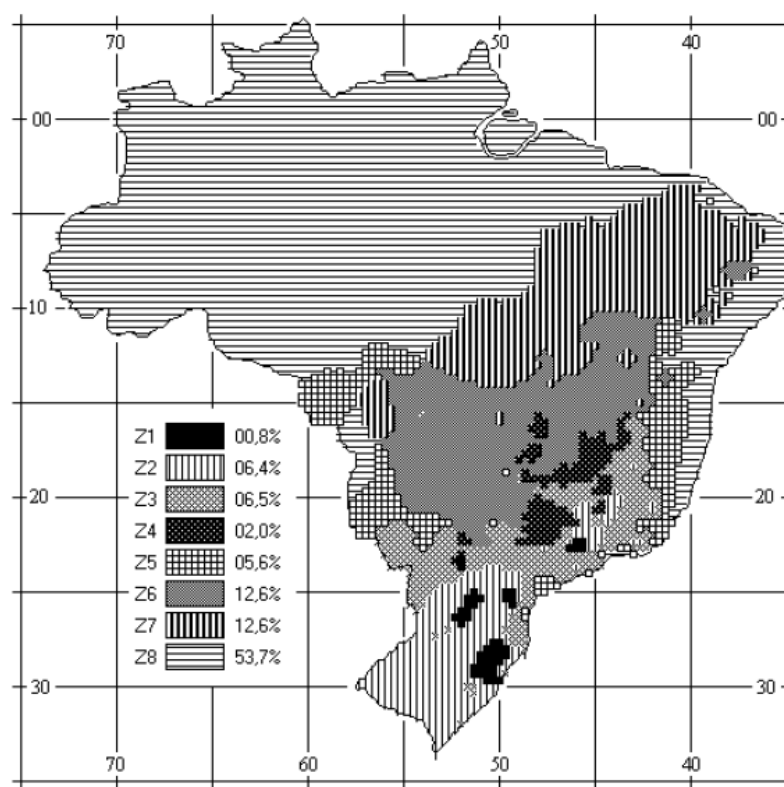
A temperatura média anual é de 18,6°C, variando entre 13,1°C em julho e 24,8°C em janeiro. Segundo dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a temperatura mínima registrada em 8 de junho de 2012 foi de -3,8° e máxima de 39,7° registrada em 19 de fevereiro de 2012. A umidade relativa média do ar é de aproximadamente 75% em todos os meses do ano.

A paisagem caracteriza-se como o estepe gramíneo-lenhosa (campo nativo) e floresta estacional decidual aluvial (mata ciliar). A fisionomia é de extensas planícies de campo limpo com algumas ondulações e raros morros residuais de arenito silicificado. O município está totalmente sobre o aquífero Guarani e seu lençol freático apresenta água levemente alcalina, utilizável sem restrições para o uso humano e para a irrigação.

2.2 Zoneamento bioclimático brasileiro e a carta bioclimática

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que trata do desempenho térmico em edificações, define o zoneamento bioclimático brasileiro em oito diferentes zonas, conforme indica a Figura 2. Este zoneamento tem o propósito de fundamentar as sugestões e estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social. Ao mesmo tempo em que estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro, são feitas recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo, com base em parâmetros e condições de contorno fixados.

Figura 2 – Zoneamento bioclimático brasileiro.



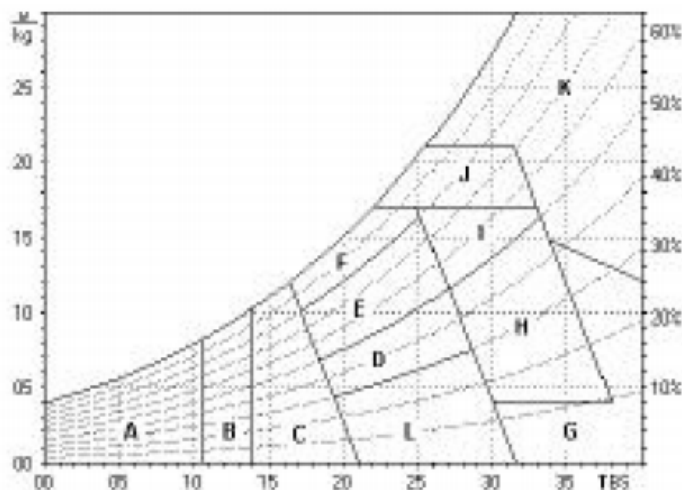
Fonte: ABNT (2005, parte 3, p.3)

O procedimento para classificação bioclimática do país em regiões de relativa homogeneidade climática é demonstrado na NBR 15220-3. A classificação foi feita, segundo o modelo da Carta Bioclimática de Givoni, que foi adaptada para o Brasil, como mostra a figura 3. Nesta carta, relaciona-se a umidade, na unidade de medida grama de vapor por quilo de ar seco, no eixo “y”, com a temperatura no eixo “x”.

Para cada área determinada na carta, correspondem às seguintes estratégias:
A – Zona de aquecimento artificial (calefação)

- B – Zona de aquecimento solar da edificação
- C – Zona de massa térmica para aquecimento
- D – Zona de conforto térmico (baixa umidade)
- E – Zona de conforto térmico
- F – Zona de desumidificação (renovação do ar)
- G + H – Zona de resfriamento evaporativo
- H+ I – Zona de massa térmica de refrigeração
- I + J – Zona de ventilação
- K – Zona de refrigeração artificial
- L – Zona de umidificação do ar

Figura 3 – Carta de Givoni adaptada ao Brasil.



Fonte: NBR 15220-3 (2003)

Essa metodologia classificou 330 cidades, de diferentes posições geográficas, e para tanto, em algumas foram utilizados dados coletados por décadas, outras foram ordenadas por interpolação.

O método de determinação para a classificação foi o seguinte: as informações mensais de temperatura e umidade do ar de cada cidade foram dispostas no gráfico. Através da aplicação desses dados sobre o gráfico e de cálculos realizados conforme especificados na NBR, foi possível determinar o clima de cada região, as estratégias bioclimáticas aplicáveis em cada cidade averiguada, bem como o percentual de cada estratégia acumulado no decorrer do ano.

A NBR 15220-3 cita como exemplo o caso de Brasília, onde se observa na carta bioclimática (Figura 4) as respectivas percentagens das horas/ano correspondentes a

cada estratégia. Cada linha vermelha representa as temperaturas e umidade mínima, máxima e média para cada mês do ano. Valores menores de 1% são desprezados.

A leitura da carta bioclimática indica que precisam ser tratadas seis principais estratégias, exceto a da região “E” (conforto térmico).

Assim, tem-se a seguinte disposição de percentuais:

B – 1,5% (zona de aquecimento solar da edificação)

C – 12,7% (zona de massa térmica para aquecimento)

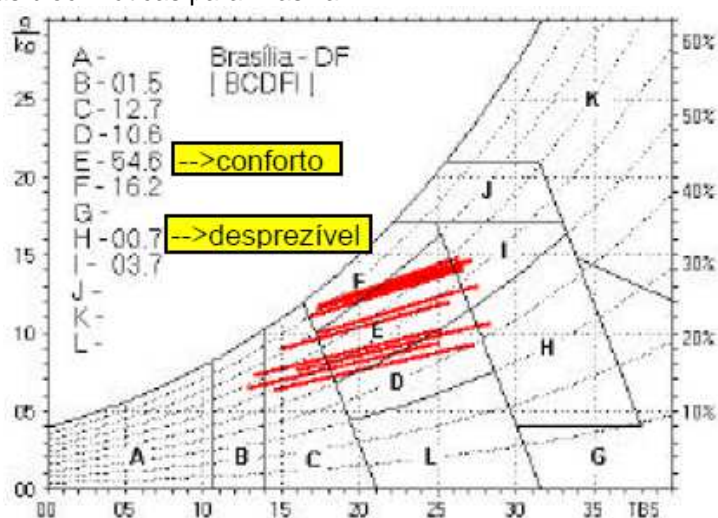
D – 10,6% (zona de conforto térmico – baixa umidade)

F – 16,2% (zona de desumidificação)

I – 3,7% (zona de ventilação)

As letras supracitadas definem, portanto, as estratégias bioclimáticas recomendadas para a cidade de Brasília bem como a zona bioclimática a que pertencem.

Figura 4 – Estratégias bioclimáticas para Brasília.



Para propor diretrizes construtivas para adequação da edificação ao clima local, para cada zona bioclimática, a NBR recomenda a apreciação dos seguintes critérios: tamanho das aberturas (ventilação), proteção das aberturas, vedações externas (paredes e coberturas), e métodos para condicionamento térmico passivo.

No que se refere às aberturas, a NBR 15220-3 afirma que o que as classificam em pequenas, médias e grandes é a relação entre o percentual da área de abertura em relação à área do piso, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Tamanho das aberturas conforme NBR 15220-3.

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	10% < A < 15%
Médias	15% < A < 25%
Grandes	A > 40%

Fonte: NBR 15220-3 (2003)

Enquanto as vedações externas, como parede e cobertura, são classificadas conforme a tabela 2, e leva em consideração transmitância térmica, atraso térmico e fator solar.

Tabela 2 – Classificação das vedações conforme NBR 15220-3.

Vedações Externas		Transmitância térmica – U W/m ² .K	Atraso térmico – ϕ horas	Fator solar – FSo %
	Leve	U ≤ 3,00	ϕ ≤ 4,3	FSo ≤ 5,0
Paredes	Leve refletora	U ≤ 3,60	ϕ ≤ 4,3	FSo ≤ 4,0
	Pesada	U ≤ 2,20	ϕ ≤ 6,5	FSo ≤ 3,5
	Leve isolada	U ≤ 2,00	ϕ ≤ 3,3	FSo ≤ 6,5
Coberturas	Leve refletora	U ≤ 2,30. FT	ϕ ≤ 3,3	FSo ≤ 6,5
	Pesada	U ≤ 2,00	ϕ ≤ 6,5	FSo ≤ 6,5

Notas:

1 No caso de coberturas (este termo deve ser entendido como o conjunto telhado mais ático mais forro), a transmitância térmica deve ser verificada para o fluxo descendente.

2 O termo “ático” refere-se à câmara de ar existente entre o telhado e o forro.

Fonte: NBR 15220-3 (2003)

No caso de Brasília, segundo a NBR15220-3, aplicam-se as seguintes estratégias: as aberturas de ventilação devem ser médias com sombreamento das aberturas; as paredes externas devem ser pesadas, com a cobertura leve e isolada; e as estratégias de condicionamento térmico passivo recomendadas estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 4.

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	H) Resfriamento evaporativo e Massa térmica para resfriamento
	J) Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja sempre superior à externa)
Inverno	B) Aquecimento solar da edificação
	C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)

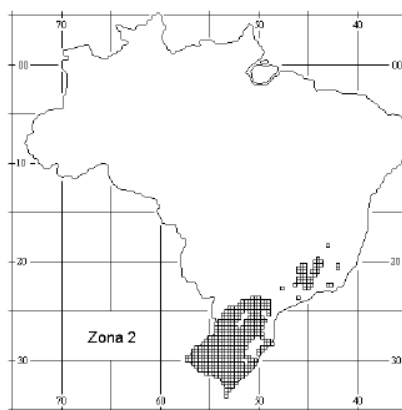
Nota: Os códigos H, J e C são os mesmos adotados na metodologia utilizada para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil (Anexo B).

Fonte: NBR 15220-3 (2005, p. 6)

2.3 Alegrete segundo o zoneamento bioclimático

Segundo a figura 5, Alegrete se localiza na zona bioclimática 2, que representa 6,4% da área do Brasil.

Figura 5 – Zona bioclimática 2.

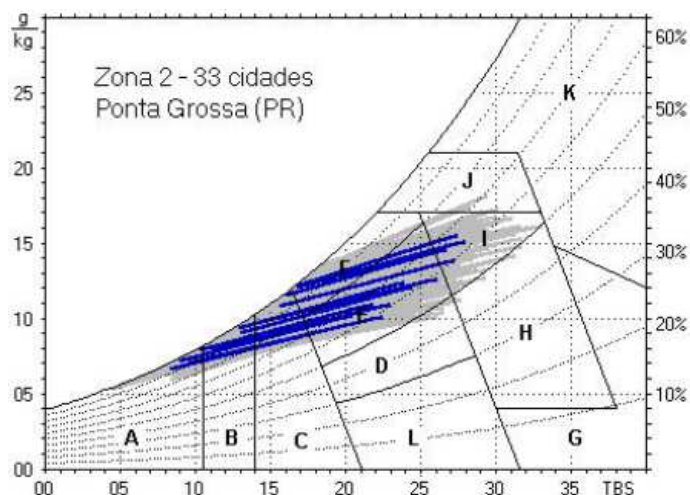


Fonte: NBR 15220-3 (2003)

Para determinação das estratégias construtivas, será utilizada a análise realizada pela NBR 15220-3, através da carta adaptada de Givoni para a realidade sul brasileira.

Na referida norma, para cada zona bioclimática, foi tomada como exemplo uma cidade a qual se aplica. Como o estudo será feito para na cidade de Alegrete (RS), esta está situada na zona bioclimática 2, que, em norma, é representada pela cidade de Ponta Grossa (PR), conforme a figura 6.

Figura 6 – Carta bioclimática apresentando as normais climáticas de cidades desta zona, destacando a cidade de Ponta Grossa.



Fonte: NBR 15220-3 (2003)

Para o caso da cidade de Ponta Grossa, onde se observa na carta bioclimática (Figura 8) as respectivas percentagens das horas/ano correspondentes a cada estratégia. Cada linha azul representa as temperaturas e umidade mínima, máxima e média para cada mês do ano. Valores menores de 1% são desprezados.

A leitura da carta bioclimática indica que precisam ser tratadas quatro principais estratégias, exceto a da região “E” (conforto térmico).

Assim, tem-se, segundo Lamberts et al. (2011), a seguinte disposição de percentuais.

- A – 11,8 % (zona de aquecimento artificial)
- B – 18,9 % (zona de aquecimento solar da edificação)
- C – 45,5% (zona de massa térmica para aquecimento)
- F – 23,2% (zona de desumidificação)

As letras supracitadas definem, portanto, as estratégias bioclimáticas recomendadas para a cidade bem como a zona bioclimática a que pertencem.

Para esta zona sugere-se que as aberturas de ventilação sejam médias com acesso à radiação solar durante o inverno; as paredes externas devem ser leves, com a cobertura leve e isolada; e as estratégias de condicionamento térmico passivo recomendadas estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 2.

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	J) Ventilação cruzada
Inverno	B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica ¹)

Nota:

O condicionamento passivo será insuficiente durante o período mais frio do ano.

Os códigos J, B e C são os mesmos adotados na metodologia utilizada para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil (Anexo B).

Fonte: NBR 15220-3 (2005, p. 5)

2.4 Conforto térmico

Segundo a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) (1992, p.4) a situação de conforto térmico é definida como “aquele estado da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”.

As construções são ambientes que abrigam as pessoas, visando serem espaços protegidos e confortáveis, se comparado ao espaço externo. Estando protegido das condições climáticas, busca-se conforto térmico.

Segundo Souza (2009) as condições de conforto térmico são determinadas em função da atividade desenvolvida pelo indivíduo, da sua vestimenta e das variáveis do ambiente que influenciam nas trocas térmicas entre o corpo e o ambiente. Além destes, outros fatores que influenciam na sensação térmica são: idade, biótipo, sexo, adaptação climática, hábitos alimentares entre outros.

Segundo FROTA et al. (1998) a previsão da carga térmica a ser gerada no interior do edifício é fundamental sendo sempre em função das exigências funcionais e humanas, para os diferentes tipos de climas. Para determinação destes diversos ganhos de calor devem ser considerados, como:

¹ À inércia térmica estão associados dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico do edifício: o amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais. A inércia térmica depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos. Quando, por exemplo, a temperatura exterior, supostamente inicial igual à temperatura interior, se eleva, um certo fluxo de calor penetra na parede. Esse fluxo não atravessa imediatamente, antes aquecendo-a internamente. Assim, uma parede apresenta maior ou menor inércia térmica segundo seu peso e sua espessura e os revestimentos desempenham importante papel, pois revestimentos isolantes reduzem as trocas de calor com a parede e reduzem sua inércia. (FROTA et al., 2001, p.49).

- Presença humana: a quantidade de calor dissipada pelo organismo humano para o ambiente é variável devido a atividade desenvolvida no local;
- Sistema de iluminação artificial: a transformação de energia elétrica em luz traz por consequência a geração de calor, sendo este dissipado para superfícies circundantes através de materiais adjacentes. A quantidade de calor transmitida é diferente entre as possibilidades de lâmpadas a serem utilizadas, por exemplo, lâmpadas incandescentes transformam apenas 5% a sua potência elétrica em luz;
- Motores e equipamentos: adota-se neste caso que, 60% do potencial nominal de aparelhos elétricos é designada como calor cedido ao meio ambiente;
- Processos industriais: neste cada caso deve ser calculado de forma específica, levando em consideração as temperaturas superficiais e áreas de superfícies aquecidas;
- Calor solar: o sol, incidindo sobre a edificação representa um ganho de calor, sendo este em função da intensidade da radiação solar e das características térmicas dos materiais utilizados na construção. A intensidade da radiação solar pode ser calculada por meio de fórmulas, sendo em função da latitude, data, altitude, nebulosidade, poluição do ar, orientação do plano e técnicas de redução de calor aplicadas à edificação. Sendo este último, o motivo de estudo neste trabalho.

Em condições climáticas rígidas, pode não ser possível um desempenho térmico satisfatório apenas com utilização apenas de recursos naturais. Nesses casos, pode-se reduzir a potência dos equipamentos de refrigeração ou aquecimento procurando propostas que maximizem o desempenho térmico natural, possibilitando também não ser necessário o uso contínuo dos equipamentos em épocas amenas do ano.

2.5 Eficiência energética em edificações

Em um projeto de uma edificação, as características climáticas da região, onde ela será implantada, devem ser levadas em conta, ou seja, variáveis climáticas, características arquitetônicas e construtivas devem respeitar cada particularidade e desfrutar de seus benefícios desde sua criação até a fase de especificações.

Para as exigências humanas de conforto térmico, sistemas de condicionamento de ar são empregados para manter um ambiente artificialmente adequado, compreendendo o controle de temperatura e umidade.

Segundo o Plano Nacional de Energia (BRASIL, 2007), estima-se que a demanda de energia elétrica no Brasil deverá crescer cerca de 55% até o ano de 2020. Segundo o Ministério de Minas e Energia, do total de energia consumida no país em 2013, 12,6% ou seja, 84 TWh, foram em sistemas de condicionamento de ar, sendo que estes podem contribuir muito com a racionalização do consumo de energia, se forem devidamente fabricados e utilizados de forma eficiente (BRASIL, 2014). Estima-se que o Brasil poderia economizar até 18 TWh por ano, com a substituição de sistemas de condicionamento de ar.

Segundo Frota et al. (1998, p.18), a racionalização do uso da energia apresenta estreitos laços com a adequação das edificações ao clima e ao ambiente, evitando ou reduzindo o uso de sistemas de condicionamento de ar. As temperaturas excessivas do interior das edificações podem ser minimizadas, qualificando os controladores naturais de temperatura.

A eficiência energética na arquitetura pode ser entendida como um atributo inerte à edificação representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia. Portanto, um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia (LAMBERTS et al., 1997, p.5).

2.6 Propriedades térmicas dos elementos construtivos

Segundo Frota et al. (1998, p.41), o sol, importante fonte de calor, incide sobre um edifício representando sempre um certo ganho de calor, que será função da intensidade da radiação incidente e das características térmicas dos parâmetros do edifício. Os elementos da edificação, quando expostos aos raios solares, diretos ou indiretos podem ser definidos como: opacos e transparentes ou translúcidos.

- Fechamentos opacos: O fluxo de calor sempre se dá do ponto mais quente para o ponto mais frio, assim os fechamentos absorvem calor tanto do exterior, quanto do interior. A cor do material também pode incrementar sua temperatura na sua superfície externa quando este está exposto ao sol. Ao conduzir o calor para o outro extremo, o material retém uma parte no seu interior, consequência de sua inércia térmica. (Lamberts et al. 1997, p.197).

- Fechamentos transparentes ou translúcidos: neste modelo de fechamento ocorre, geralmente, as principais trocas térmicas, sendo eles de três modos: condução, convecção e radiação. Este diferencia-se do opaco pela parcela de radiação transmitida diretamente para o interior. Seu maior problema é o difícil controle das parcelas transmitidas diretamente, absorvida e reemitida para o interior. (Lamberts et al. 1997, p.198).

2.7 NBR 15575 Edificações habitacionais - Desempenho

Normas de desempenho são desenvolvidas buscando atender as exigências dos usuários. A NBR 15575 que entrou em vigor no dia 19/07/2013 estabelece os requisitos de qualidade da maioria dos sistemas construtivos e tem foco nas exigências dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição como os sistemas são construídos.

A norma de desempenho define:

- Incumbências dos projetistas, do incorporador, do construtor e dos usuários;
- Requisitos mínimos de qualidade;
- Prazos de vida útil;
- Prazos de garantia;
- Condições de manutenção;
- Métodos de ensaio;

A norma de desempenho terá reflexos como:

- Aferir a qualidade da construção (por meio de referenciais técnicos e objetivos de qualidade, e dos prazos de vida útil);
- Aferir as responsabilidades dos agentes da construção e dos usuários;
- Em ações judiciais, seja nas perícias, seja em aspectos processuais (o ônus da prova da manutenção).

Segundo Del Mar (2013) esta é a maior auto-regulamentação de um setor da atividade econômica de que se tem notícia.

A NBR 15575 é dividida em seis partes e requisitos e critérios aplicáveis a determinado sistema são tratados separadamente em cada parte desta norma.

Parte 1: Requisitos gerais – se refere às exigências dos usuários e aos requisitos gerais comuns aos diferentes sistemas, estabelecendo as diversas interações e interferências entre estes.

Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais – trata dos requisitos para os sistemas estruturais aplicáveis a edificações habitacionais com respeito ao desempenho estrutural, analisado do ponto de vista dos estados-limites último e de serviço pelo método semiprobabilístico de projeto estrutural.

Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos – trata do desempenho do sistema de pisos, destinados para área de uso privativo ou de uso comum, com a inclusão dos elementos e componentes, de acordo com os critérios estabelecidos nesta norma.

Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – trata dos sistemas de vedações verticais internas e externas das edificações habitacionais, que, além da volumetria e da compartimentação dos espaços da edificação, integram-se de forma muito estreita aos demais elementos da construção, recebendo influências e influenciando o desempenho da edificação habitacional.

Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas – se refere às exigências dos usuários e aos requisitos aos sistemas de cobertura.

Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários – se refere às exigências dos usuários e aos requisitos referentes aos sistemas hidrossanitários.

2.8 Desempenho de Coberturas

Segundo a NBR 15575-5 (ABNT, 2013, p.8), o sistema de cobertura é o conjunto de elementos/componentes, dispostos no topo da construção, com as funções de assegurar estanqueidade às águas pluviais e salubridade, proteger demais sistemas da edificação habitacional ou elementos e componentes da deterioração por agentes naturais, e contribuir positivamente para o conforto termoacústico da edificação habitacional.

O sistema de cobertura é a parte da edificação com maior exposição à radiação direta do sol, ele exerce predominante influência na carga térmica transmitida aos ambientes, influenciando no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia para ligar equipamentos de condicionamento artificial de ar.

No item 11.2 da norma tem-se como requisito que a cobertura apresente transmitância térmica² e absorvância à radiação solar que proporcionem um desempenho térmico apropriado para cada zona bioclimática.

Ainda segundo a norma a intensidade de chuvas, insolação e principalmente vento, são as ações que exercem maior influência e são determinantes nos projetos de sistemas de coberturas.

O critério 11.2.1 da norma estabelece que a avaliação do desempenho térmico seja através do método simplificado, conforme procedimentos apresentados na ABNT NBR 15220-2/2005.

Os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) das coberturas, considerando fluxo térmico descendente, em função da zona bioclimática 2, encontram-se indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Critérios de coberturas quanto à transmitância térmica.

Transmitância térmica (U) W/m ² K
Zonas 1 e 2
$U \leq 2,30$

Fonte: Adaptado da NBR 15575-5 (2013, p.26)

2.9 Transmissão de calor em coberturas

Segundo Costa (1982, p.89), quando existe uma diferença de temperatura entre duas regiões do espaço, esta tende a desaparecer, espontaneamente, pela passagem de calor de uma região para outra. Transmissão de calor é o nome dado ao conjunto de fenômenos que caracterizam essa passagem de calor. Essa transmissão pode ser realizada por condução, radiação e convecção. Entende-se cada uma delas da seguinte forma:

- **Condução:** é a transferência de calor entre dois corpos em contato e com diferentes temperaturas, de modo que o fluxo de calor é direcionado para as áreas de menor temperatura (RIVERO, 1985, p. 22).
- **Convecção:** é a troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e o outro um fluido – líquido ou gás (FROTA et al., 1998 p.32).

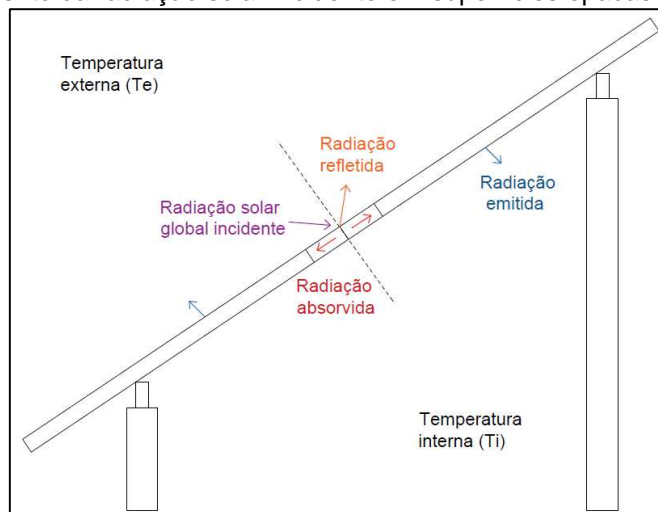
² Transmitância térmica (U): Calor transmitido de um meio a outro através de um fechamento em regime estacionário, na unidade de tempo e por unidade de área, quando a diferença entre as temperaturas dos dois meios é igual à unidade. (RIVERO, p.174)

- Radiação: trata-se de um mecanismo de troca de calor entre dois corpos através de sua capacidade de emitir e de absorver energia térmica. Essa troca vem da natureza eletromagnética da energia que, ao ser absorvida, provoca efeitos térmicos, o que permite sua transmissão sem necessidade de meio para propagação (FROTA et al., 1998 p.32).

Costa (1982, p.89) complementa que cada forma obedece a leis próprias e tendo em comum a necessidade de uma diferença de temperatura entre as duas regiões e o fluxo térmico sempre se verifica no sentido das temperaturas decrescentes.

Segundo Abdessalam (1998 apud JARDIM, 2011, p.25), no verão, 60% do calor transferido para a edificação ocorre através das coberturas. Ao incidir sobre a cobertura, parte da radiação solar é refletida e parte absorvida e reemitida para o interior da edificação como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Comportamento da radiação solar incidente em superfícies opacas.



Fonte: Adaptado de Jardim (2011)

De acordo com Cowan (1973 apud JARDIM, 2011, p.26), aproximadamente 87% do calor transferido pela cobertura aos ocupantes acontece através do processo de radiação e somente 13% desse calor é transferido através de condução e convecção.

Os resultados do estudo da análise térmica de coberturas de telhas de cerâmica, concreto e fibrocimento realizados por Armelin e Cherry (2004) indicaram que a superfícies da telha de cobertura atinge temperaturas acima de 60°C e que o

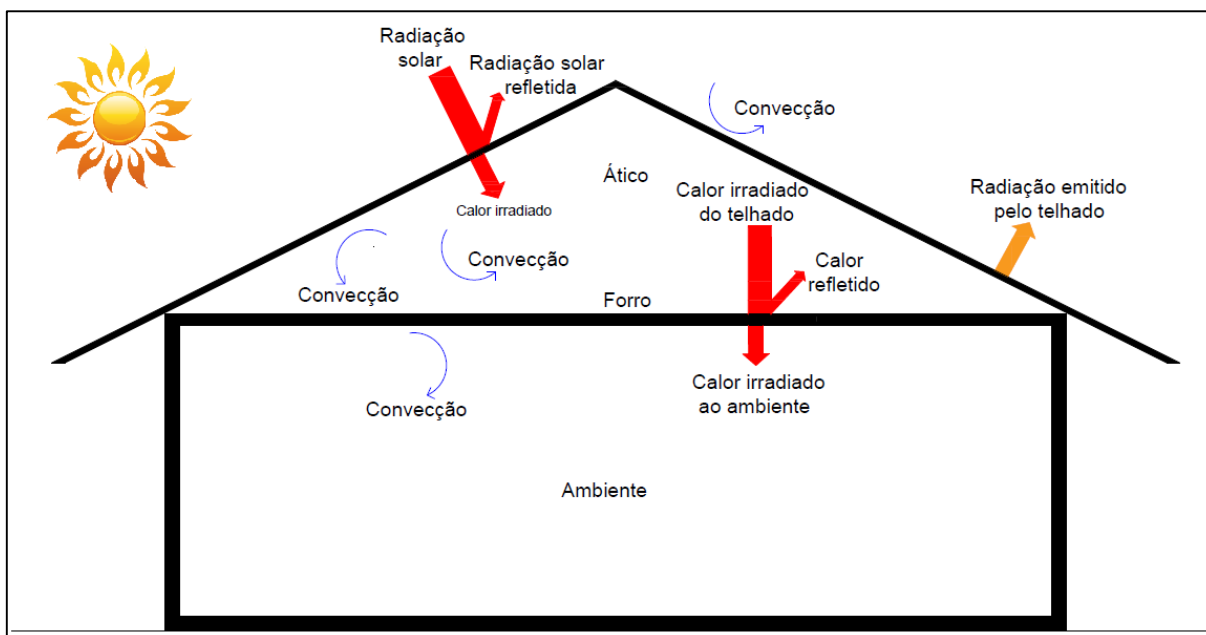
calor que entra através dos processos de convecção e condução corresponde a 11% e por radiação 89%.

2.10 Classificação dos materiais que diminuem a transmissão de calor em coberturas

Em países tropicais, um dos principais ganhos térmico em edificações ocorre através da cobertura, por esta ser a superfície mais exposta à radiação solar. Esse acréscimo na temperatura interna é observado principalmente em residências que possuem telhas aparentes, ou seja, o ático não é separado do restante da edificação por forro ou laje.

Segundo Michels (2007) a radiação solar é composta por radiação infravermelha de onda curta, que ao incidir sobre a superfície das telhas, as aquece. Uma parte desse calor é perdida por convecção e irradiação ao ambiente externo e a outra parcela absorvida pelas telhas é transmitida ao espaço correspondente ao ático. No interior do ático, o calor é transferido das telhas até a superfície do forro ou laje por convecção e radiação. O forro absorve parte desse calor e o transmite para o espaço interno da residência conforme a figura 8.

Figura 8 – Trocas de calor em um telhado.



Fonte: adaptado de Michels (2007)

Faz-se necessário o emprego de materiais que ajudam a diminuir a transferência de calor através da cobertura para o ambiente interno, buscando reduzir

a temperatura interna, diminuir o gasto com condicionamento de ar e proporcionar conforto térmico aos usuários.

Segundo Vittorino et al (2003) os produtos utilizados para isolar termicamente podem ser classificados em: aqueles que dificultam a transferência do calor por condução (isolantes resistivos, como fibra de vidro e lã de rocha) e os que minimizam a passagem por radiação (isolantes reflexivos).

Conforme o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 1991) o bom desempenho dos componentes que dificultam a transferência de calor por condução está relacionado com o valor da resistência térmica que eles apresentam. Quanto maior o valor da resistência térmica, maior será a resistência à passagem do fluxo de calor para o interior por condução.

Já os isolantes térmicos reflexivos ou barreiras radiantes reduzem a transferência do calor por radiação. Este isolante é formado por um material de baixa emissividade e alta refletividade, reduzindo assim a emissão da radiação em onda longa. Assim as perdas de calor no inverno e ganhos térmicos no verão são reduzidas. O alumínio é o material comumente utilizado como barreira radiante.

Segundo Guths (2004) barreiras radiantes somente entraram efetivamente no mercado nacional por volta de 1995, e desde então, é cada vez mais comum encontrarmos esse tipo de material sendo aplicado em coberturas.

2.11 Coberturas comumente utilizadas

A cobertura constitui a estrutura superior da edificação, que a protege contra precipitações, vento, poeira e temperaturas extremas. É composto pela estrutura de sustentação e do revestimento de cobertura. As coberturas devem responder com eficiência ao desempenho estrutural, térmico e acústico, estanqueidade e proteção contra incêndio.

Segundo Junior et al. (2010, p. 23), para uma cobertura eficiente, que atenda a toda sua necessidade, é de suma importância a escolha da telha. Essa escolha determina a inclinação das águas e o desempenho termoacústico da cobertura.

Através de pesquisa de mercado é possível verificar a grande variedade de telhas disponíveis, dentre as quais encontra-se, principalmente, as telhas cerâmicas, as telhas metálicas e as telhas de fibrocimento. Veja-se a seguir a descrição de cada uma delas:

- Telhas cerâmicas: são encontradas em vários modelos e feitas de barro cozido, apresentam bom desempenho termoacústico, boa resistência mecânica e durabilidade. Porém, são mais permeáveis e pesadas que as demais, exigem telhados com inclinações maiores e tem execução mais onerosa. Os modelos de telhas cerâmicas são: paulista, colonial, portuguesa, plana, romana e francesa. A figura 9 mostra uma telha cerâmica do tipo romana.

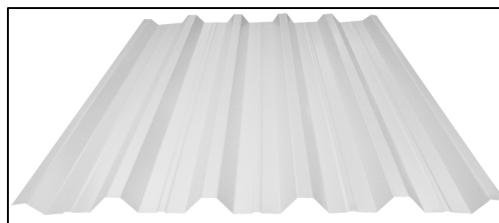
Figura 9 – Telha cerâmica tipo romana.



Fonte: Aldebara cerâmica (2017, não paginado)

- Telhas metálicas: são feitas de alumínio ou aço galvanizado e são encontradas em perfis ondulados e trapezoidais. Possuem diferentes espessuras e várias ligas, acabamentos, dimensões e cores naturais ou pintadas. Por serem leves, reduzem o custo da estrutura de apoio, facilitam o manuseio e montagem. Tem elevada resistência à corrosão atmosférica garantindo, assim, vida útil longa, porém, as telhas de lâminas simples não apresentam resistência mecânica. Ademais, tem fraco desempenho termoacústico (exceto as telhas metálicas duplas tipo sanduiche). A inclinação do telhado pode ser de até 0,5%. Os modelos de telhas metálicas são: aço – ondulada e alumínio –, trapezoidal ou ondulada como mostra a figura 10.

Figura 10 – Telha metálica tipo trapezoidal.



Fonte: Isoeste (2017, não paginado)

- Telhas de fibrocimento: é um material a base de cimento com adições minerais e com fibras de reforço. Apresenta vantagens como executar com rapidez telhados, boa resistência mecânica e desvantagens o fraco desempenho como isolante térmico. O modelo de telha mais usado é do tipo ondulada como apresenta a figura 11.

Figura 11 – Telha de fibrocimento tipo ondulada.



Fonte: Brasilit (2017, não paginada)

Cabe dizer que também existem telhas de vidro, de plástico, de concreto, de madeira e de materiais reciclados tais como embalagens Tetra Pak.

- Vidro como elemento de vedação: O vidro é uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, obtida através do arrefecimento de uma massa em fusão. Diferencia-se de outros materiais pela sua seletividade a radiação solar, não é poroso nem absorvente, é dielétrico, possui baixo índice de dilatação, resistente a compressão, transmissão de radiação luminosa sendo a transparência e dureza suas principais qualidades. A condutibilidade térmica é de $1,1 \text{ W/}^\circ\text{C}$, o que, relativo à sua densidade de 2500 kg/m^3 é um valor baixo. O uso de grandes áreas de abertura envidraçadas contribui para a transferência de calor para os ambientes.

Segundo Mendonça (2005) os vãos envidraçados são componentes que possibilitam uma relação direta entre o seu interior e o exterior aumentando a incidência da radiação solar direta e potencializa a ventilação e iluminação natural. Para um correto balanço energético, seu dimensionamento é de grande relevância, devendo ser adequado ao clima e ao percurso solar. As áreas envidraçadas reagem às condições climáticas de forma praticamente instantânea, já as opacas reduzem o impacto das incidências externas, devendo assim existir um equilíbrio entre ambas.

A utilização de vidros agrega características que lhes atribuíram grande importância durante a história da arquitetura. Seu uso tornou possível a conexão entre

o meio exterior e interior das edificações (vistas, radiação solar, ventilação) sem que estes estivessem diretamente em contato físico. Embora o vidro seja um material indispensável para a arquitetura, ele possui um coeficiente de transmissão térmica elevado, tornando as áreas envidraçadas pontos termicamente sensíveis na envolvente do edifício. Assim tornou-se alvo de inúmeras pesquisas e desenvolvimento tecnológico para restringir ganhos solares.

Exemplos dessas pesquisas são vinculados também às esquadrias, onde as mais simples são constituídas apenas por um pano de vidro, o que apresenta elevado coeficiente de transmissão térmico sendo assim pouco eficientes, levando a um maior gasto energético para compensar os ganhos de calor no verão e as perdas no inverno. Na década de 50 esquadrias com dois panos de fundo utilizando ar estagnado ou outro gás, como o Árgon, entre seus planos conseguiram melhorar significativamente seu desempenho isolante, incrementando a resistência térmica. A partir da década de 60 surgiram várias películas que foram adicionadas aos panos de vidro das esquadrias de modo a aumentar a reflexão da radiação solar, repelir raios UV e reduzir a emissividade.

2.12 Sistemas de refrigeração evaporativa

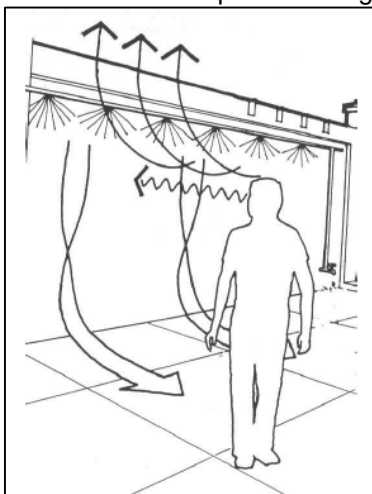
O resfriamento evaporativo é um processo muito antigo, tendo sua origem há milhares de anos, no antigo Egito e na Pérsia.

Segundo Lamberts et al. (2011) o resfriamento evaporativo é uma técnica utilizada para aumentar a umidade relativa do ar e diminuir a sua temperatura. Pode ser obtido de forma direta ou indireta. Para evaporar, a água necessita ganhar calor, esse calor é retirado do ambiente sob forma de calor latente – segundo Rivero (1985, p. 52), energia térmica associada com uma alteração de estado do corpo, não ocorrendo variações da sua temperatura.

Segundo Givoni (1994) existem duas maneiras de refrigerar o ambiente através da evaporação de água:

- Refrigeração evaporativa direta: consiste em, através de equipamentos mecanizados ou processos naturais, expelir gotículas de água no ambiente. Neste processo eleva-se a umidade do ar, o que limita a utilização desta técnica, conforme Figura 12.

Figura 12 – Resfriamento evaporativo direto com microaspersão de água no ar.

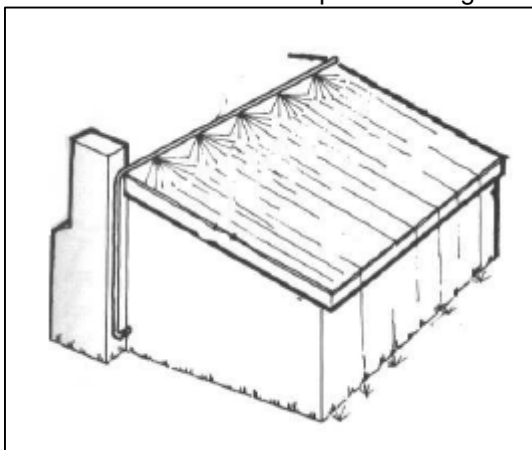


Fonte: Lamberts et al. (2011, p. 29)

Segundo Geetha et al. (2012) sistemas passivos diretos incluem o uso de vegetação para evaporação, o uso de fontes, sprays, piscinas e lagoas, bem como o uso de material poroso saturado com água.

- Refrigeração evaporativa indireta: consiste em direcionar jatos d'água em uma parte exterior da edificação, conforme figura 13, não ocorrendo variação dos níveis de umidade interno da edificação. Esse sistema reduz os ganhos de calor do ambiente.

Figura 13 – Resfriamento evaporativo indireto com microaspersão de água sobre telhado.



Fonte: Lamberts et al. (2011, p. 29)

2.12.1 Percolação de água sobre coberturas

A superfície da cobertura recebe alta incidência de radiação solar direta, sendo responsável por um grande percentual dos ganhos de calor da edificação. A utilização

de água na cobertura aumenta sua capacidade térmica, evitando ganhos excessivos de calor durante o dia.

A água pode ser utilizada em forma de espelhos d'água sobre lajes na cobertura, ou cortinas de água sobre coberturas e fachada, sejam em vidros ou materiais opacos. O movimento da água em estado líquido sobre o componente facilita as trocas com o ar, facilitando assim a evaporação e conseqüentemente resfriando o componente.

Em ensaios realizados por Zeiler et al. na Universidade Tecnológica de Eindhoven, nos Países Baixos, com a utilização de percolação de água sobre telhado de vidro, sendo que este também estava coberto por uma fina película de dióxido de titânio (TiO_2) obteve-se reduções de temperatura próximas a 15°C quando comparada a outra célula-teste de mesma construção, mas sem percolação e sem película de TiO_2 . Percebe-se que a grande redução de temperatura é proporcionada pela percolação da água pois quando desligada a diferença de temperatura entre as células-teste é de apenas 2°C.

2.12.2 Aspersão de água sobre a cobertura

O primeiro sistema comercial utilizando a aspersão de água na cobertura de um edifício data em 1934, nos Estados Unidos da América. Segundo Abernethy (1985) devido a problemas de aquecimento no período do verão na cobertura do terceiro andar, um engenheiro resolveu projetar e instalar um sistema de aspersão de água, tendo como resultado a queda da temperatura interna.

Na seqüência houve uma tendência na utilização de sistemas de aspersão, principalmente após a segunda guerra mundial, mas com o advento dos condicionadores de ar este modelo caiu em esquecimento até meados do ano de 1973 com a crise energética, onde fontes mais econômicas voltaram a tomar força no mercado.

Segundo Abernethy (1985) a evaporação é uma maneira natural de resfriamento uma vez que a cada um 1 quilo de água evaporada absorve-se em média 1000 Btus (British thermal unit) podendo se considerar uma eficiência de até 85%.

O sistema de refrigeração por aspersão não pode ser considerado como um substituto do ar condicionado e sim como um sistema amenizador de temperaturas, uma vez que consegue reduzir a radiação solar incidente sobre o telhado.

O método de refrigeração evaporativa por aspersão de água em coberturas não acumula água sobre sua face externa. Teoricamente, toda a água utilizada no sistema evapora. A água é aplicada por meio de aspersores, sobre a face externa da cobertura em forma de gotículas.

2.13 Recurso solar

Quase todas as formas de energia são, de forma indireta, dependentes da energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diariamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para a geração de energia mecânica ou elétrica. Podendo, ainda, ser convertida em energia elétrica diretamente, com a utilização de certos sistemas, como o termoelétrico e o fotovoltaico. (ANEEL, 2008).

A luz natural disponível para iluminação e aquecimento de ambientes pode ser melhor aproveitada com o auxílio de técnicas de arquitetura e construção. Esta utilização, chamada de aquecimento passivo, decorre da penetração e absorção da radiação solar nas edificações.

Além das condições atmosféricas, a disponibilidade de radiação solar depende da latitude local e da posição no tempo. Consequência do movimento de rotação e translação da Terra (DUFFIE, 2006). Assim, a Terra recebe um diferente grau de intensidade de radiação a cada dia, como é demonstrado na 04. (ANEEL, 2008)

Figura 14 - Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol.

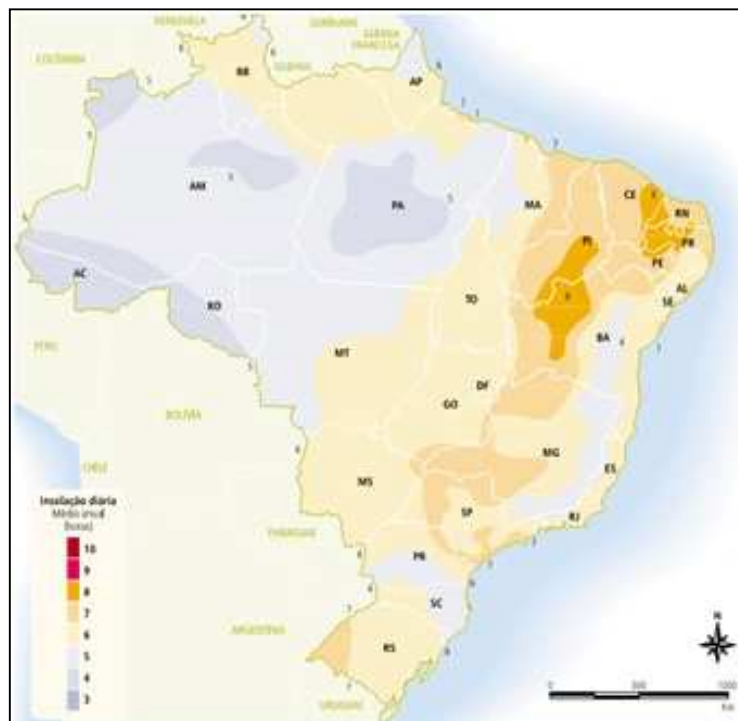


Fonte: MAGNOL (1998)

A duração solar do dia varia, em algumas regiões e períodos do ano de zero a 24 horas. Sendo que as variações mais intensas ocorrem nos pólos e nos períodos

de solstício. O mapa da figura 15 demonstra a média anual de insolação diária, segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

Figura 15 - Média anual de insolação em horas.



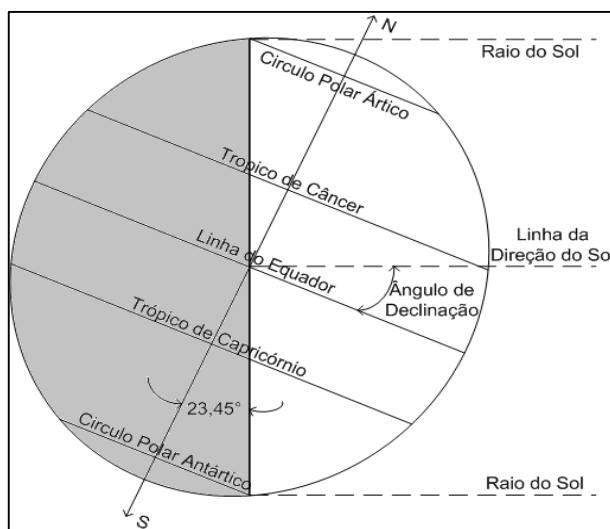
Fonte: CRESESB (2000)

Na maior parte da área física do território brasileiro não são observadas grandes variações da duração solar do dia, fato esse, decorrente do país encontrar-se próximo a linha do Equador. Mas a maior parte da população brasileira e sua produção econômica encontram-se em áreas mais distantes da linha do Equador, centradas no eixo do Trópico de Capricórnio. Nesses locais é aconselhado, para maximizar o aproveitamento solar, ajustar as inclinações dos telhados bem como as fachadas construtivas de acordo com a latitude local.

É importante salientar que, mesmo as regiões com menores índices de radiação, apresentam grande potencial de aproveitamento energético (aquecimento passivo da edificação).

Além dos dados referenciados, ainda se tem uma diferença de inclinação da Terra durante o ano, definida por uma linha entre o centro da Terra e o Sol, conforme a figura 16, a qual formará um ângulo entre essa linha e a linha do Plano Equatorial, chamada de Ângulo de Declinação.

Figura 16 - Definição do ângulo de Declinação.



Fonte: MASTERS, 2004

Através da declinação solar, podemos determinar a quantidade de horas de sol durante o dia, sendo os dias mais longos no Solstício de Verão, que ocorre por volta do dia 22 de dezembro, nesse dia o sol atingirá sua posição mais elevada no céu ao meio-dia solar e o ângulo de declinação $\delta = 23,45^\circ$.

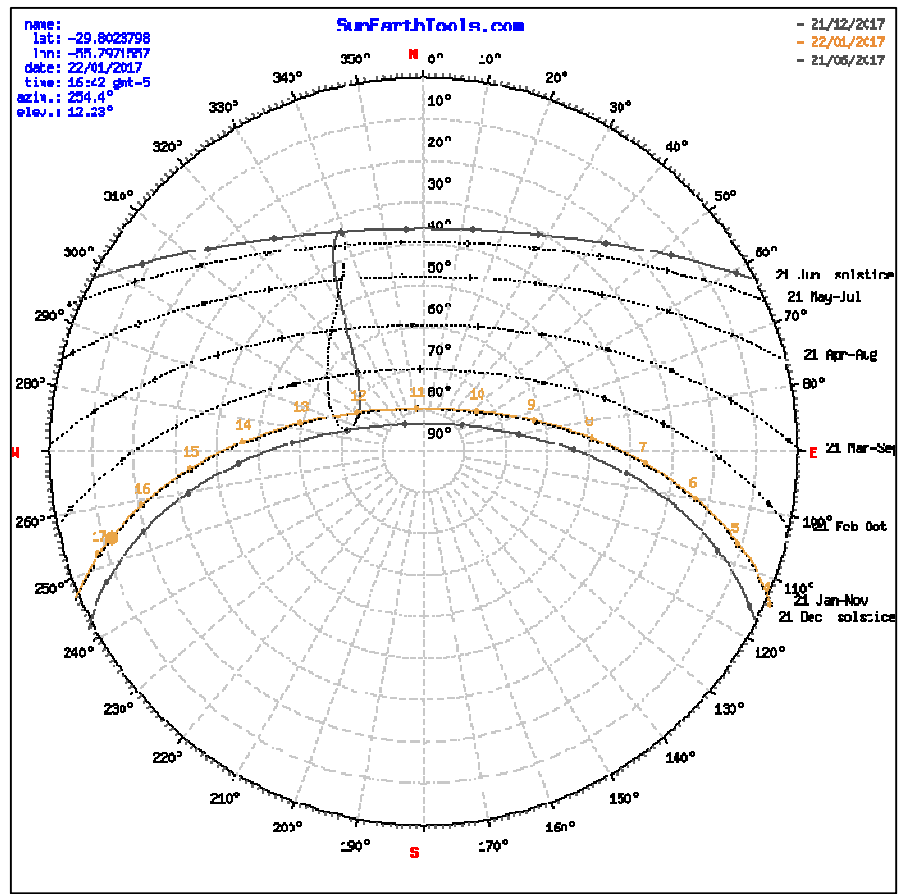
Com a variação anual do eixo da Terra, têm-se duas épocas do ano em que o Sol é visível durante 12 horas diárias em qualquer ponto da Terra, o Equinócio de Outono, aproximadamente em 22 de março, e o Equinócio de Primavera, aproximadamente em 23 de setembro. Nos equinócios a declinação solar é igual a zero ($\delta = 0$).

Já no Solstício de Inverno, ocorrerá o dia mais curto do ano, ocorre por volta de 21 de junho, diz-se que nessa época do ano o sol está na posição mais baixa no céu e seu ângulo de inclinação será de $\delta = -23,45^\circ$.

Para o caso de Alegrete, é possível verificar duas curvas bem específicas de varredura do sol, uma para o verão e outra para o inverno. Isso pode ser comprovado a partir das cartas solares cartesianas (Figura 17) e polar (Figura 18) da cidade de Alegrete - RS de Latitude 29,78 Sul.

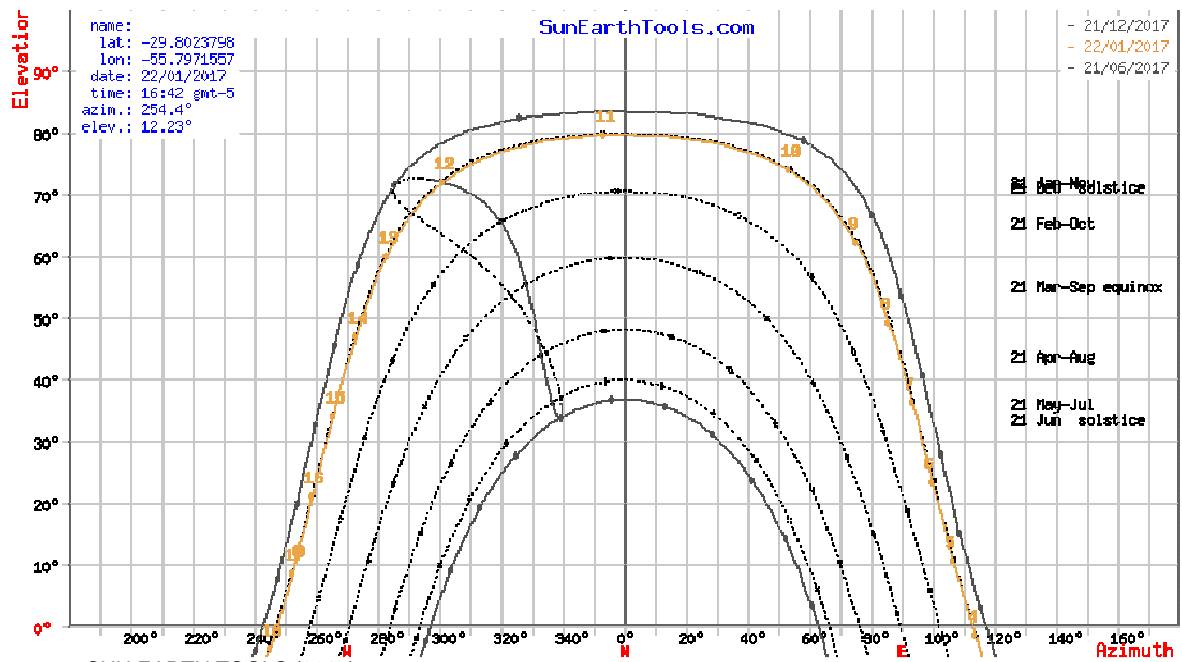
Através desses dados visualiza-se uma grande diferença entre a posição solar, nos mesmos horários do solstício de verão (linha superior da 18) do solstício de inverno (linha inferior da Figura 18).

Figura 17 - Carta solar cartesiana de Alegrete – RS.



Fonte: SUN EARTH TOOLS (2017)

Figura 18 - Carta solar polar Alegrete – RS.



Fonte: SUN EARTH TOOLS (2017)

2.14 Variáveis arquitetônicas

Segundo Silveira (2005, p 1923) a envolvente do edifício determina as trocas térmicas entre os meios exterior e interior, e suas propriedades implicam nas condições ambientais dos espaços internos.

Para Givoni (1998) as propriedades dos fechamentos que controlam estas trocas são: a resistência térmica das superfícies, a inércia térmica do conjunto construído, a absorção ou reflexão da radiação solar pelas faces externas das edificações.

A norma NBR 15220 determina as diretrizes para cálculo das propriedades térmicas dos elementos e componentes da edificação: resistência, transmitância e capacidade térmica, atraso térmico e fator de calor solar, nas condições de um regime estacionário de calor. Na parte 3 desta norma tem-se para cada zona bioclimática os valores aceitáveis para características termofísicas dos elementos construtivos, como atraso térmico (ϕ), transmitância térmica (U) e fator solar (Fs).

2.14.1 Resistência térmica

Segundo a NBR 15220-1 (2005, p.1) a definição de resistência térmica (R) é o “quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário”, calculado através da equação 1.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

R: resistência térmica ($m^2.K/W$);

e: espessura de material sólido homogêneo (m);

λ : coeficiente de condutividade ($W/m.K$).

Para Lamberts et al. (2014, p.210), a resistência térmica de um determinado material é sua propriedade de resistir à passagem do calor. Quanto mais espesso for um material, maior será a resistência que esse material oferece à passagem de calor. Analogamente, quanto maior for a condutividade térmica (λ) de um material, maior será a quantidade de calor transferida entre as suas superfícies, assim será menor a sua resistência térmica.

Segundo Costa (2003, p.69 apud Guareschi, 2008, p.42) o valor do coeficiente de condutividade diminui na ordem sólido-liquido-gasoso, tendo como extremos os valores da prata: 360 Kcal/m.h.°C, altamente condutora, e do ar puro: 0,02 Kcal/m.h.°C, um mal condutor de calor.

A resistência térmica de um material heterogêneo é o resultado da soma da resistência térmica de cada camada homogênea acrescida da resistência superficial externa e interna.

$$R_T = R_{C1} + R_{C2} + \dots + R_{Se} + R_{Si} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

R_T : resistência térmica total ($m^2.K/W$)

R : resistência térmica ($m^2.K/W$)

R_{Se} : resistência superficial externa ($m^2.K/W$)







R_{Si} : resistência superficial interna ($m^2.K/W$)

Segundo Lamberts et al. (2014, p.212) a resistência térmica superficial traduz os efeitos das trocas de calor por radiação e convecção entre a superfície do material sob análise e o meio que o circunda. A resistência superficial é considerada externa quando a superfície considerada está limitando o material e o meio exterior. No mesmo sentido a resistência superficial interna ocorre quando a superfície limita o material e o meio interior.

A primeira fase de transmissão de calor ocorre quando a temperatura do meio exterior é maior que a do meio interior, assim a superfície externa do fechamento irá receber calor do meio por convecção e radiação, ocorrendo assim o incremento da temperatura em uma proporção dependente da resistência superficial externa (R_{Se}), conforme a tabela 3, sendo esta em função da velocidade do vento, podendo, de forma simplificada, adotar-se 0,04 $m^2.K/W$.

Após o equilíbrio entre a temperatura externa e a do material, as trocas térmicas entre as superfícies do material limítrofe e o ar interno acontecem por convecção e radiação ocorrendo aquecimento da superfície interna do fechamento. Segundo a NBR 15220 as perdas de calor por convecção dependerão da resistência superficial interna do fechamento (R_{Si}), conforma a tabela 6, e as perdas por radiação devido à emissividade superficial do material (ϵ).

Tabela 6 – Resistência térmica superficial interna e externa.

R_{Si} (m ² .K/W)			R_{Se} (m ² .K/W)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: Adaptado da NBR 15220-2 (2003, p.7)

A tabela 3 considera em paredes o fluxo de calor na direção horizontal e em coberturas na direção vertical, sendo ascendente quando o exterior está mais frio que o interior (situação próprio de inverno) e descende quando o exterior está mais quente (situação próprio do verão).

2.14.2 Transmitância térmica

O inverso da resistência total do fechamento (envoltória) (equação 3) é a transmitância térmica, sendo esta, segundo Lamberts et al. (2014) considerada a mais importante variável de avaliação do desempenho de fechamentos opacos. A transmitância térmica nos possibilita ter subsídios inclusive para comparar diversas opções de fechamentos através da avaliação do comportamento destes frente à transmissão de calor.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

U: transmitância térmica (W/m².K)

R_T : resistência total (m².K/W)

Ainda segundo Lamberts et al. (2014, p.215) em uma edificação, as trocas de energia (luz ou calor) entre os meios exterior e interior tem como cerne a envoltória construtiva. No estudo da envoltória deve-se levar em conta, todos os fatores que intervêm no problema sendo, um dos principais fatores a radiação solar, onde os materiais de construção comportam-se de maneira diferente. Visto que a envoltória

construtiva se diferencia em fechamentos opacos e transparentes, a diferença entre ambos é a capacidade ou incapacidade de transmitir a radiação solar para o ambiente interno.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado a metodologia utilizada na pesquisa. Serão descritas as células-teste, os equipamentos utilizados, o monitoramento e a aquisição de dados.

3.1 Células-teste

As células-teste encontram-se no pátio da UNIPAMPA, Campus Alegrete, conforme pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Local de testes.



Fonte: o autor

O conjunto é constituído por cinco células-testes, cada uma com dimensões de 0,5 m x 0,5 m, totalizando 0,25m² e volume de 0,1875 m³, altura de 0,92 m na fachada sul e 0,5 m na fachada norte, proporcionando uma água com azimute norte. Todas são fabricadas de chapa de compensado de espessura 20 mm com mesmas dimensões, inclinação do telhado de 40°³ e instaladas com dois modelos de acessórios (com e sem sistema de percolação de água) e para testes conforme a Tabela 7 e três tipos de telha: aluzinco, fibrocimento e vidro.

³ Segundo CRESESB (2000), quando desejado a maximização do uso para o inverno (neste caso aquecimento do ambiente) faz-se necessário a inclinação do telhado para latitude acrescido de 10°, sendo a latitude de Alegrete – RS 29,78°

Tabela 7 – Caracterização das células-teste.

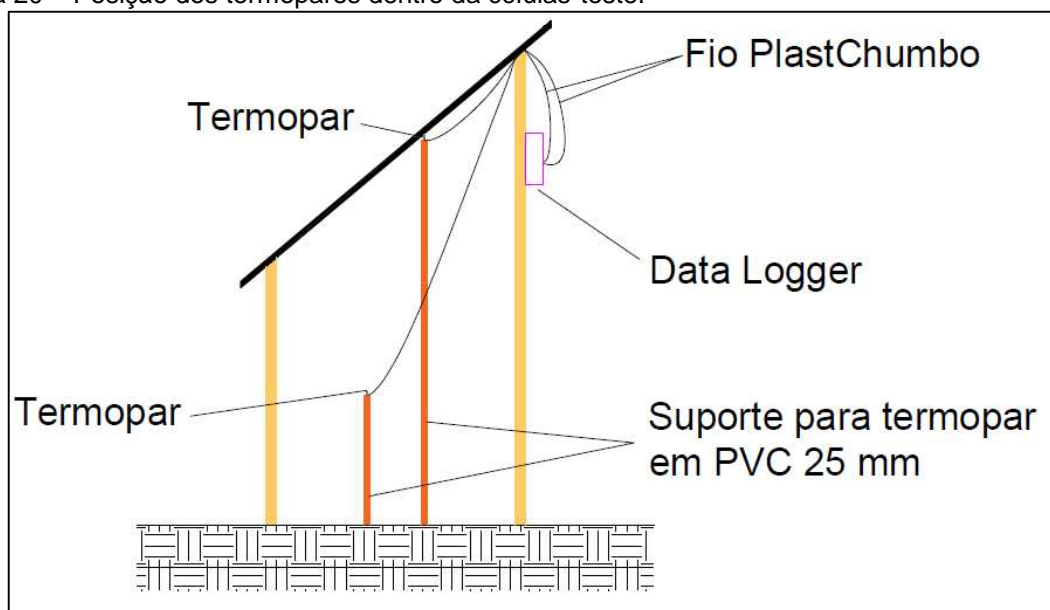
Tipo de telha	Acessório	
	Com percolação de água	Sem percolação de água
Aluzinco	x	x
Fibrocimento	x	x
Vidro	x	

Fonte: o autor

De acordo com pesquisas anteriores como a de Zeiler et al. a cobertura de vidro em condições naturais, ou seja, sem percolação de água não proporciona as características mínimas de conforto ambiental apresentadas pelos demais modelos de cobertura, devido a isto este modelo não foi ensaiado.

A figura 20 apresenta o corte de uma célula-teste, detalhando a posição de instalação dos termopares (sensores de temperatura).

Figura 20 – Posição dos termopares dentro da células-teste.



Fonte: o autor

3.2 Sistema de percolação

O sistema de percolação é composto por uma Motobomba, tubulação de recalque, tubulação de sucção, tubulação de coleta para recirculação de água, micro aspersores e reservatório, conforme pode ser observado na figura 21.

Figura 21 – Sistema de percolação nas células-teste.



Fonte: o autor

Os equipamentos são caracterizados a seguir:

- Motobomba: marca Kohlbach com potência de 1 CV, tensão de alimentação 220 V, altura manométrica 10 mca.
- Tubulação de recalque: de PVC com diâmetro nominal de 25 mm, com o total para as três células-teste de 9 metros de comprimento;
- Tubulação de sucção: de PVC com diâmetro nominal de 40 mm e 0,40 m de comprimento.
- Tubulação de recirculação: calha em PVC com diâmetro de 100 mm e 4,90 metros de comprimento no total;
- Micro aspersores nebulizador: 22 micro aspersores nebulizadores com rosca de ¼” como mostra a figura 22. As células-teste com telhados de fibrocimento e aluzinco tem sete micro aspersores cada, e a célula-teste de vidro oito micro aspersores.

Figura 22 – Micro aspersor.



Fonte: o autor

Ainda segundo o fabricante, devido às suas características construtivas, distribui a água pelo efeito vórtice, imprimindo grande velocidade rotacional, provocando a formação de micro gotas que saem do emissor em um jato em forma de cone como apresenta a figura 23.

Figura 23 – Efeito vórtice do micro aspersor.



Fonte: Photogenesis (2017, não paginado)

Para vedação é necessário o uso de uma chulinha ¼” como mostra a figura 24.

Figura 24 – Chulinha para vedação - anel em azul.



Fonte: Photogenesis (2017, não paginado)

- Micro aspersor utilizado do sétimo dia até o final (Figura 25). A substituição de todos foi necessária devido à obstrução dos aspersores utilizados até então e o novo modelo proporcionar maior vazão reduzindo a possibilidade de entupimento.

Figura 25 – Aspersor utilizado do sétimo dia até o final.



Fonte: o autor

- Reservatório: caixa d'água com capacidade de 100 litros.

3.3 Sistema de monitoramento e aquisição de dados

O monitoramento e a aquisição de dados deram-se através de termopares instalados em duas alturas dentro das células-teste: um a 50cm, na metade da altura da célula-este, e o outro logo abaixo da cobertura durante este trabalho serão chamados respectivamente de termopares baixo e alto (Figura 26).

Figura 26 – Termopares.



Fonte: o autor

Os termopares foram conectados aos Data loggers, responsáveis pelo armazenamento de dados como mostra a figura 27 e 28. A coleta dos dados foi

realizada diariamente das 7 horas da manhã às 21 horas, com intervalos de coleta de dados de 20 minutos.

Figura 27 – Data logger marca contemp.



Fonte: o autor

Figura 28 – Data logger marca novus.



Fonte: o autor

A medição das temperaturas foi realizada em um total de 14 dias nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, ocorridos no período climático característico de verão,

compreendido entre 21 de dezembro e 21 de março, simultaneamente nas cinco células-teste.

As medidas de temperatura foram obtidas através de 10 sensores termopares do tipo k similares a figura 29.

Figura 29 – Termopar tipo k.



Fonte: Deal Extreme (2017, não paginado)

A ligação do termopar ao data logger é feita através de cabo PlastiChumbo 2x0,75 mm² conforme a figura 30.

Figura 30 – Ligação com fio PlastiChumbo.



Fonte: o autor

Para a coleta foi necessário a utilização de dois data loggers de 8 canais cada, sendo estes alocados um para conjunto de células-teste sem percolação (Data logger marca Novus modelo field logger de 8 canais, por hora chamado de data logger 1) conforme a figura 31.

Figura 31 – Localização data logger 1 marca novus.



Fonte: o autor

Para o conjunto de células-teste com percolação (Data logger marca Contemp modelo A202 de 8 canais, por hora chamado de data logger 2) conforme figura 32.

Figura 32 – Localização data logger 2 marca contemp.



Fonte: o autor.

Os equipamentos data loggers fornecem tabelas e gráficos com as leituras realizadas. Todos os dias após as 21 horas foi realizada a coleta de dados e já configurado para a leitura do próximo dia.

3.4 Câmera infravermelha

A utilização de imagens em infravermelho é uma técnica inovadora para observação do comportamento térmico, e ainda pouco disseminada no Brasil, em especial na construção civil. Toda via, ela apresenta grande suporte para análises (térmicas, energéticas e patológicas) de elementos construtivos de edificações. O emprego desta tecnologia é útil para melhorias do conforto ambiental aliada a redução do consumo de energia, pois contribui para a escolha mais adequada do material.

A câmera infravermelha utilizada neste estudo foi o modelo FLIR T420 (figura 33) fabricada pela empresa FLIR SYSTEMS.

Figura 33 – Câmera infravermelha FLIR T420.



Fonte: FLIR systems manual do operador T420.

Esta câmera é capaz de medir e reproduzir em imagem a radiação de infravermelhos emitida por um objeto. As características da câmera estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 – Características câmera infravermelha FLIR T420.

Resolução da imagem:	320 x 240 pixels
Amplitude espectral:	7,5 a 13 μ m
Amplitude de temperaturas:	20°C a 650°C
Resolução:	0,1 °C
Precisão	\pm 2,0 °C ou 2% da leitura

Fonte: FLIR systems manual do operador T420.

Para fazer as imagens, a câmera foi posicionada perpendicularmente ao objeto e com distância de medição próxima a 1 metro. As imagens foram capturadas dia 15 de fevereiro de 2017 às 15 horas.

4 RESULTADOS

A coleta de dados foi feita no período de 15 de janeiro de 2017 a 06 de março de 2017 conforme cronograma apresentado na tabela 9.

Tabela 9 – Período de coleta de dados.

Teste	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
Mês	Janeiro					Fevereiro						Março		
Dia	15	18	20	21	22	14	15	19	20	22	27	28	2	6

Fonte: o autor.

Devido à obstrução por sujeira, todos os aspersores foram substituídos a partir da sétima medição. Este novo modelo foi escolhido por proporcionar maior vazão e reduzir as possibilidades de entupimento.

4.1 Cálculo da transmitância térmica

Através das equações 1, 2 e 3, dos dados construtivos referentes a cada tipo de telha e suas propriedades térmicas, foi desenvolvido o cálculo de transmitância térmica de todos os modelos de célula-teste com arrefecimento e sem arrefecimento.

Os valores finais de resistência e transmitância térmica são apresentados na tabela 10 e a seus cálculos demonstrados no anexo D.

Tabela 10 – Resumo dos cálculos de resistência e transmitância térmica.

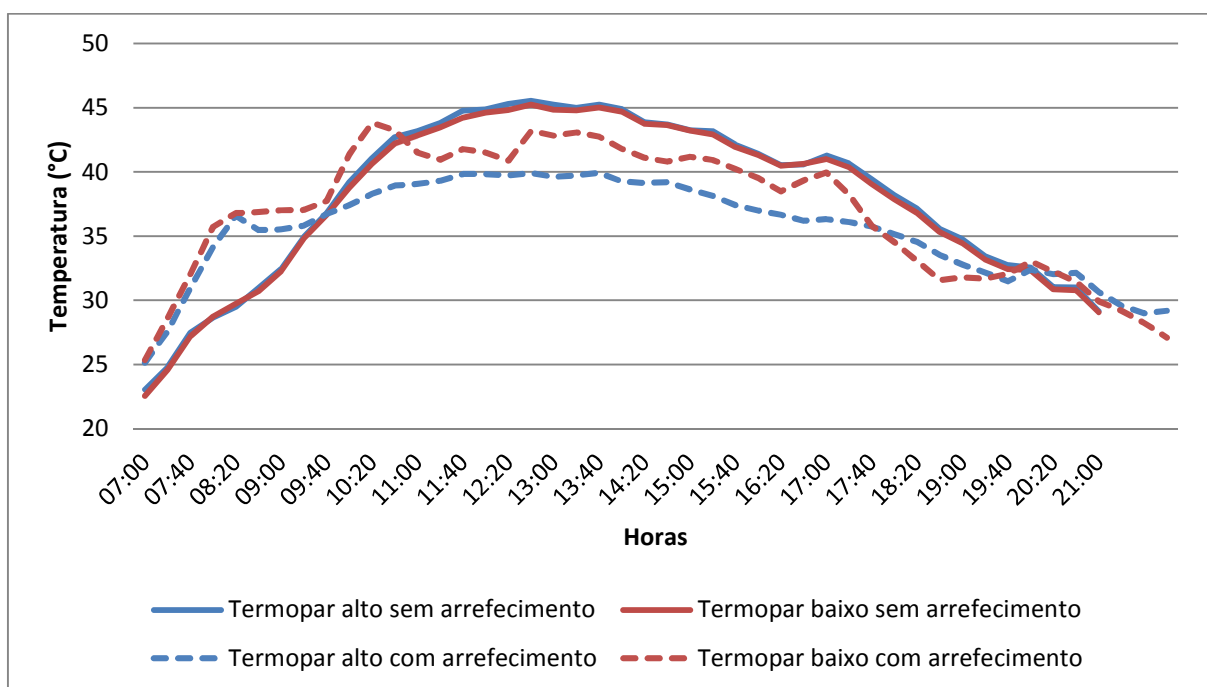
Acessório	Tipo de telha	Resistência térmica (R_t)	Resistência térmica total (R_T)	Transmitância térmica (U)
Sem Arrefecimento	Fibrocimento	0,0123	0,22	4,45
	Aluzinco	$4,46 \times 10^{-6}$	0,21	4,76
	Vidro	4×10^{-6}	0,21	4,67
Com Arrefecimento	Fibrocimento	0,0123	0,27	3,67
	Aluzinco	$4,46 \times 10^{-6}$	0,26	3,84
	Vidro	4×10^{-6}	0,26	3,78

Fonte: o autor.

4.2 Célula-teste de fibrocimento

Através das leituras de temperatura apresentadas no anexo A é possível definir o comportamento médio da célula-teste de fibrocimento conforme apresentado no gráfico da figura 34, onde é possível afirmar a redução de temperatura entre a célula arrefecida e a célula sem arrefecimento.

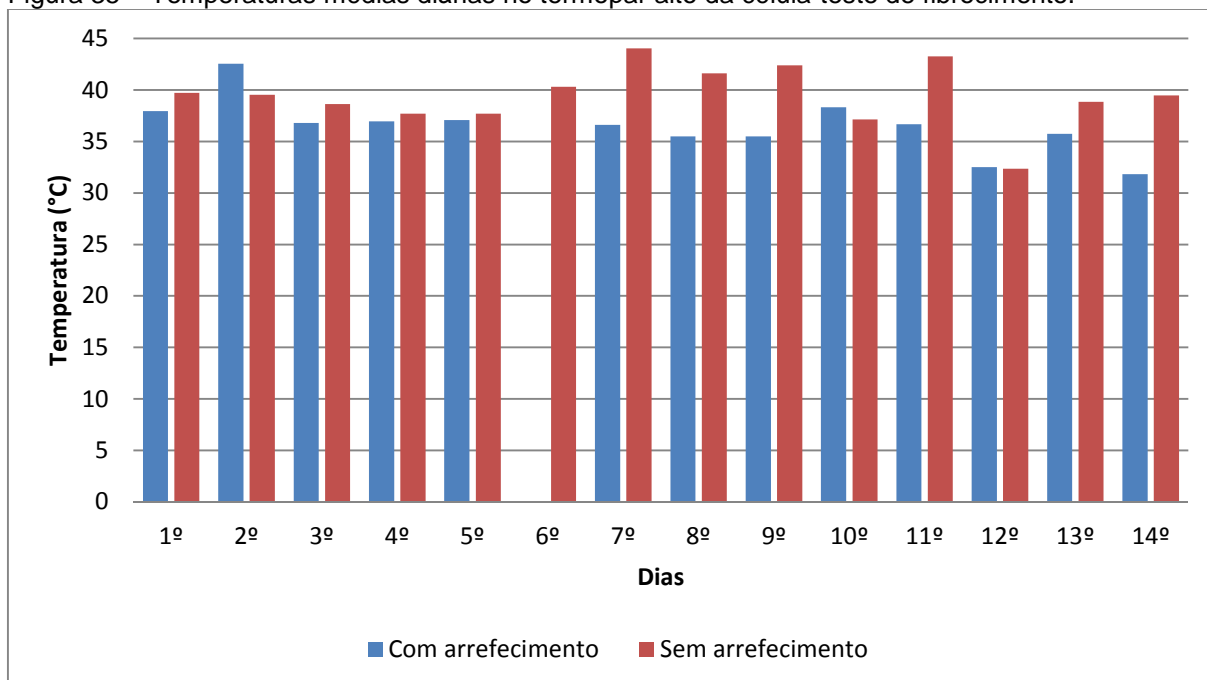
Figura 34 – Média horária de temperatura da célula-teste de fibrocimento.



Fonte: o autor

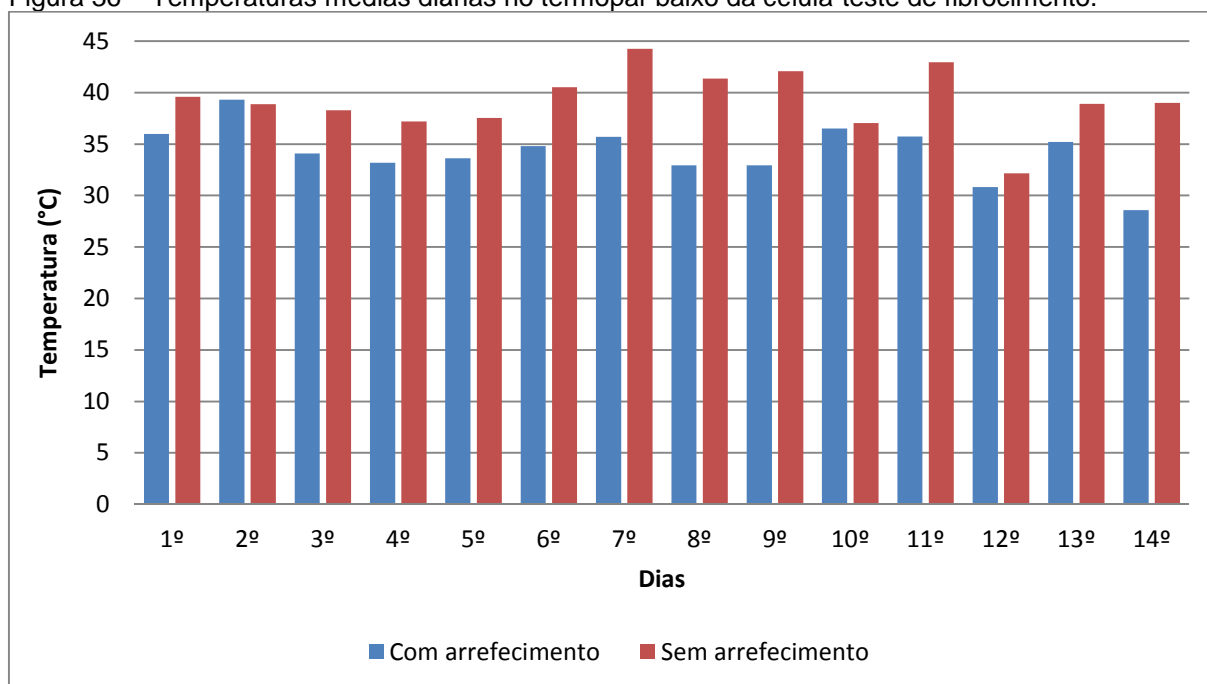
Ainda, a característica de redução de temperatura é apresentada em quase todas as medidas efetuadas nos testes conforme representado nas figuras 35 e 36. Vale ressaltar que a partir da sétima leitura foi alterado o modelo de aspersor proporcionando uma maior vazão sobre as células-teste, consequentemente reduzindo a temperatura interna das células.

Figura 35 – Temperaturas médias diárias no termopar alto da célula-teste de fibrocimento.



Fonte: o autor

Figura 36 – Temperaturas médias diárias no termopar baixo da célula-teste de fibrocimento.



Fonte: o autor

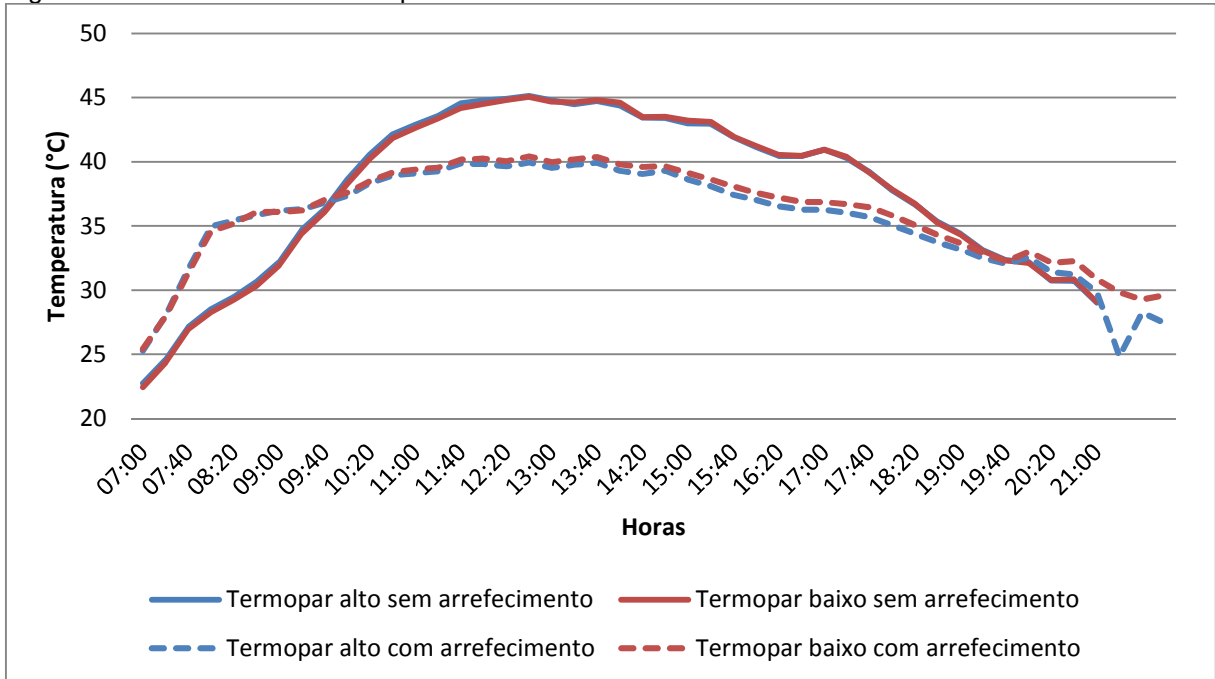
Assim é possível verificar a temperatura média das células-teste sem arrefecimento no sensor alto de 39,49°C e no sensor baixo de 39,27°C, já para as células-teste com arrefecimento a temperatura foi de 36,47°C para o sensor alto e 34,35°C para o sensor baixo, possibilitando assim uma redução de 8% na temperatura próxima ao telhado e de 13% na temperatura interna da célula-teste.

Isso também pode ser comprovado através dos cálculos de transmitância térmica para ambos os casos. Para o caso do modelo sem arrefecimento o valor da transmitância térmica (U) é 4,45 W/m².K. Já para este caso com arrefecimento determinou-se a transmitância térmica (U) de 3,67 W/m².K.

4.3 Célula-teste de aluzinco

Através das leituras de temperatura apresentadas no anexo B é possível definir o comportamento médio da célula-teste de aluzinco conforme apresentado no gráfico da figura 37, onde é possível afirmar a redução de temperatura entre a célula arrefecida e a célula sem arrefecimento.

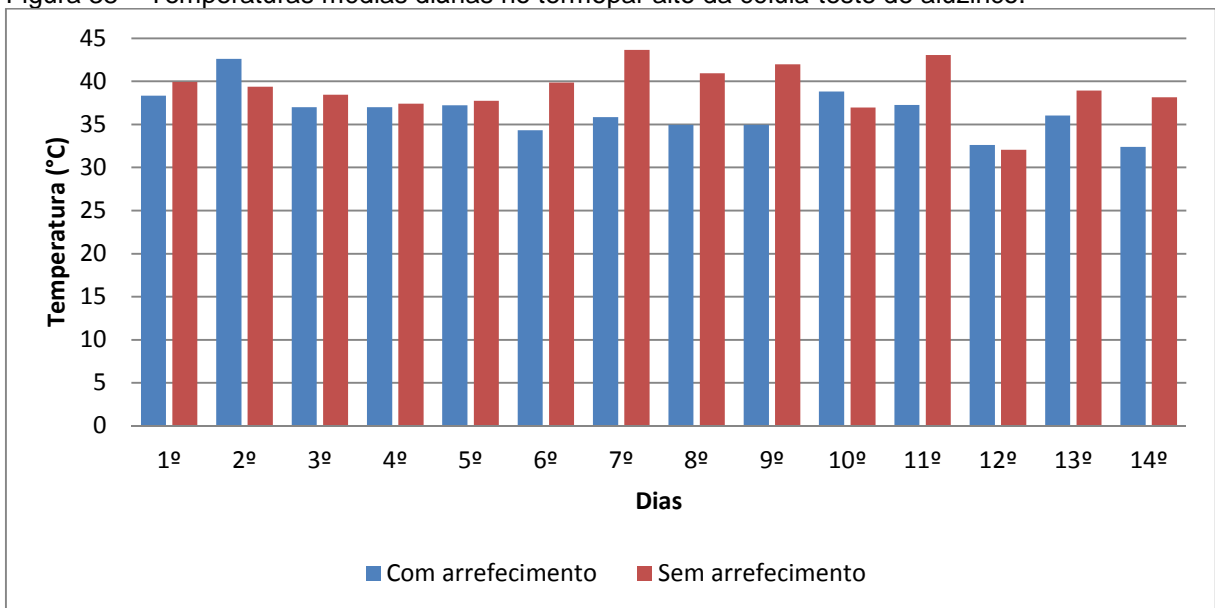
Figura 37 – Média horária de temperatura da célula-teste de aluzinco.



Fonte: o autor

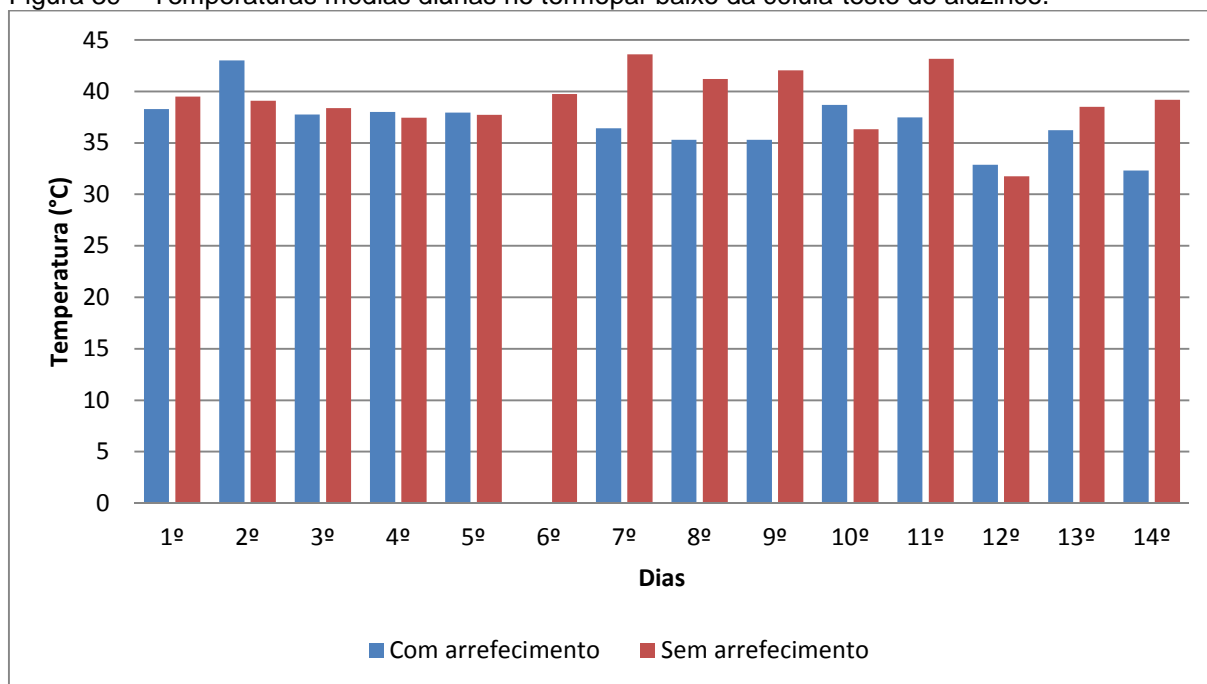
Ainda, a característica de redução de temperatura é apresentada em quase todas as medidas efetuadas nos testes conforme representado nas figuras 38 e 39. Vale ressaltar que a partir da sétima leitura foi alterado o modelo de aspersor proporcionando uma maior vazão sobre as células-teste, consequentemente reduzindo a temperatura interna das células.

Figura 38 – Temperaturas médias diárias no termopar alto da célula-teste de aluzinco.



Fonte: o autor

Figura 39 – Temperaturas médias diárias no termopar baixo da célula-teste de aluzinco.



Fonte: o autor

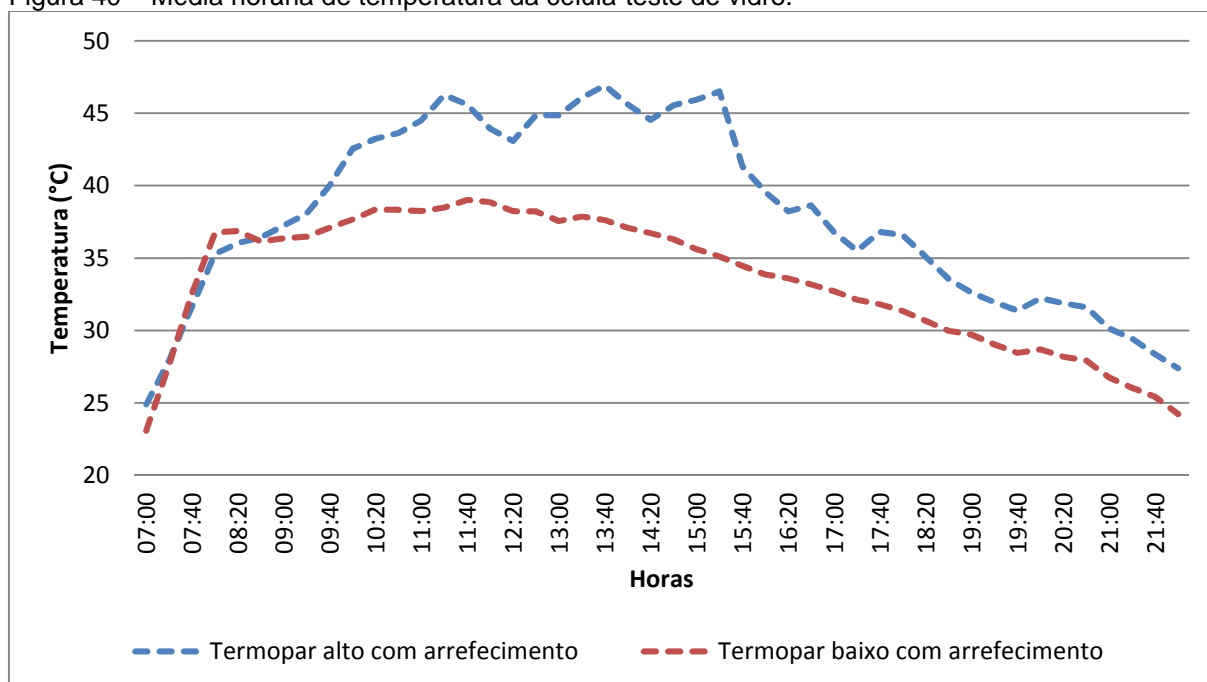
Assim é possível verificar a temperatura média das células-teste sem arrefecimento no sensor alto de 39,18°C e no sensor baixo de 39,12°C, já para as células-teste com arrefecimento a temperatura foi de 36,39°C para o sensor alto e 36,89°C para o sensor baixo, possibilitando assim uma redução de 7% na temperatura próxima ao telhado e de 6% na temperatura interna da célula-teste.

Isso também pode ser comprovado através dos cálculos de transmitância térmica para ambos os casos. Para o caso do modelo sem arrefecimento o valor da transmitância térmica (U) é 4,75 W/m².K. Já para este caso com arrefecimento determinou-se a transmitância térmica (U) de 3,84 W/m².K.

4.4 Célula-teste de vidro

Através das leituras de temperatura apresentadas no anexo C é possível definir o comportamento médio da célula-teste de vidro conforme apresentado no gráfico da figura 40.

Figura 40 – Média horária de temperatura da célula-teste de vidro.



Fonte: o autor

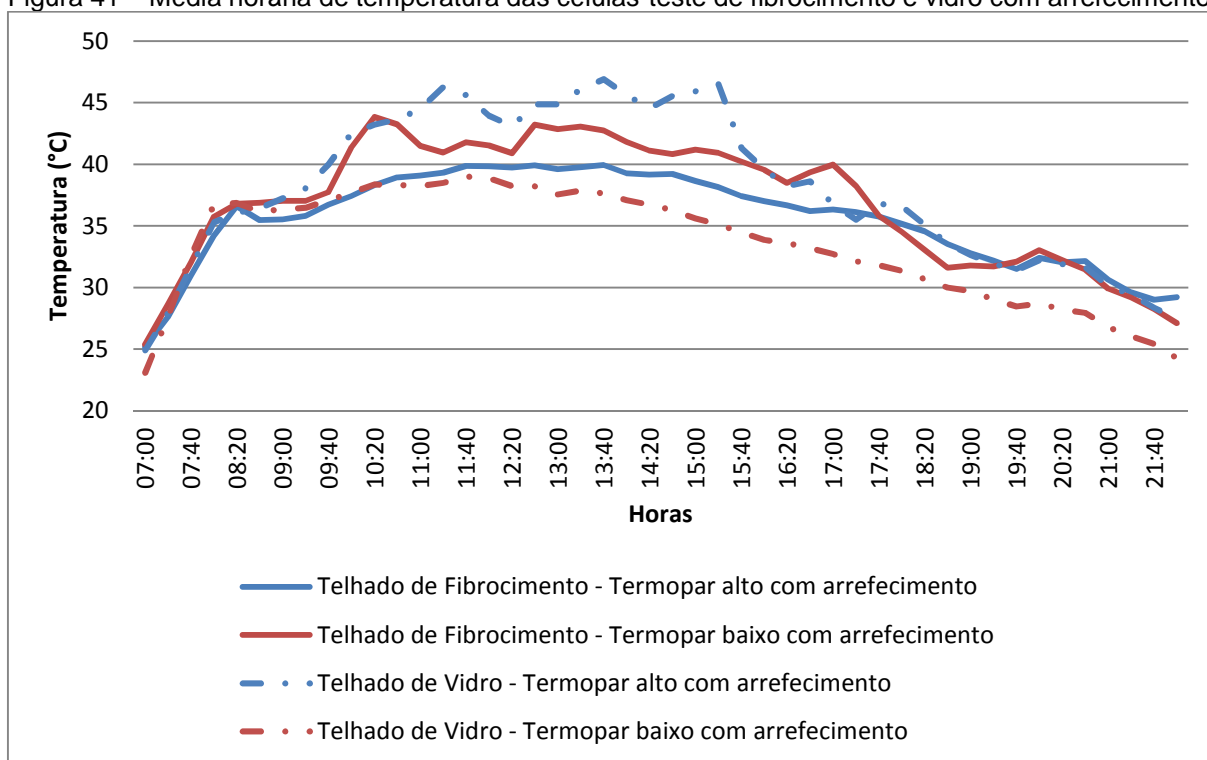
A temperatura média das células-teste com arrefecimento no sensor alto é de 38,2°C e no sensor baixo de 39,88°C.

Isso também pode ser comprovado através dos cálculos de transmitância térmica para ambos os casos. Para o caso do modelo sem arrefecimento o valor da transmitância térmica (U) é 4,67 W/m².K. Já para este caso com arrefecimento determinou-se a transmitância térmica (U) de 3,78 W/m².K.

4.4.1 Fibrocimento x Aluzinco x Vidro

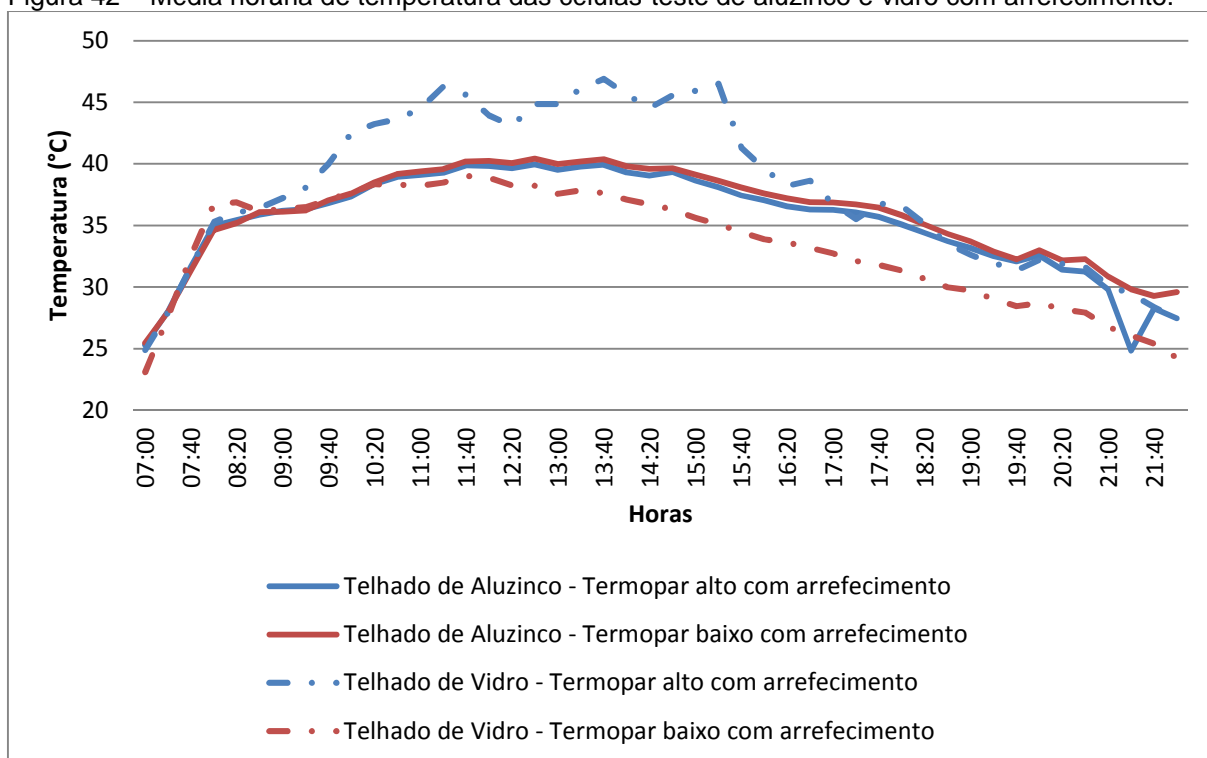
A partir das medições foi possível demonstrar a viabilidade térmica da instalação de aspersores em coberturas, pois com sua utilização obteve-se uma redução significativa na temperatura interna das células-teste. Assim é possível observar nas figuras 41, 42 e 43 que as temperaturas médias das células-teste desenvolveram um padrão de utilização. Com crescimento da temperatura acentuado nas primeiras horas da manhã, chegando ao pico de temperatura no meio dia e decréscimo já nas primeiras horas da tarde.

Figura 41 – Média horária de temperatura das células-teste de fibrocimento e vidro com arrefecimento.



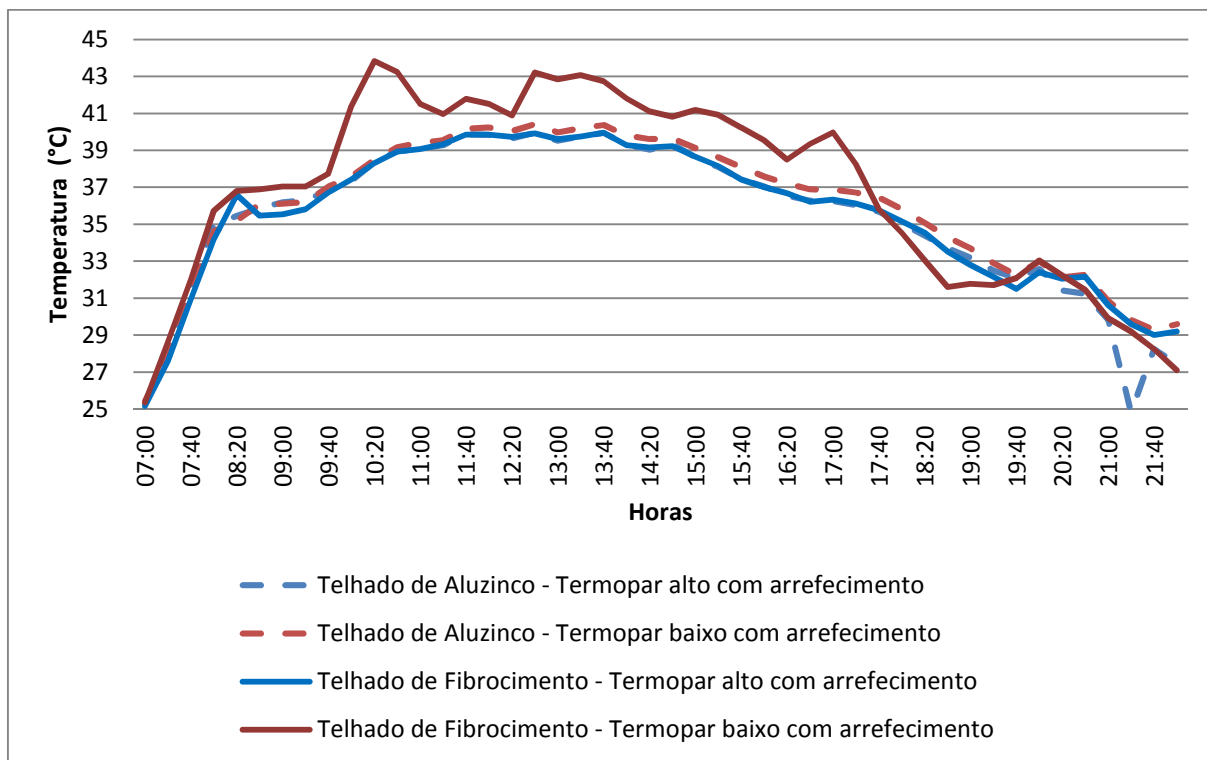
Fonte: o autor

Figura 42 – Média horária de temperatura das células-teste de aluzinco e vidro com arrefecimento.



Fonte: o autor

Figura 43 -Média horária de temperatura das células-teste de aluzinco e fibrocimento com arrefecimento.



Fonte: o autor

Quando comparadas, a célula-teste que obteve o melhor rendimento, apresentando menores temperaturas, foi a célula-teste com telhado de fibrocimento. Embora tenha apresentado bastante variação nas temperaturas no termopar alto, a telha de fibrocimento foi a que manteve a temperatura média de modo linear e de menor valor no termopar baixo, aquele que representa a temperatura interna da edificação modelo.

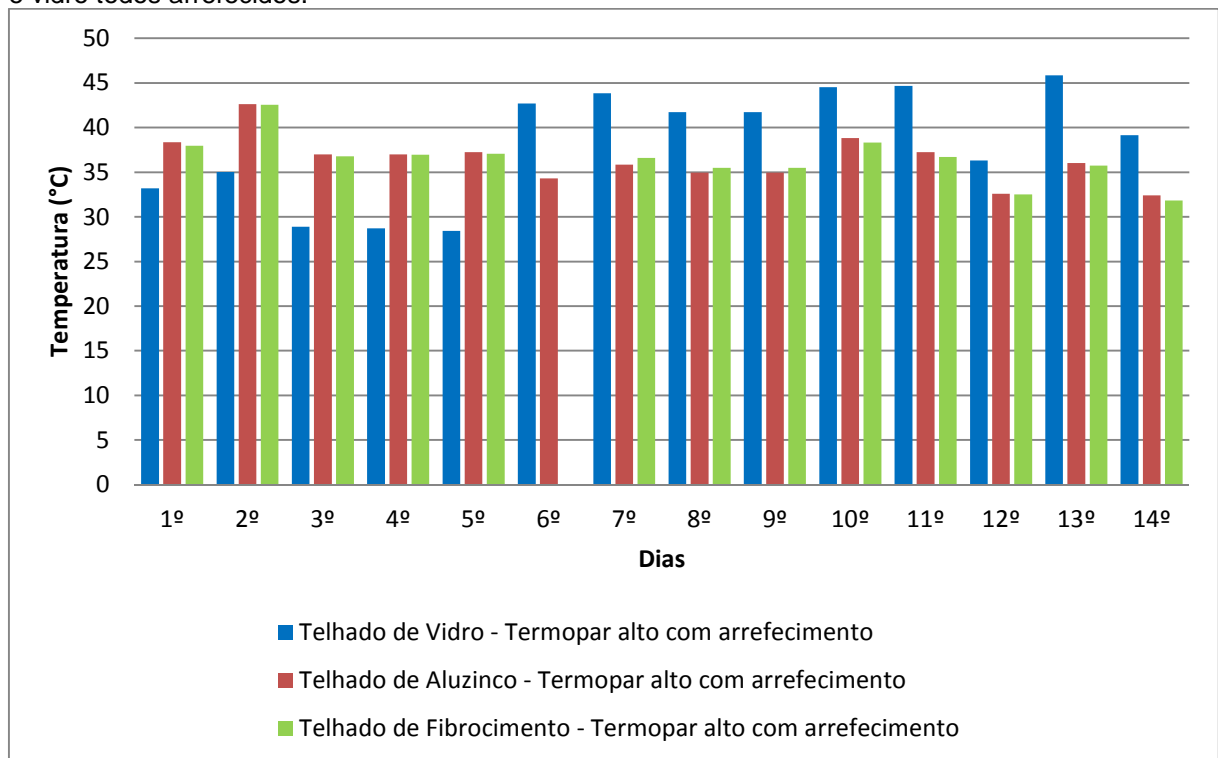
Portanto, a utilização do telhado de fibrocimento com percolação de água, aliado a outras estratégias para conforto térmico, podem constituir uma edificação com bom desempenho térmico para altas temperaturas.

Contudo, este resultado, não exclui a utilização dos outros tipos de coberturas analisados. Isso porque os testes consideraram somente o comportamento dos materiais das coberturas quando usados com percolação de água. No entanto, uma edificação deve ser considerada em sua totalidade, levando em conta materiais e espessura das paredes externas; materiais de acabamento; pintura; posicionamento das aberturas e ainda a relação da edificação com a insolação direta ou indireta de vedação externas, aberturas e coberturas.

Assim, até mesmo a utilização de uma cobertura de vidro aliado à manta de percolação de água pode ser viável. Principalmente quando se precisa ou se quer iluminação natural interna.

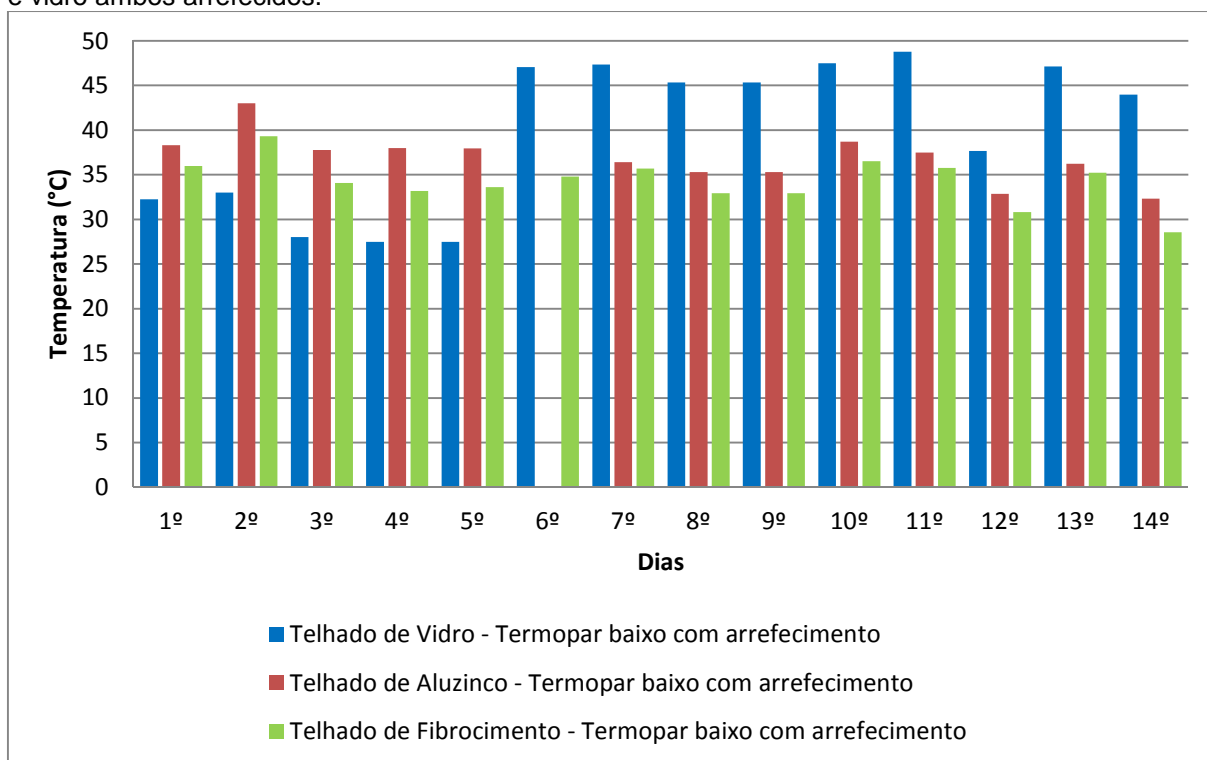
As figuras 44 e 45 mostram as médias de temperaturas no termo pares alto e baixo, respectivamente, durante os dias analisados, nas três células testes com percolação.

Figura 44 – Temperaturas médias diárias no termopar alto das células-teste de fibrocimento, aluzinco e vidro todos arrefecidos.



Fonte: o autor

Figura 45 – Temperaturas médias diárias no termopar baixo das células-teste de fibrocimento, aluzinco e vidro ambos arrefecidos.

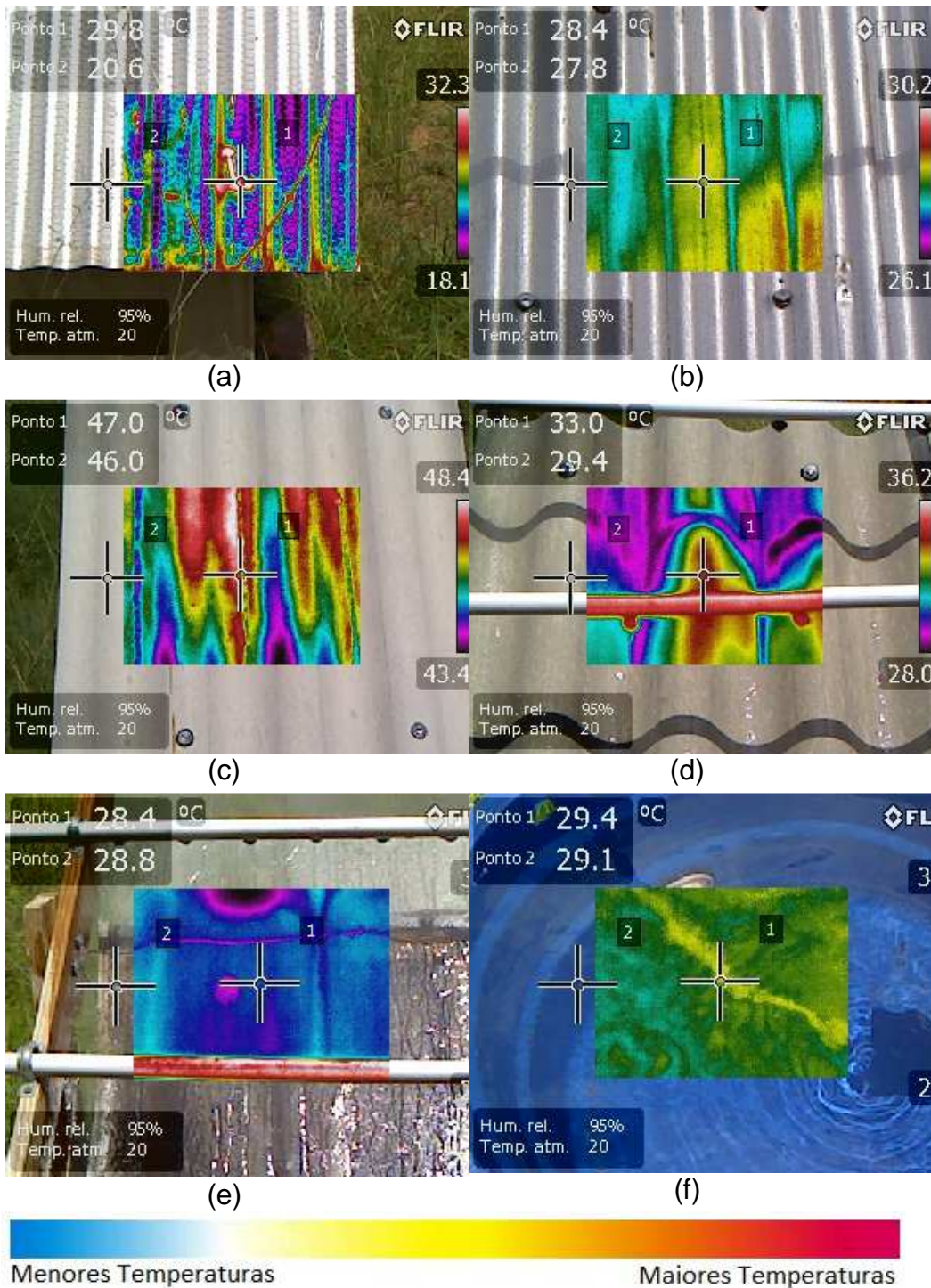


Fonte: o autor

4.5 Análise térmica das células-teste

Através das imagens da figura 46, é possível verificar que a temperatura superficial dos telhados respeita a temperatura da água do reservatório, assim se for possibilitado à redução da temperatura da água, pode ser possível reduzir ainda mais a temperatura das células-teste.

Figura 46 – Fotos térmicas das células-teste. (a) Célula-teste aluzinco sem arrefecimento. (b) Célula-teste aluzinco com arrefecimento. (c) Célula-teste fibrocimento sem arrefecimento. (d) Célula-teste fibrocimento com arrefecimento. (e) Célula-teste vidro com arrefecimento. (f) Reservatório de água. (g) Matriz de temperatura conforme cores.



Fonte: o autor

Através da matriz de cores apresentada na figura 46g pode-se verificar as temperaturas superficiais dos telhados das células-teste, esta respeita a relação em ordem crescente de temperatura, assim quanto mais próximo azul menor a temperatura e do vermelho, maior.

É possível verificar uma menor variação de temperatura no telhado de aluzinco arrefecido, figura 46b, do que no telhado sem arrefecimento, figura 46a. Esse comportamento com muita variação de temperatura pode ser explicado pelo tipo de cobertura/material. Além disso, a pouca espessura da telha de aluzinco a torna mais suscetível a ganhos e perdas de calor devido às condições climáticas do momento.

No telhado-de fibrocimento (figura 46d), é possível verificar para a célula-teste arrefecida um comportamento similar à telha de aluzinco, pois as temperaturas de superfície da cobertura com arrefecimento aparenta valores abaixo dos coletados na célula-teste sem arrefecimento (figura 46c).

Já a superfície célula-teste com vidro arrefecido (figura 46e) é a que apresenta temperatura mais próxima à temperatura da água do reservatório (figura 46f). Isso pode ser explicado pela característica do vidro ser um material liso, sem ondulações ou rugosidades, possibilitando maior troca de calor entre o vidro e água. No entanto, por ser transparente deixa a radiação passar para o meio interno da célula-teste, e contribuindo para o seu desempenho ruim em relação à temperatura interna da célula, quando comparado aos outros materiais analisados.

5 CONCLUSÕES

Quando se fala de conforto térmico em edificações, inúmeras são as variáveis envolvidas, mas sem dúvida deve-se tratar da otimização do desempenho de cada material no projeto através da correta especificação. A melhoria do material depende da otimização de suas propriedades térmicas, o que está relacionado não apenas com a composição do material, mas, sobretudo, com o tratamento das superfícies externas.

Observou-se que a percolação de água sobre a superfície externa dos telhados ensaiados teve redução de temperatura no ambiente interno das células-teste, sendo a célula-teste de fibrocimento que mostrou melhor desempenho, visto que se obteve reduções de temperatura em média de 8% para o sensor alto e de 13% para o sensor baixo. Já para a célula-teste de aluzinco obteve-se reduções de temperatura em média de 7% para o sensor alto e de 6% para o sensor baixo. Na célula-teste de vidro observou-se que a utilização do arrefecimento por manta de água, apresentou a temperatura interna próxima às temperaturas internas das outras células teste, porém um pouco mais alta (em média 3° C) que aos valores coletados para os telhados de fibrocimento e aluzinco.

A aplicação do sistema de arrefecimento apresentado provou causar impacto nas condições de conforto térmico do ambiente, vale frisar que este modelo foi desenvolvido para uso em telhados, mas pode ser adaptado em fechamentos verticais.

Assim, pode-se dizer que, por meio de refrigeração evaporativa, a técnica do resfriamento passivo torna-se um potencial para utilização nos telhados de fibrocimento, aluzinco e vidro na região de Alegrete-RS.

A possibilidade de uso de água da chuva torna-se uma alternativa atraente, trazendo grande benefício a um custo baixo.

Ainda, levando-se em consideração as características construtivas das edificações da região onde foram realizados os ensaios, é possível afirmar que a grande parte das edificações desperdiça relevantes oportunidades de economia de energia, utilizando aparelhos de ar condicionado como recurso para resfriamento dos ambientes internos das edificações.

Um dos principais desafios de engenheiros e arquitetos é a harmonização do conforto ambiental e a eficiência energética das edificações, desde a fase de projeto,

construção e utilização final, conciliando os avanços da arquitetura bioclimática, materiais, equipamentos e tecnologias construtivas.

REFERÊNCIAS

ABERNETHY, D. **Evaporative roof cooling**: a simple solution to cut cooling costs. Second Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, College Station, TX, September 24-26, 1985.

ABNT NBR 15220. **Desempenho térmico de edificações - Parte 3**: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações de interesse social.

ABNT NBR 15575-5. **Edificações habitacionais - Desempenho Parte 5**: Requisitos para sistemas de coberturas. Rio de Janeiro. 2013.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª edição, Brasília, 2008.

ASHRAE. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA, 1992.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2014**. Empresa de Pesquisa Energética. 2014

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030. Eficiência Energética**. 2007.

COSTA, E. C. **Arquitetura ecológica**: condicionamento térmico natural. São Paulo: Blucher, 1982.

CRESESB. **Atlas Solarimétrico do Brasil**, UFPE, 2000.

DEL MAR. C. P. Panorama jurídico ABNT NBR 15575. SindusCon-SP. Disponível em: <http://new.sinduscondf.org.br/uploads/arquivos/1167/_5267fe1901682.pdf>. Acesso em 29 jan. 2017.

Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. **Radiant barrier attic fact sheet**, 1991.

DUFFIE & Beckman. **Solar engineering of termal processes**; Wiley, 2006

FLIR SYSTEMS, Manual do operador. Modelo T420. Disponível em: <http://www.flir.com.br/uploadedFiles/Instruments/Products/T-Series/T-Series-Brochure.pdf> - Acessado em 05/03/17.

- FROTA, A. B. et al. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GUARESCHI, M. **Avaliação do desempenho térmico de edificações desportivas na cidade de Santa Maria-RS**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- GEETHA, N. B. et al. **Passive cooling methods for energy eficiente buildings with and without termal energy storage – A review**. EEST Part A: Energy Science and Research, 2012.
- GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. Van Nostrand Reinhold. New York, 1994.
- GUTHS, S. et al. **Um transdutor de fluxo de calor a gradient tangencial**. In: Congresso Brasileiro em Engenharia mecânica. Belo Horizonte, 1995.
- JUNIOR, C. C. et al. **Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo**. São Paulo: Pini, 2010.
- KÖPPEN, W. **Climatologia**. México, Fundo de Cultura Econômica, 1931.
- KUNH. M. et al. **Design guidelines for green roofs**. City Hall Toronto, 2000.
- LAMBERTS, R. **Desempenho térmico de coberturas leves com ático**; Bancada de testes e modelo matemático. Porto Alegre. UFRGS. 1983.
- LAMBERTS, R. et al. **Eficiência energética na arquitetura**. Rio de Janeiro. Eletrobrás/Procel, 2014.
- LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis, 2011.
- LAMBERTS, R. et al. **Casa Eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis. UFSC/LabEEE. 2010.
- MASCARÓ, L. R. **Energia na Edificação: Estratégias para minimizar seu consumo**. São Paulo. Ed. Parma. 1985. Rio de Janeiro. 2003.
- MASCARÓ, L. R. **O custo das decisões arquitetônicas**. Ed. Masquatro - 5ª edição. Porto Alegre. 2010.

MASTERS, G. M. **Renewable and eficiente eletric power systems**; Wiley, 2004.

MENDONÇA, P. J. F. **Habitar sob uma segunda pele: Estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados**. Tese – Universidade do Minho. Guimarães. 2005.

MICHELS, C. **Análise da Transferência de Calor em Coberturas com Barreiras Radiantes**. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

RORIZ, V. F. **Refrigeração evaporativa por aspersão em telhas de fibrocimento: estudo teórico e experimental**. 171 f. Dissertação – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2007.

SOUZA, R. V. G. **Sustentabilidade e eficiência energética no ambiente construído**. Belo Horizonte, CREA-MG, 2009.

TEIXEIRA, C. F. B. **Comportamento térmico de coberturas de fibrocimento em Campinas, SP: Aplicação de técnicas passivas**. Campinas, 2006.

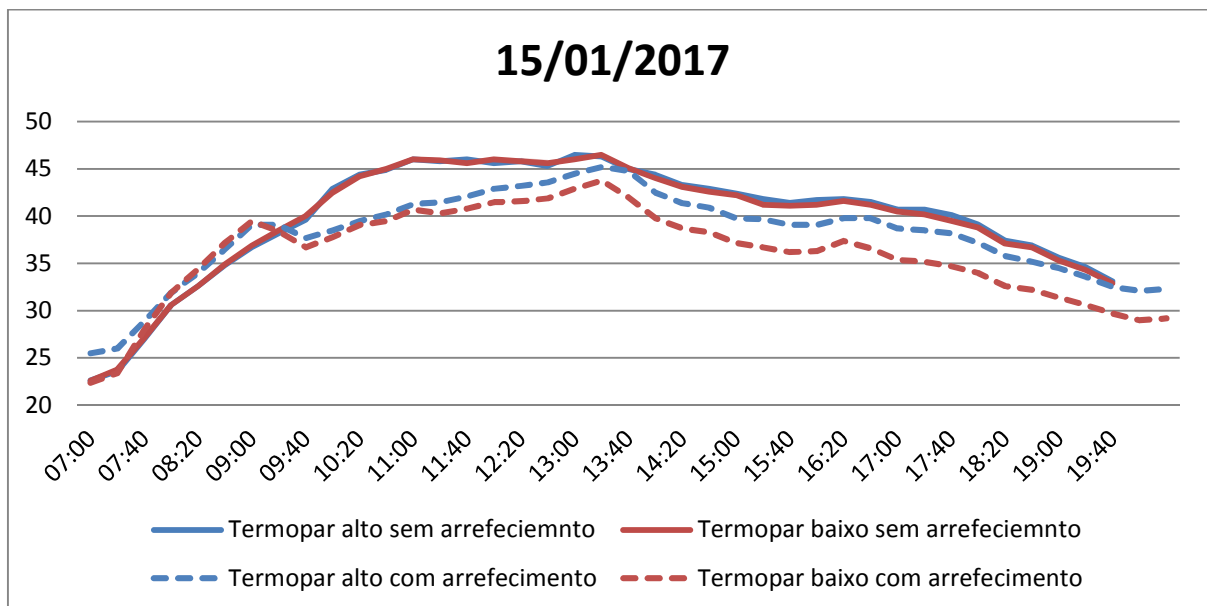
VITTORINO, F. et al. **Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas**. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Curitiba, 2003.

ZILER, W. et al. **Active roof cooling of Atria**. 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally architecture Lima, Peru. November 2012.

ANEXO A – Gráficos célula-teste de fibrocimento

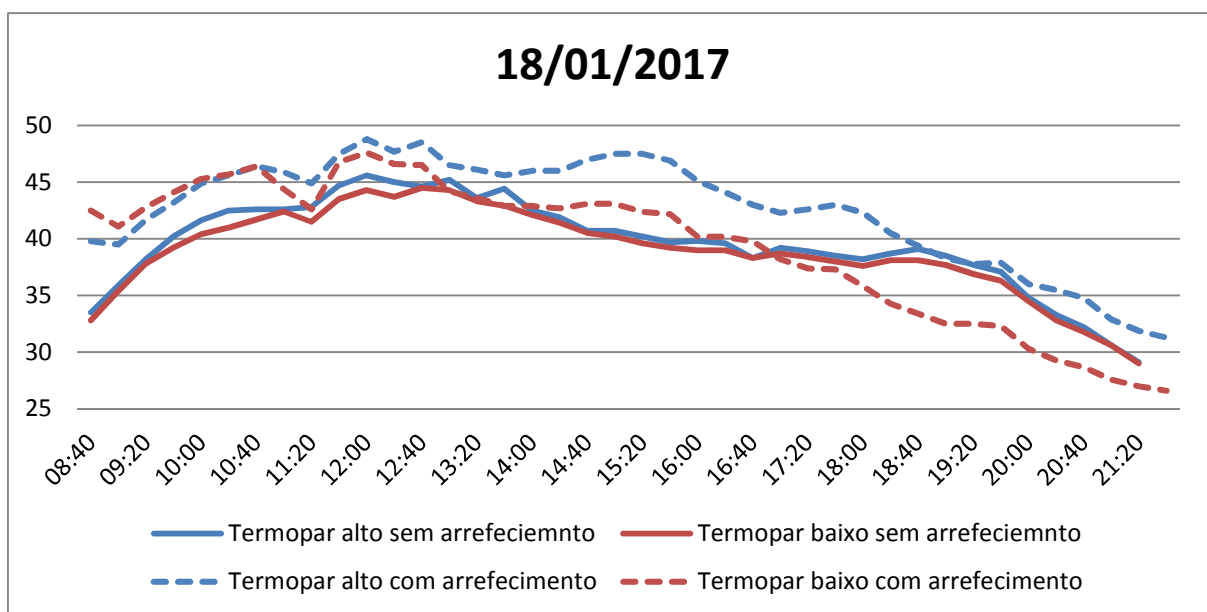
Gráficos das células-teste de fibrocimento com e sem arrefecimento para cada dia de teste.

Figura A1 – Leituras célula-teste fibrocimento.



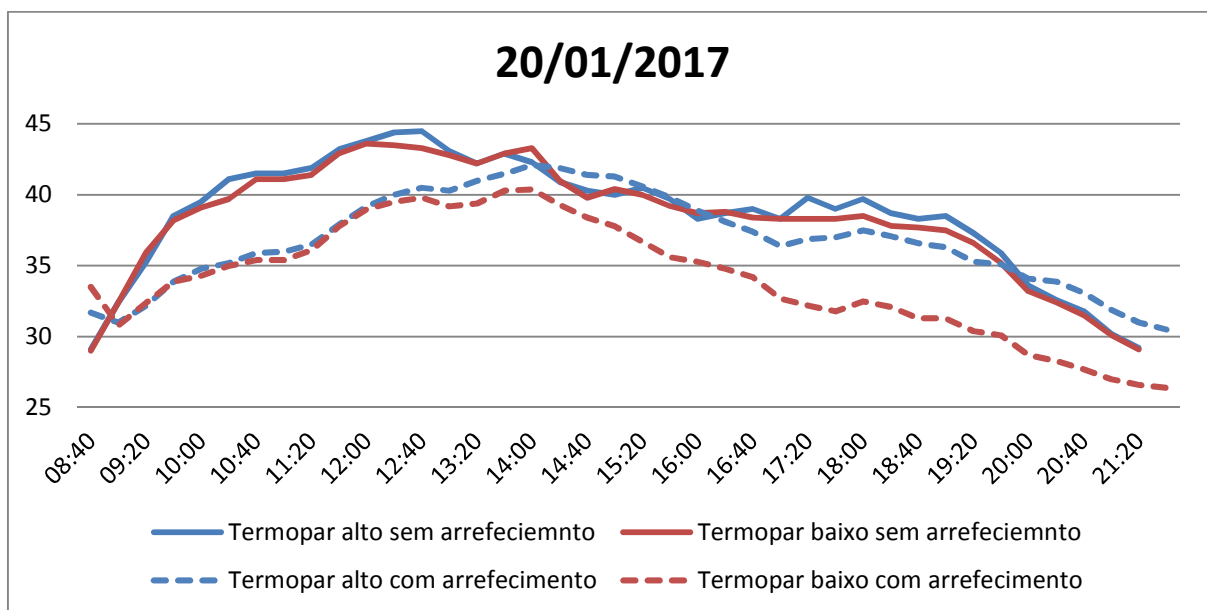
Fonte: o autor

Figura A2 – Leituras célula-teste fibrocimento.



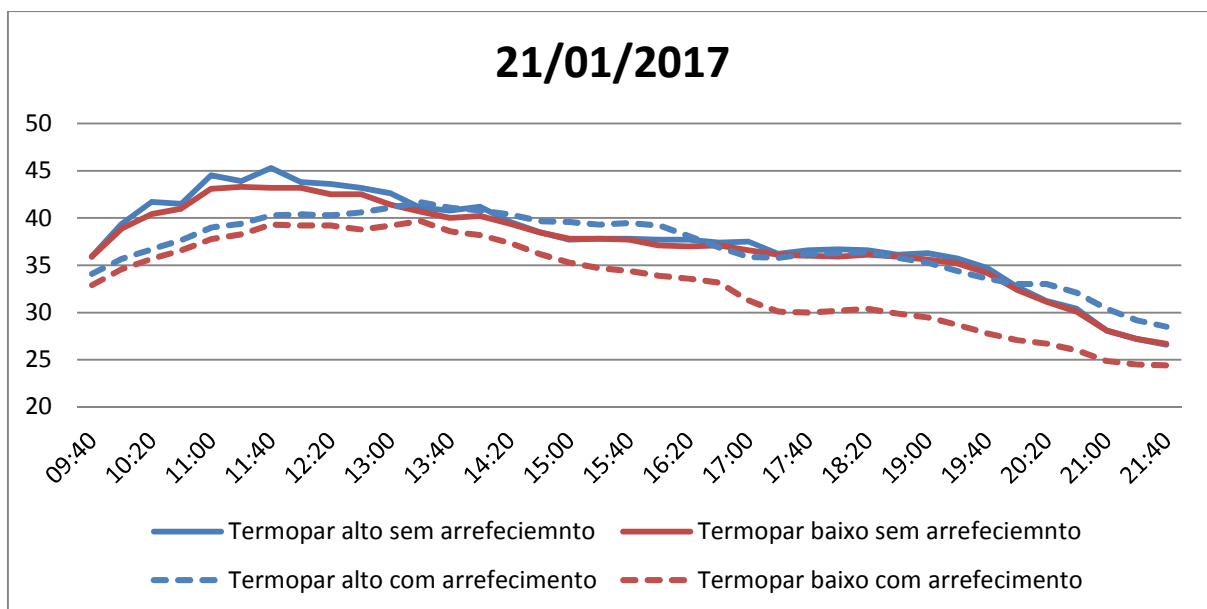
Fonte: o autor

Figura A3 – Leituras célula-teste fibrocimento.



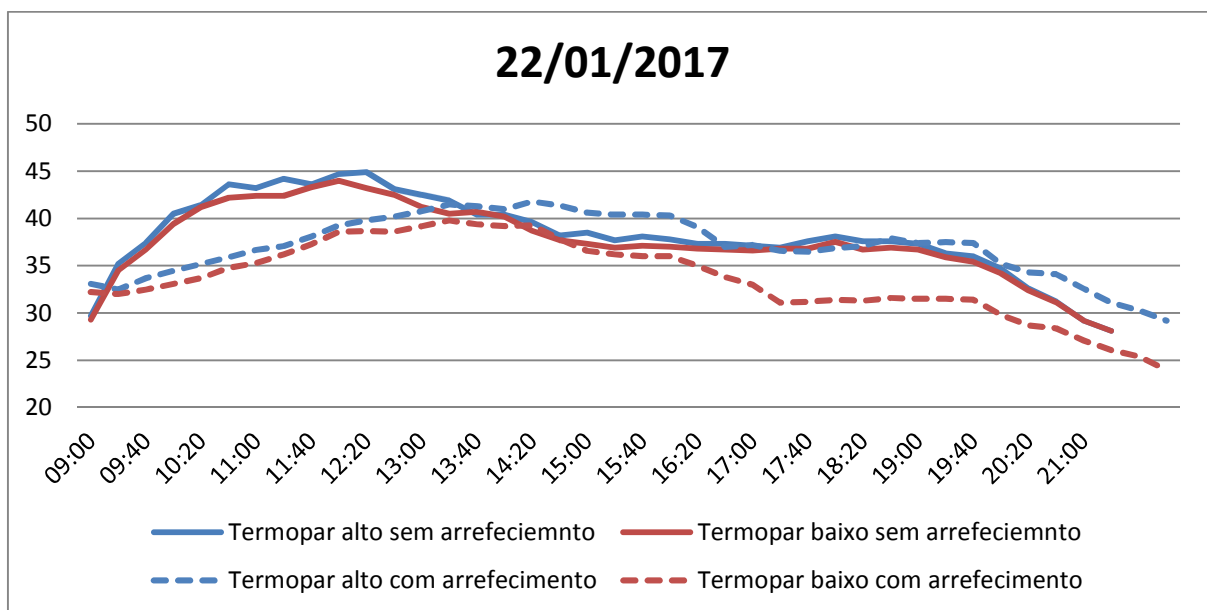
Fonte: o autor

Figura A4 – Leituras célula-teste fibrocimento.



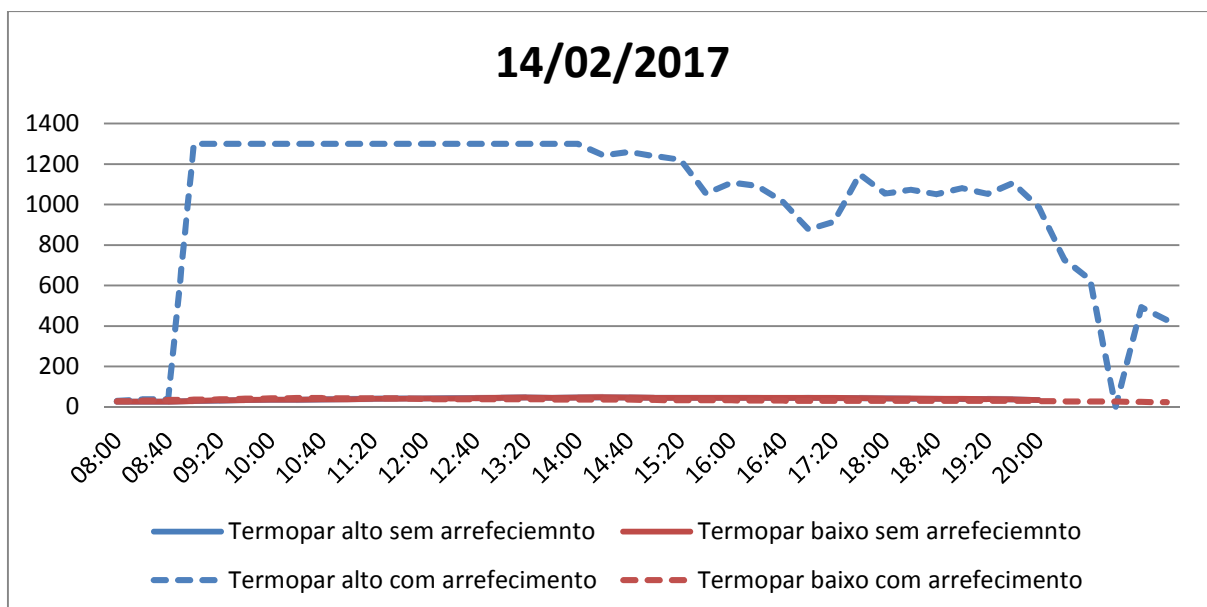
Fonte: o autor

Figura A5 – Leituras célula-teste fibrocimento.



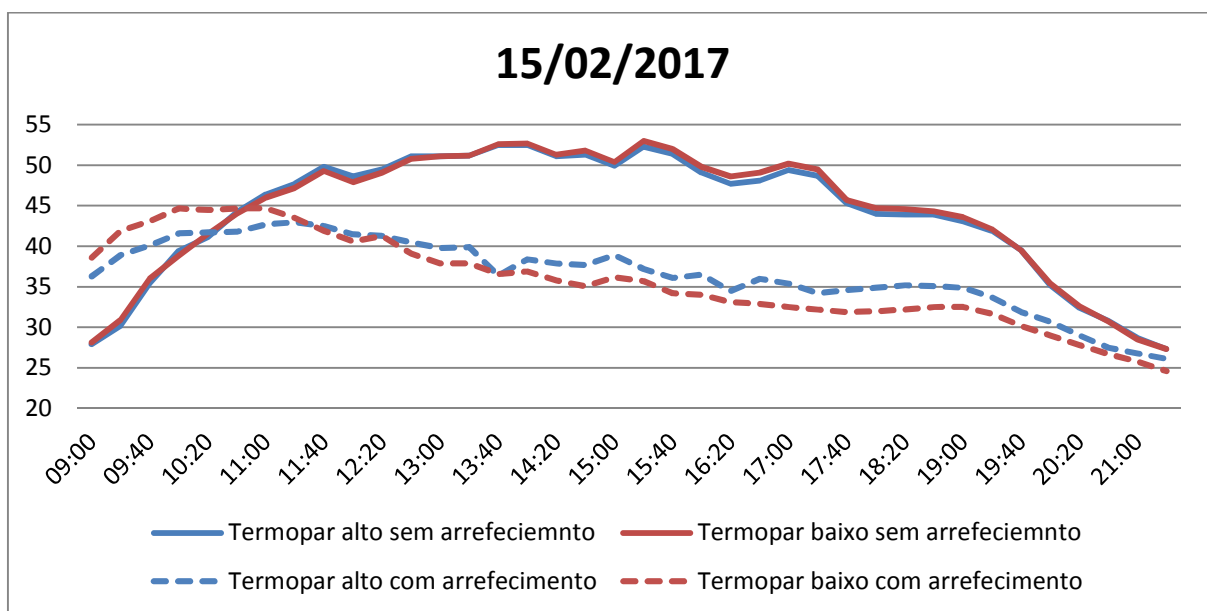
Fonte: o autor

Figura A6 – Leituras célula-teste fibrocimento.



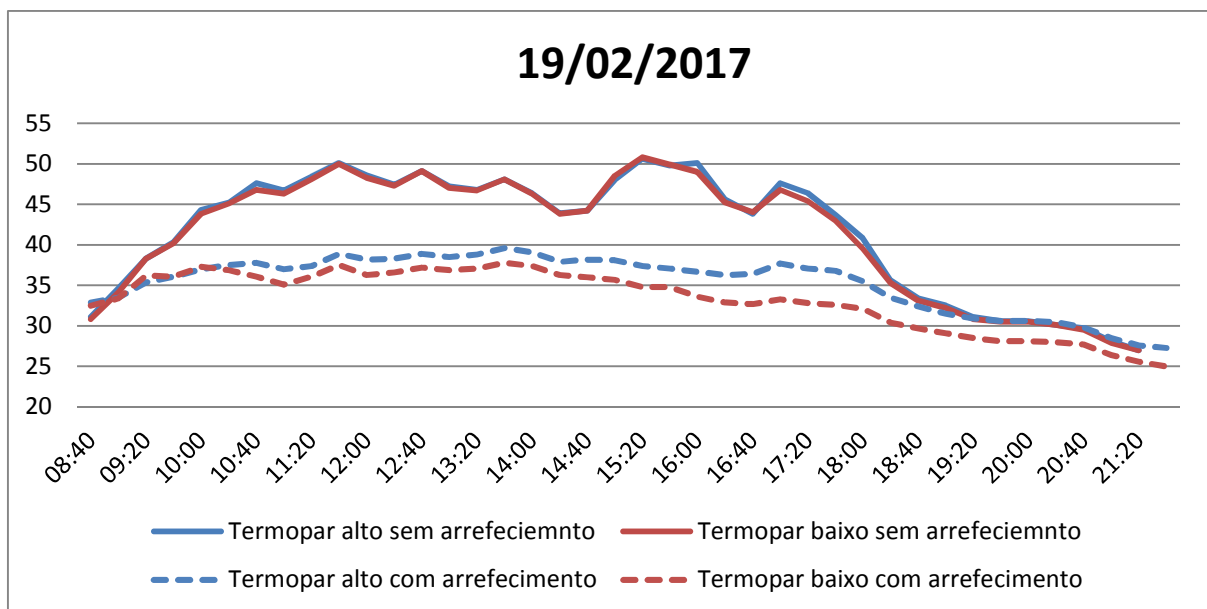
Fonte: o autor

Figura A7– Leituras célula-teste fibrocimento.



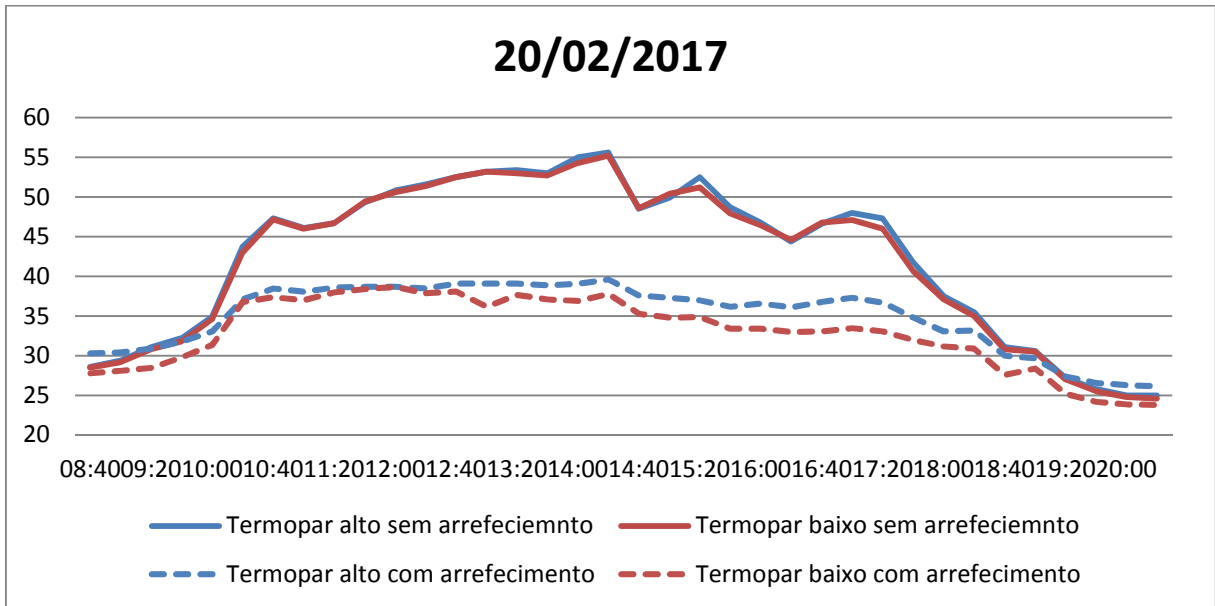
Fonte: o autor

Figura A8 – Leituras célula-teste fibrocimento.



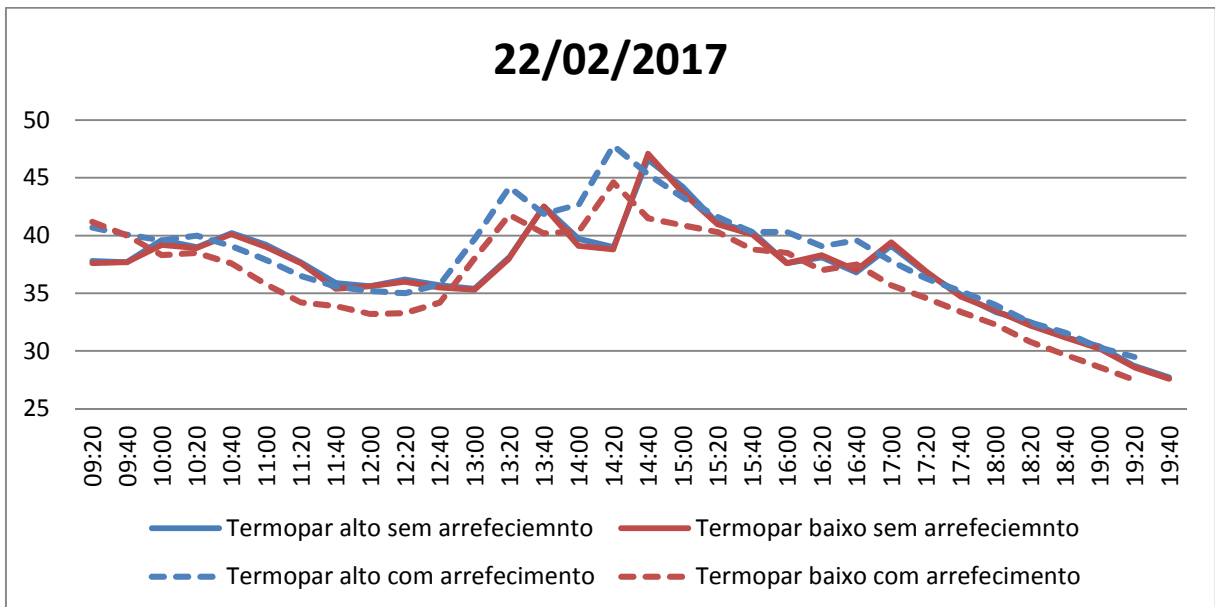
Fonte: o autor

Figura A9 – Leituras célula-teste fibrocimento.



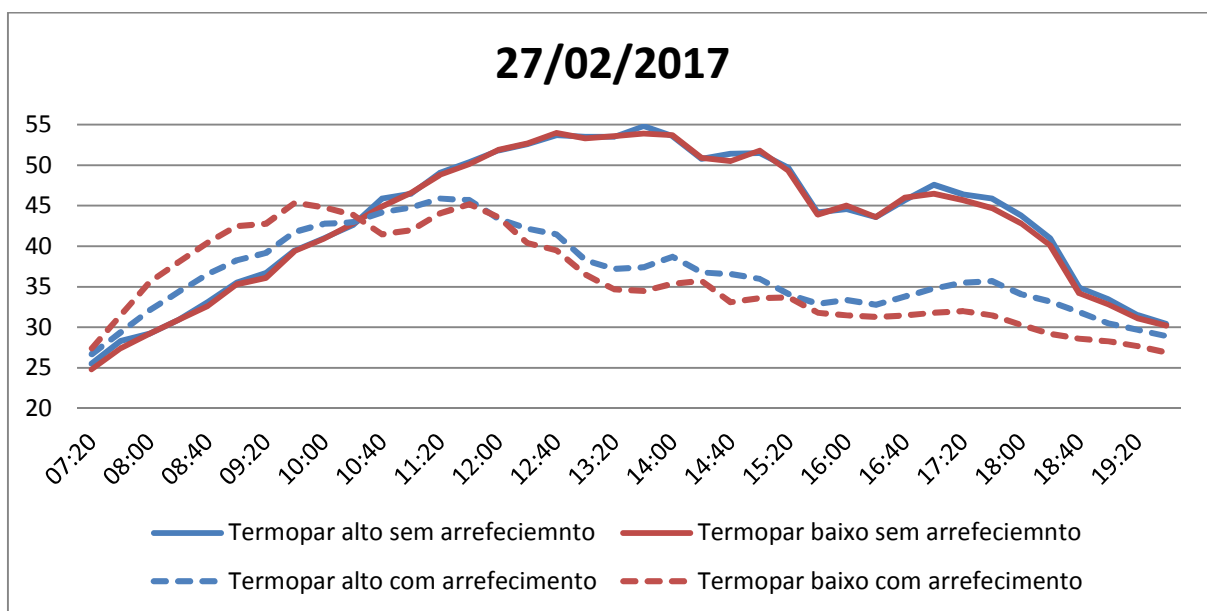
Fonte: o autor

Figura A10 – Leituras célula-teste fibrocimento.



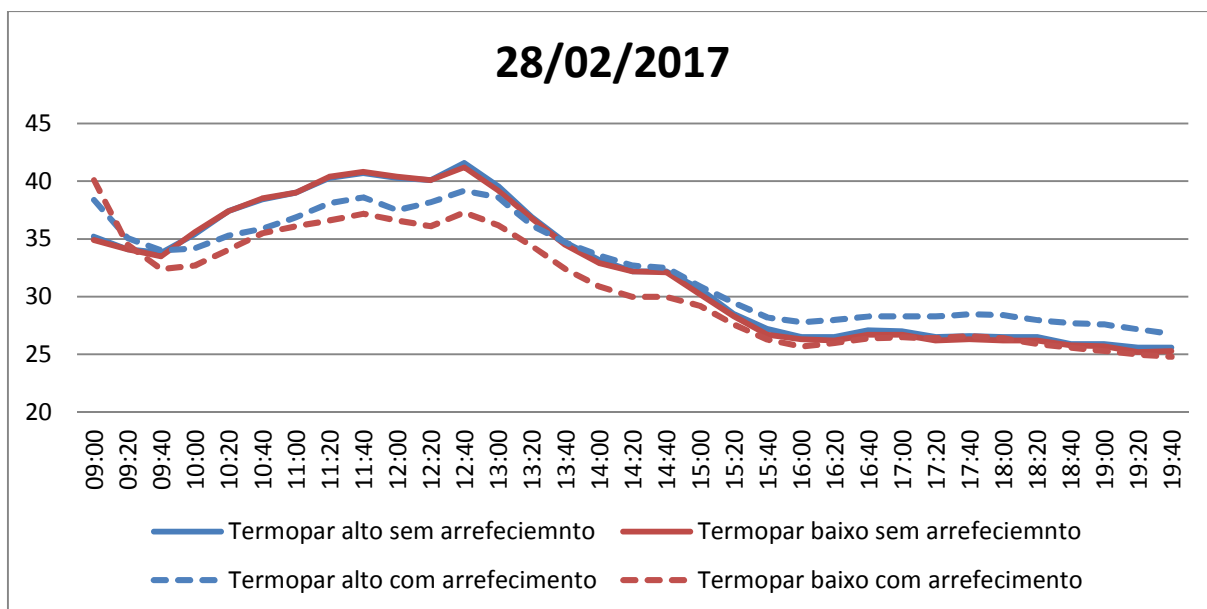
Fonte: o autor

Figura A11 – Leituras célula-teste fibrocimento.



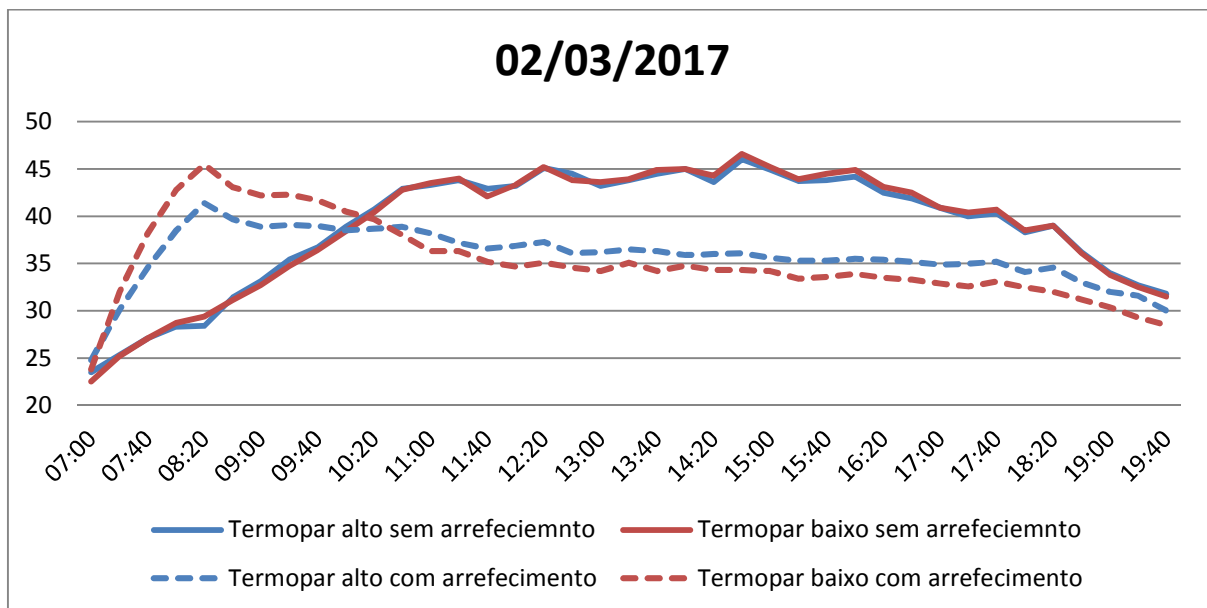
Fonte: o autor

Figura A12 – Leituras célula-teste fibrocimento.



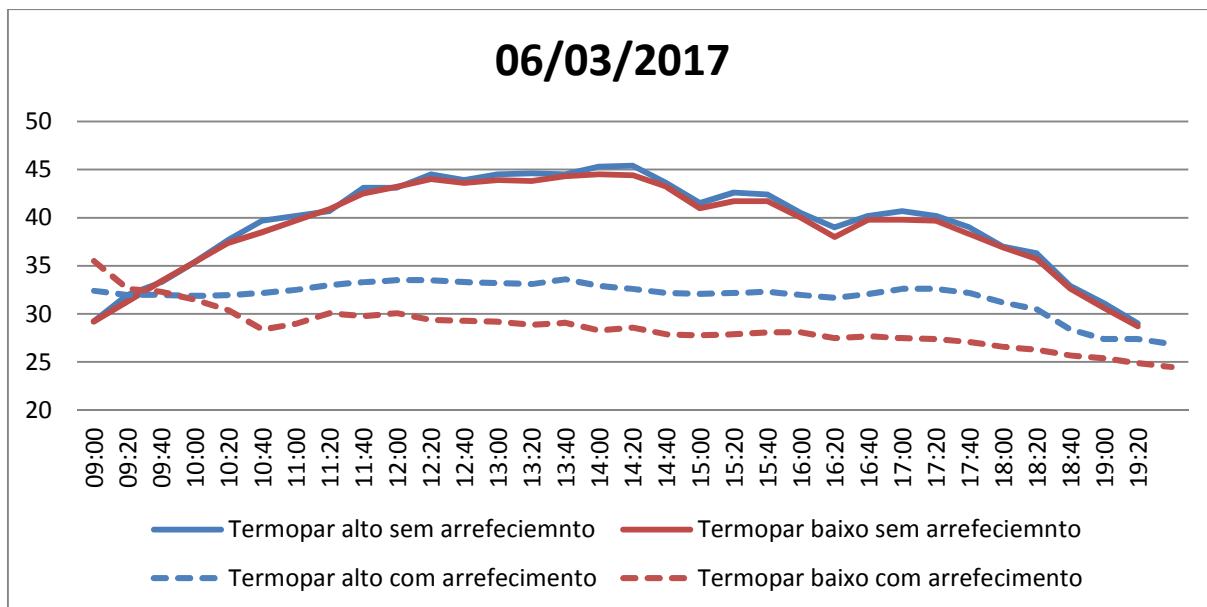
Fonte: o autor

Figura A13 – Leituras célula-teste fibrocimento.



Fonte: o autor

Figura A14 – Leituras célula-teste fibrocimento.

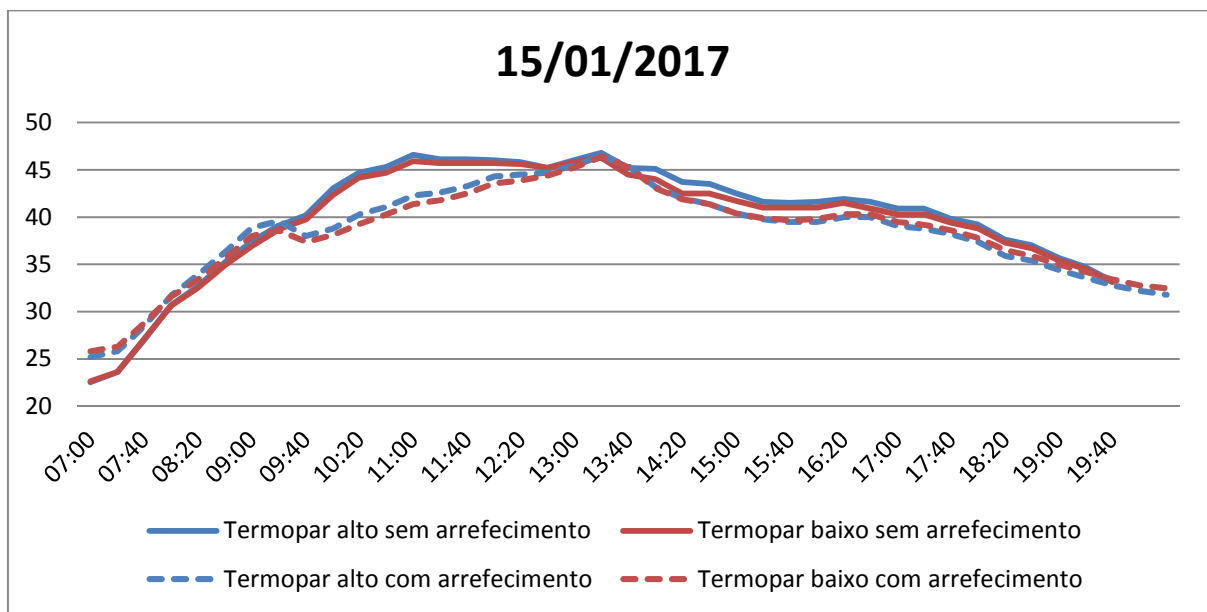


Fonte: o autor

ANEXO B – Gráficos célula-teste de aluzinco

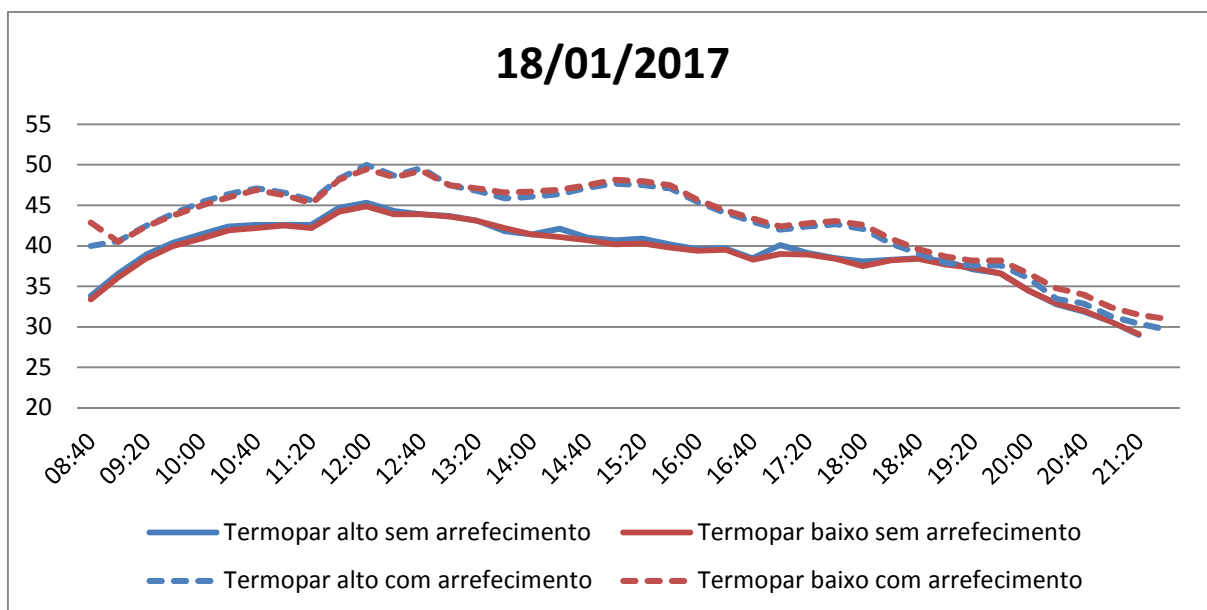
Gráficos das células-teste de aluzinco com e sem arrefecimento para cada dia de teste.

Figura B1 – Leituras célula-teste aluzinco.



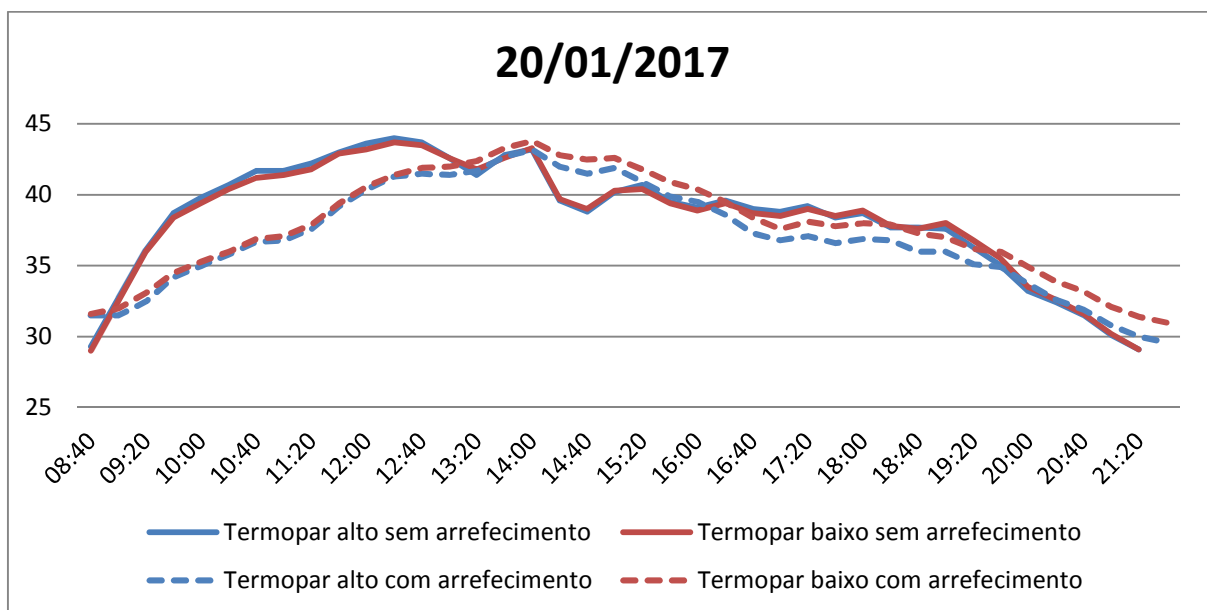
Fonte: o autor

Figura B2 – Leituras célula-teste aluzinco.



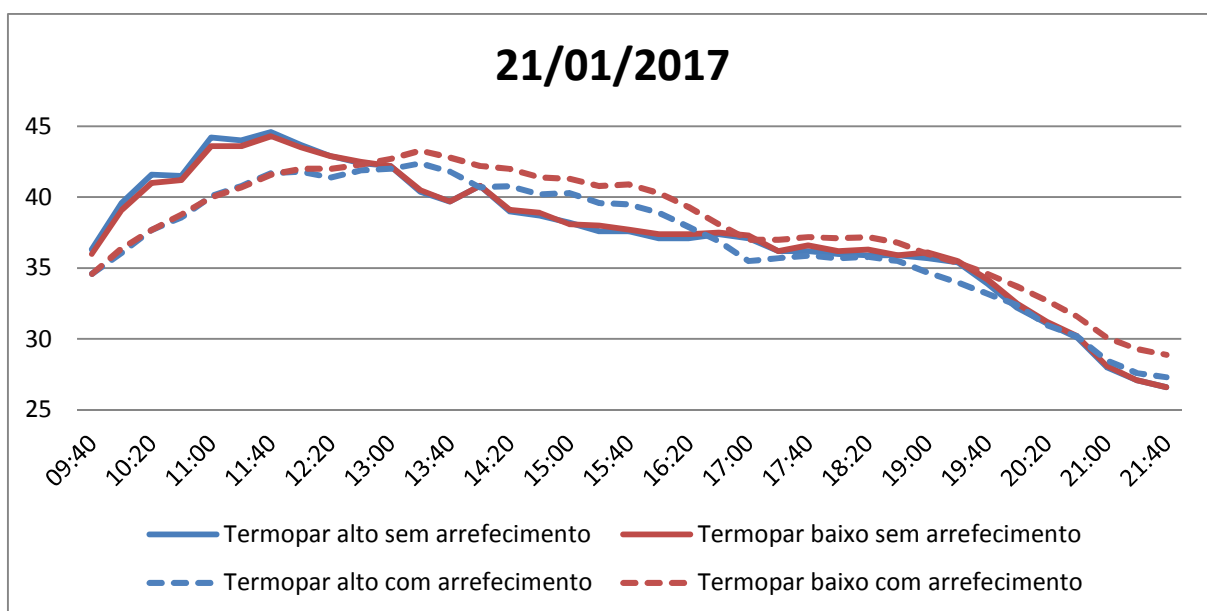
Fonte: o autor

Figura B3 – Leituras célula-teste aluzinco.



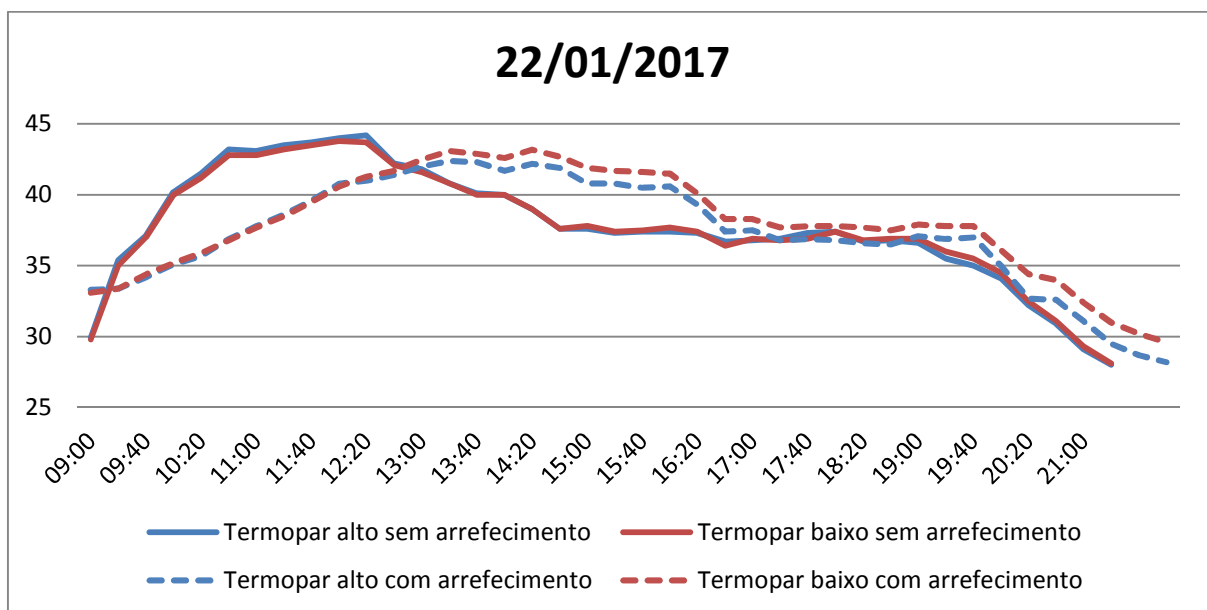
Fonte: o autor

Figura B4 – Leituras célula-teste aluzinco.



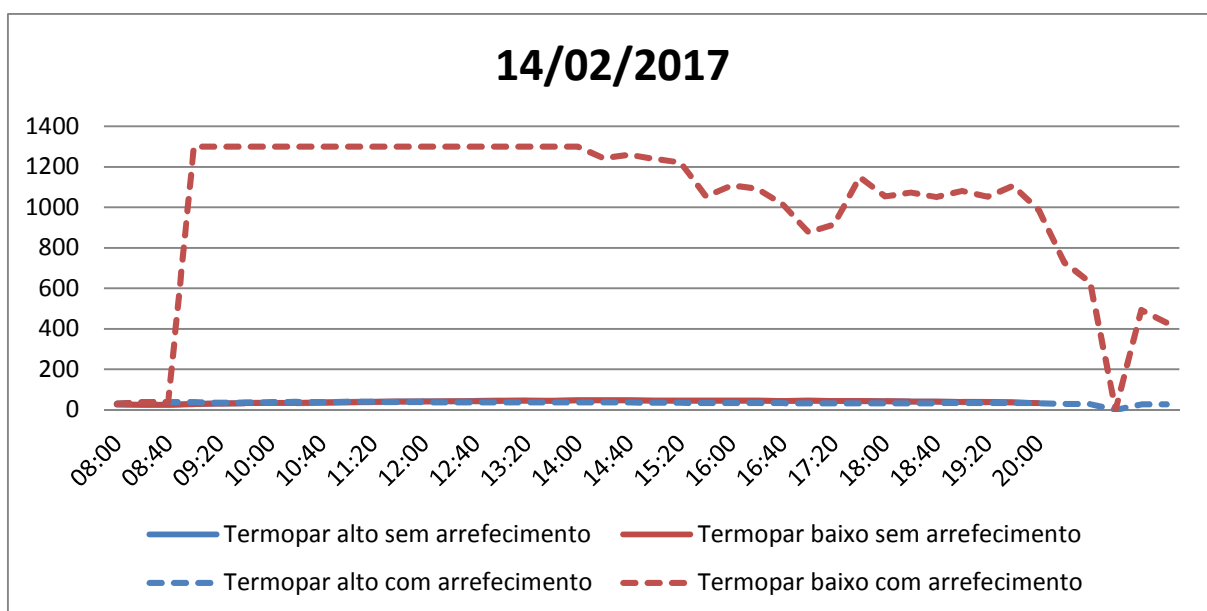
Fonte: o autor

Figura B5 – Leituras célula-teste aluzinco.



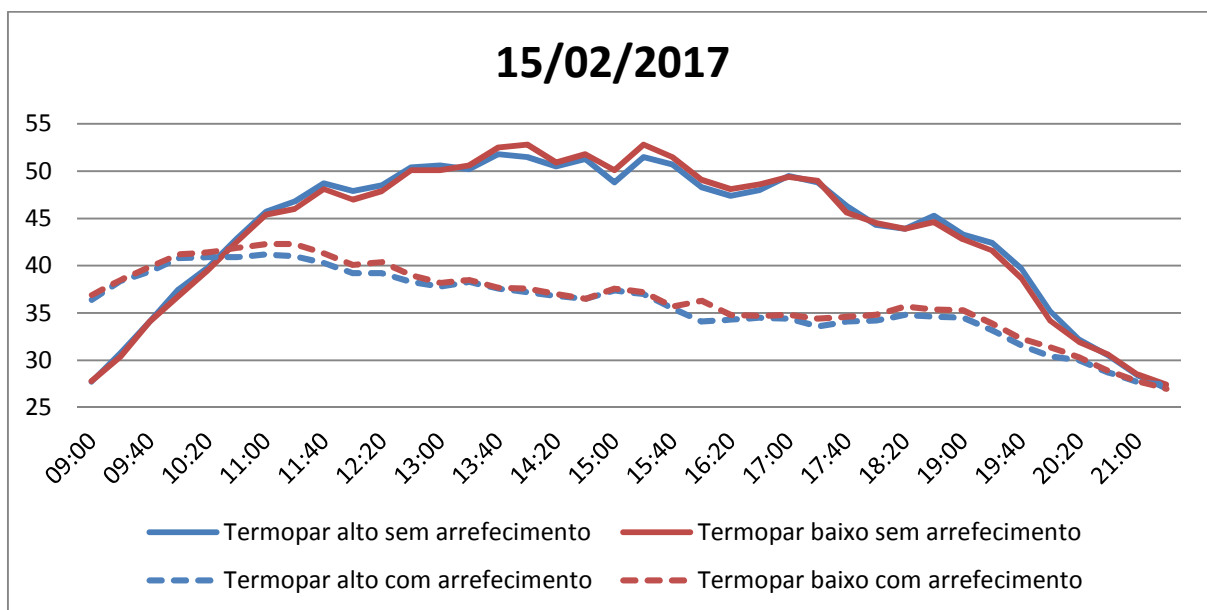
Fonte: o autor

Figura B6 – Leituras célula-teste aluzinco.



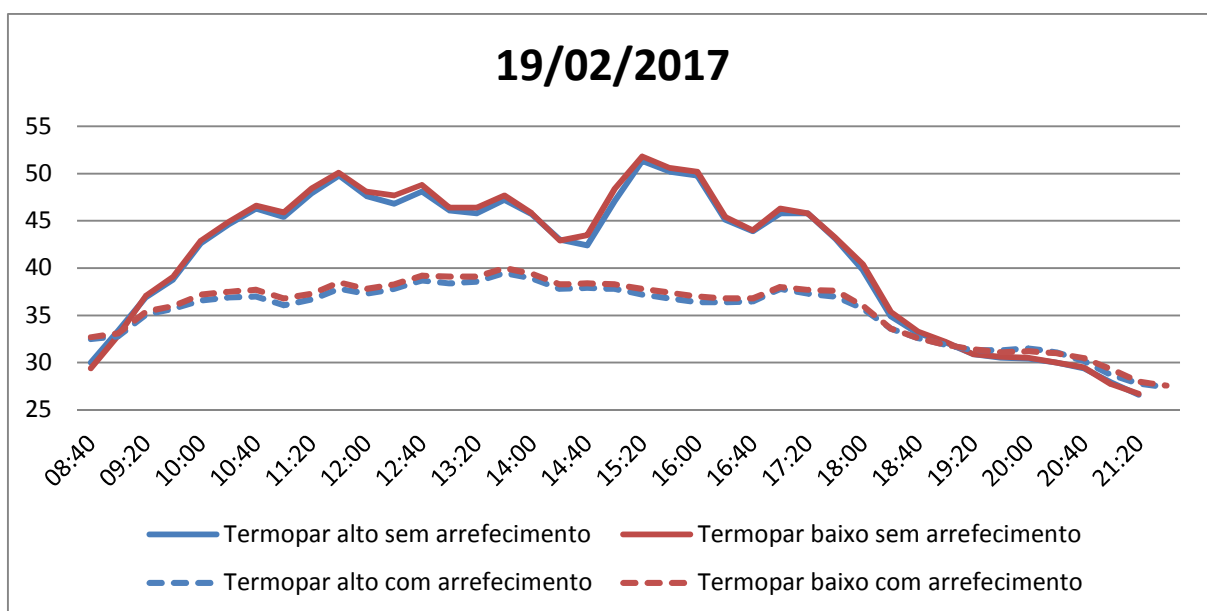
Fonte: o autor

Figura B7 – Leituras célula-teste aluzinco.



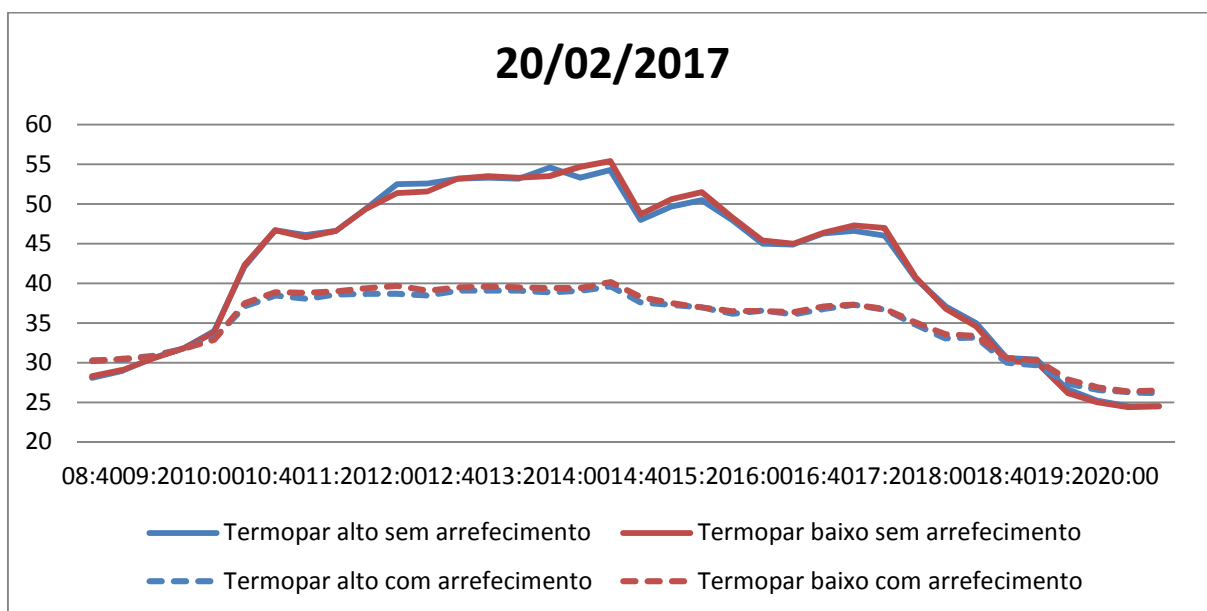
Fonte: o autor

Figura B8– Leituras célula-teste aluzinco.



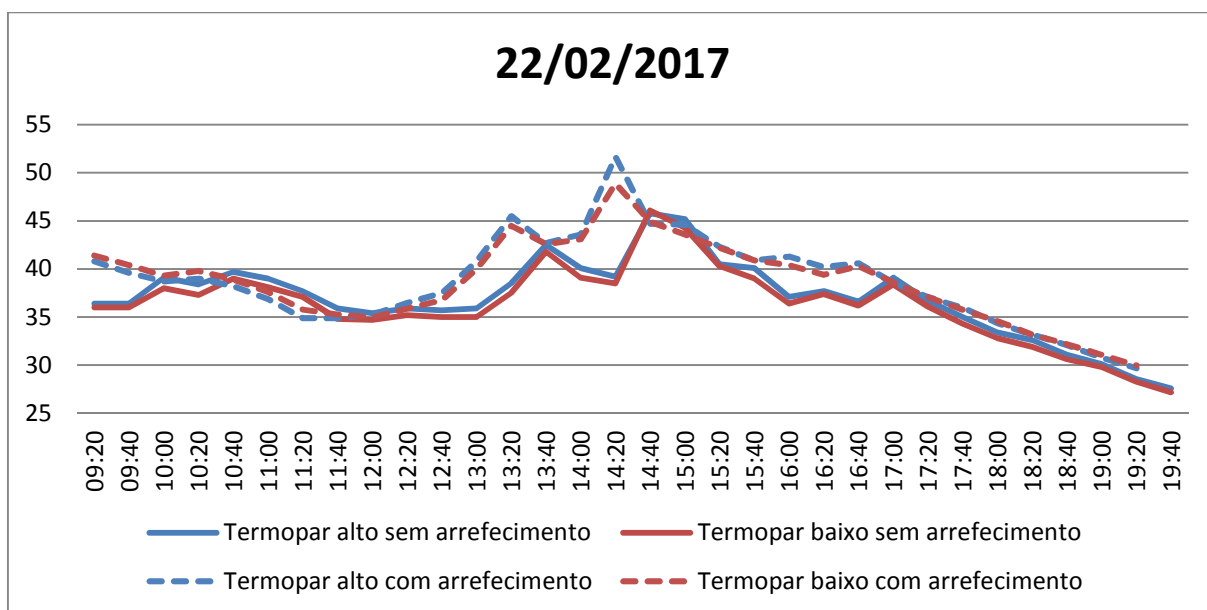
Fonte: o autor

Figura B9 – Leituras célula-teste aluzinco.



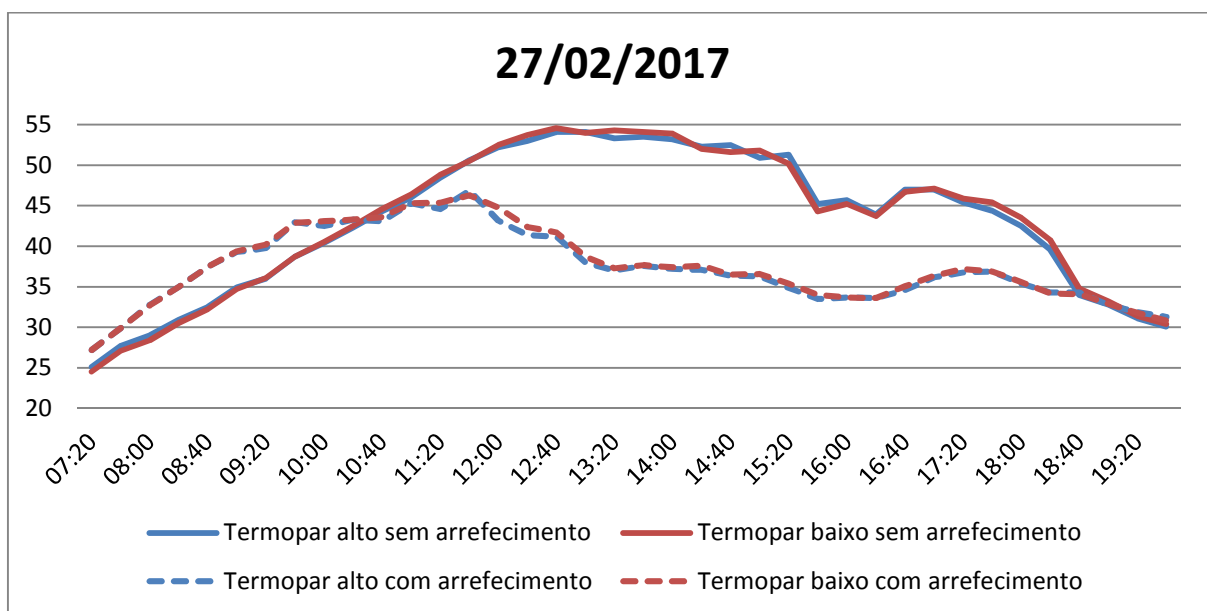
Fonte: o autor

Figura B10 – Leituras célula-teste aluzinco.



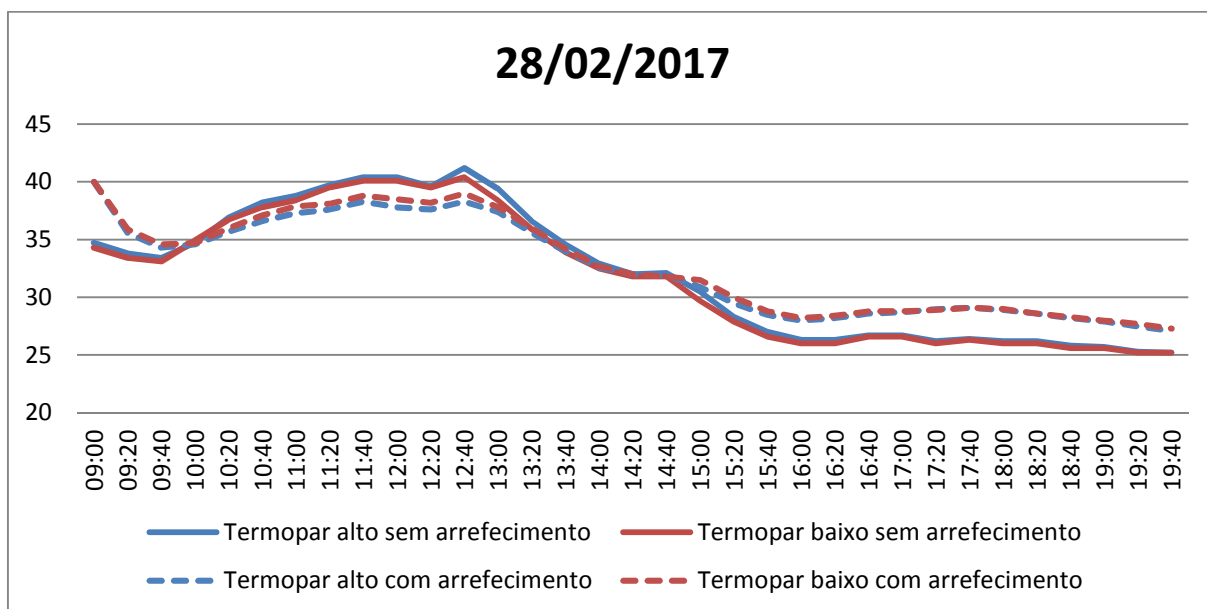
Fonte: o autor

Figura B11 – Leituras célula-teste aluzinco.



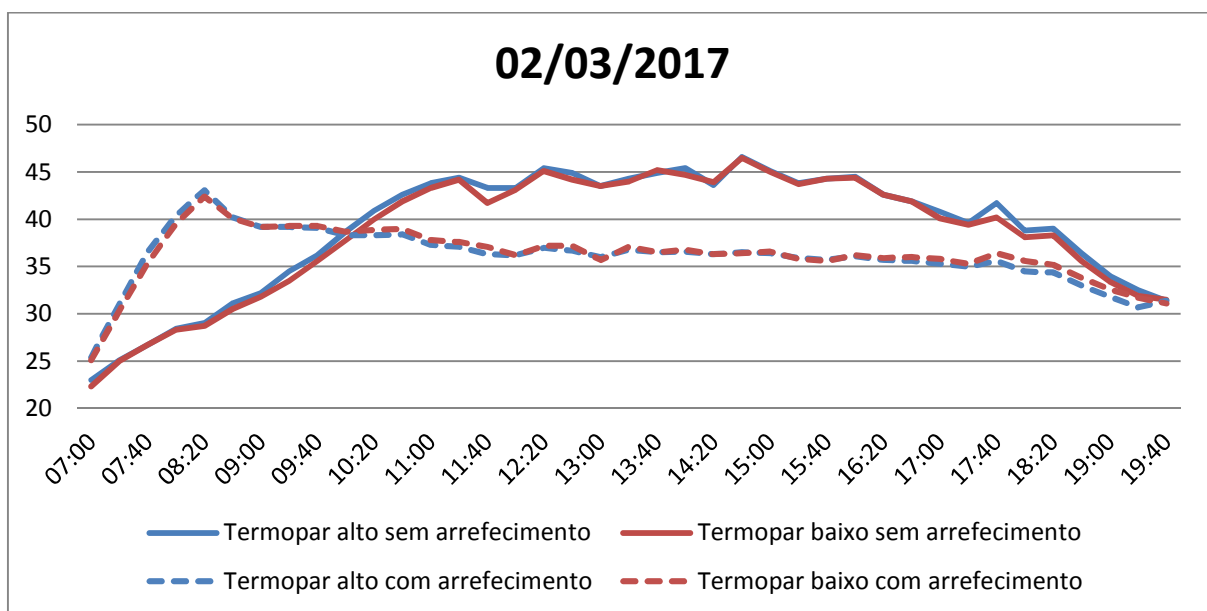
Fonte: o autor

Figura B12 – Leituras célula-teste aluzinco.



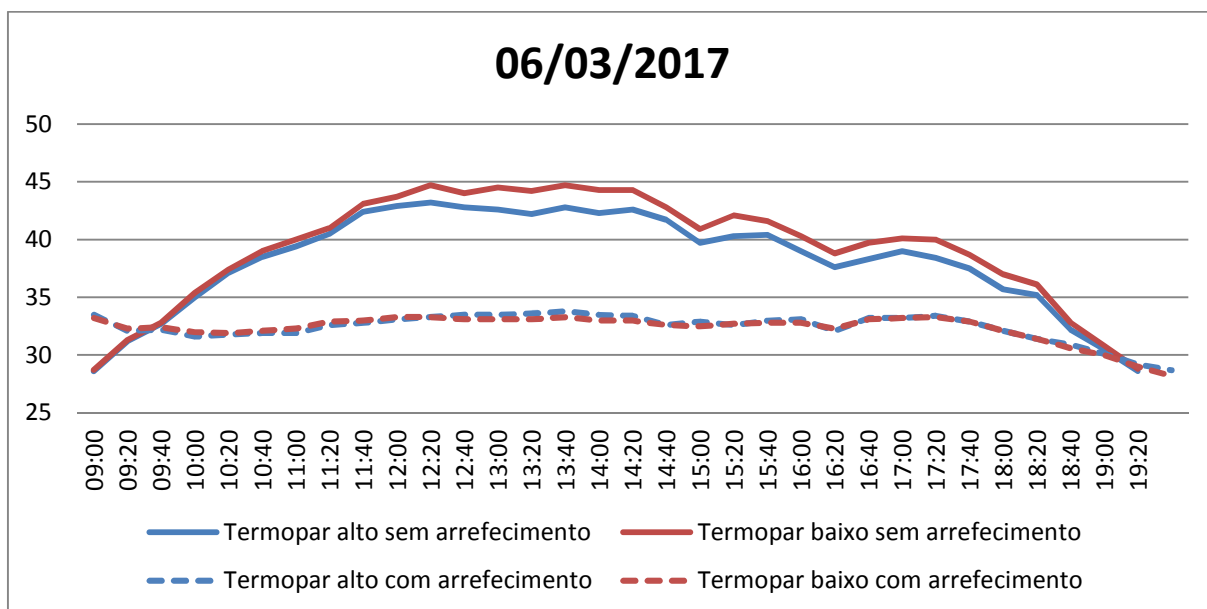
Fonte: o autor

Figura B13 – Leituras célula-teste aluzinco.



Fonte: o autor

Figura B14 – Leituras célula-teste aluzinco.

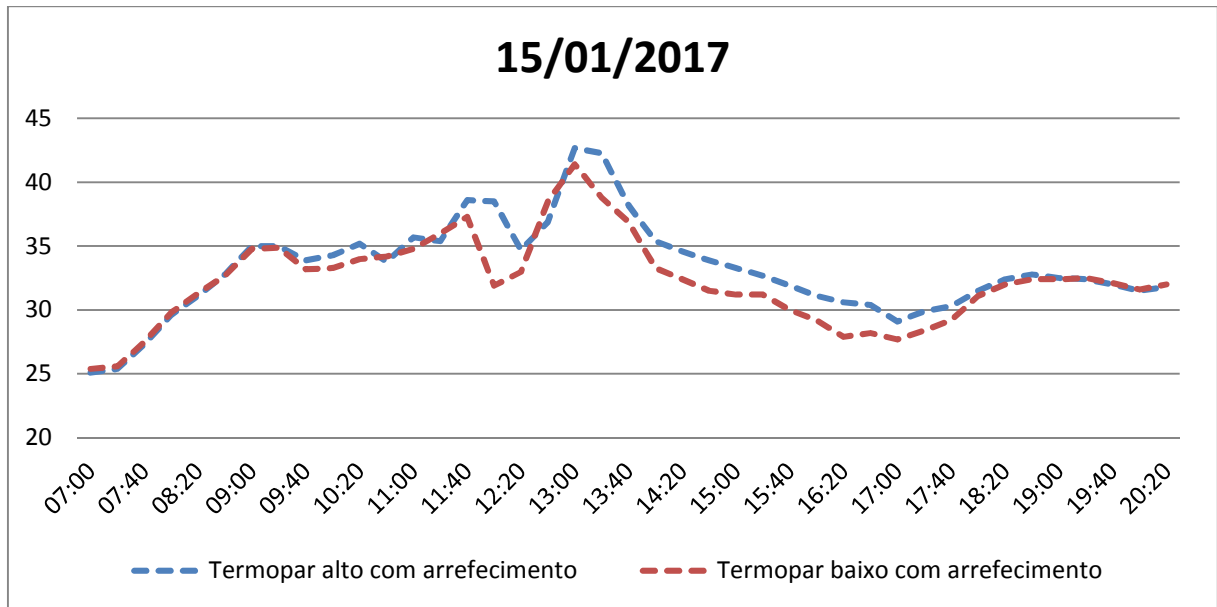


Fonte: o autor

ANEXO C – Gráficos célula-teste de vidro

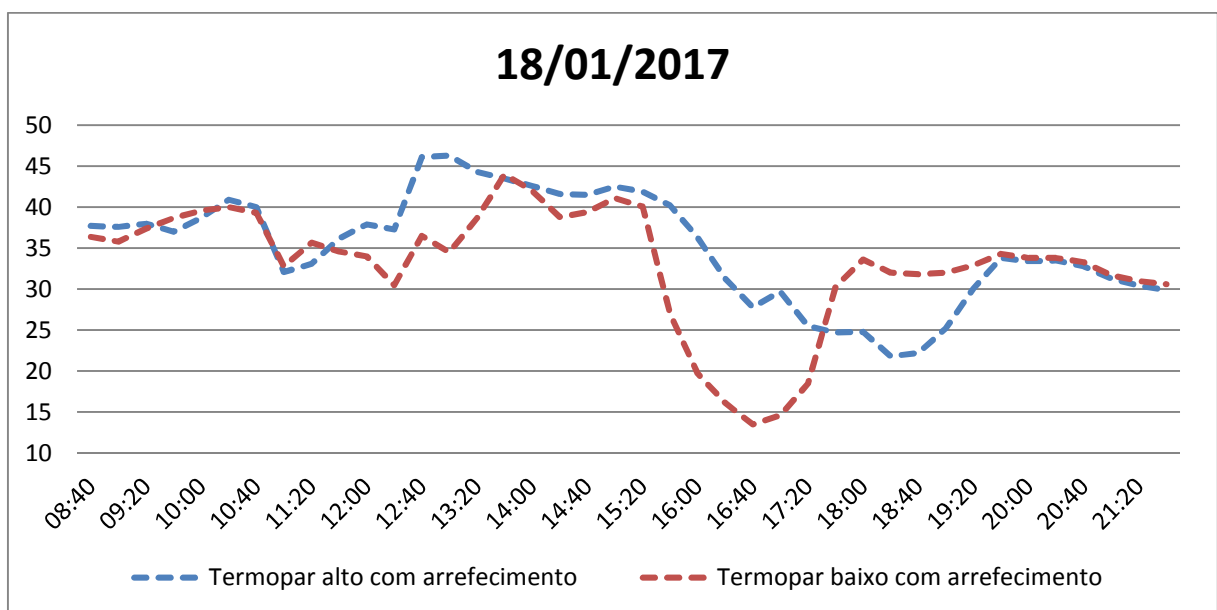
Gráficos das células-teste de vidro com e sem arrefecimento para cada dia de teste.

Figura C1 – Leituras célula-teste vidro.



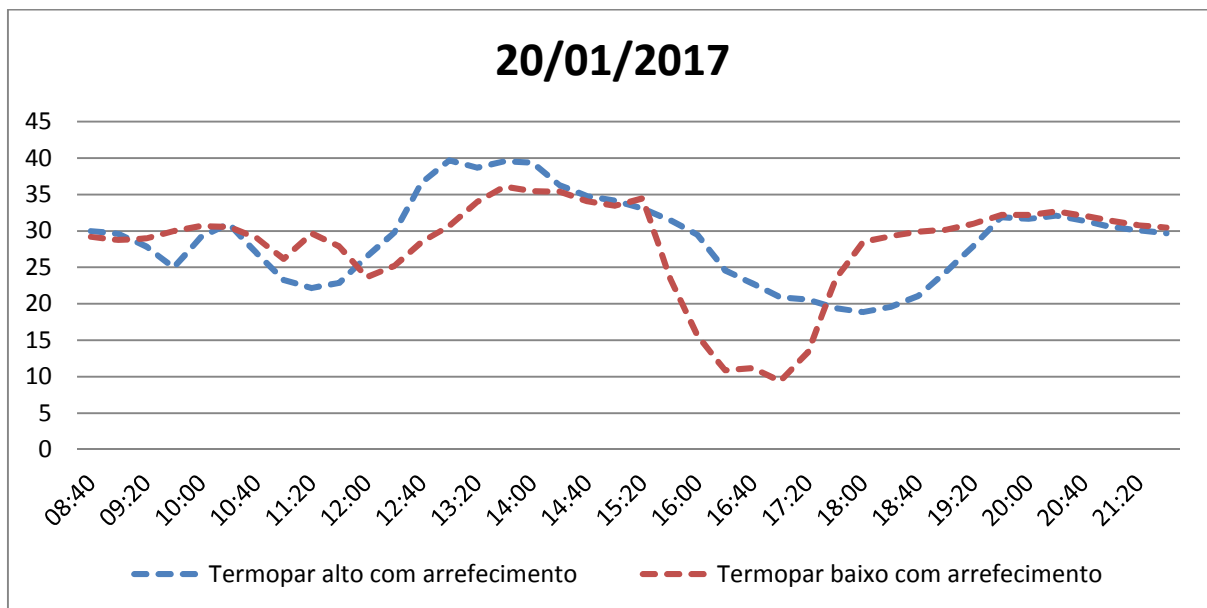
Fonte: o autor

Figura C2 – Leituras célula-teste vidro.



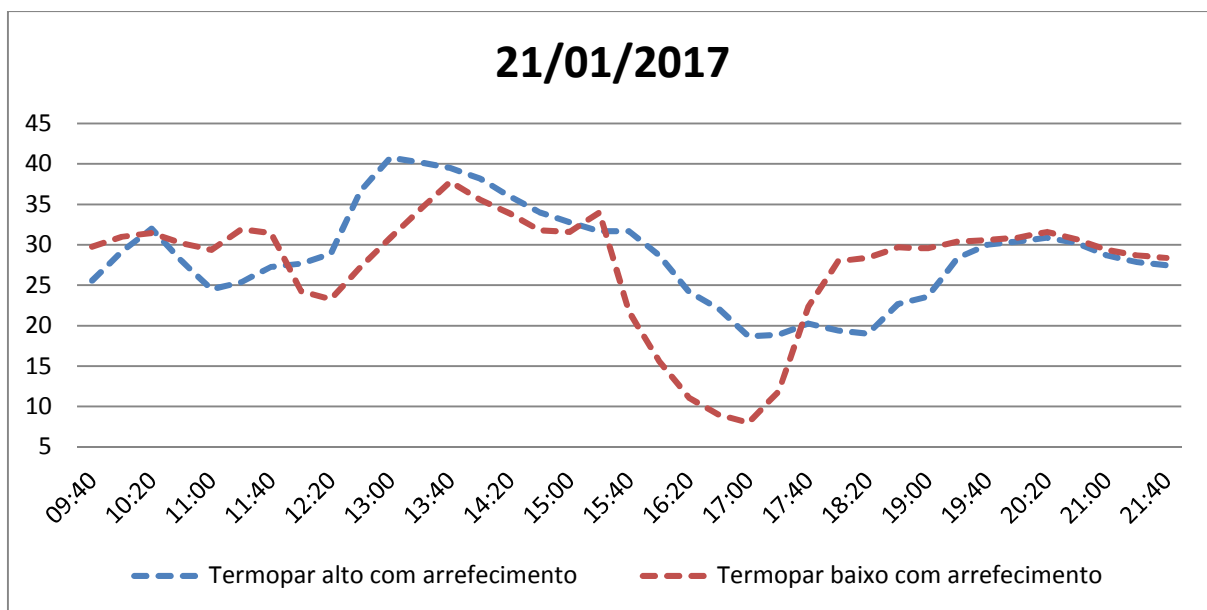
Fonte: o autor

Figura C3 – Leituras célula-teste vidro.



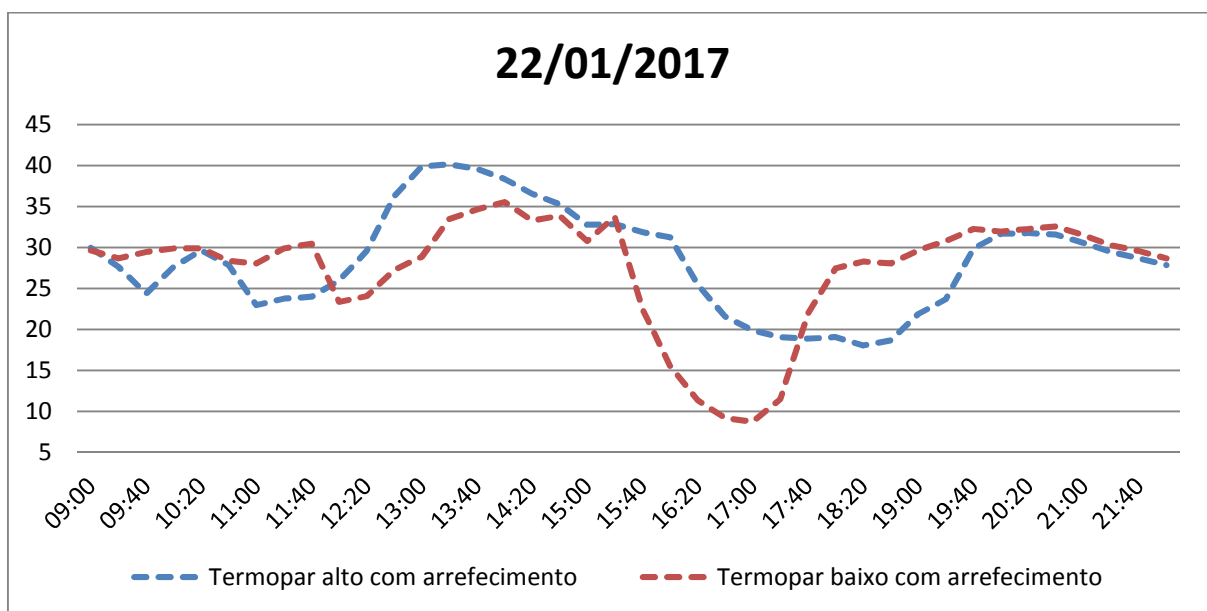
Fonte: o autor

Figura C4 – Leituras célula-teste vidro.



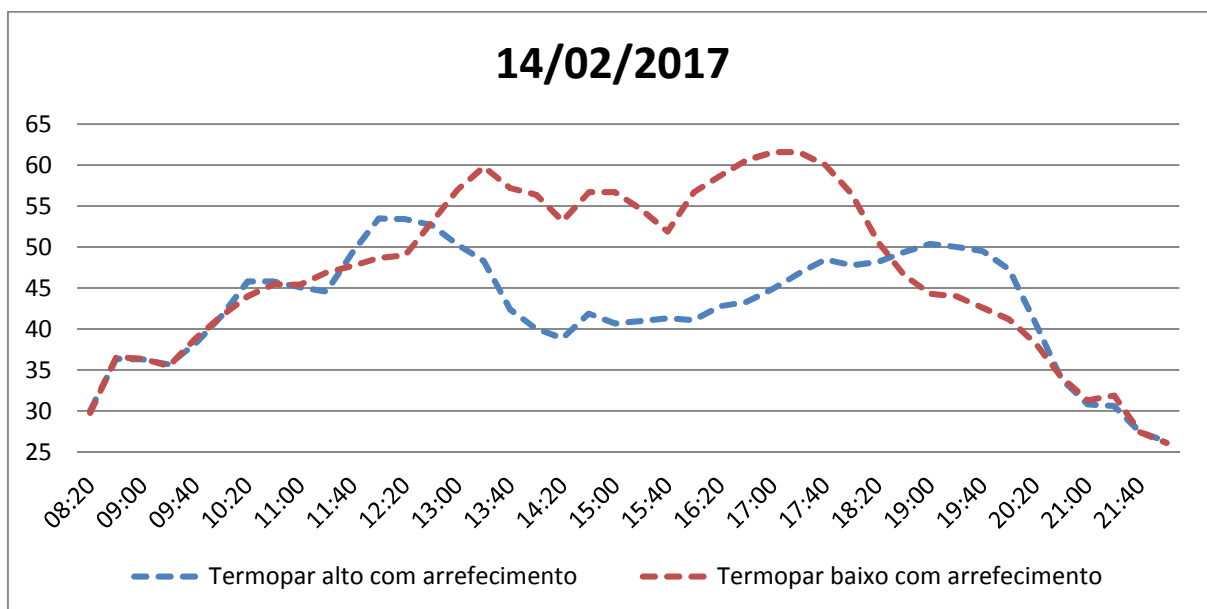
Fonte: o autor

Figura C5 – Leituras célula-teste vidro.



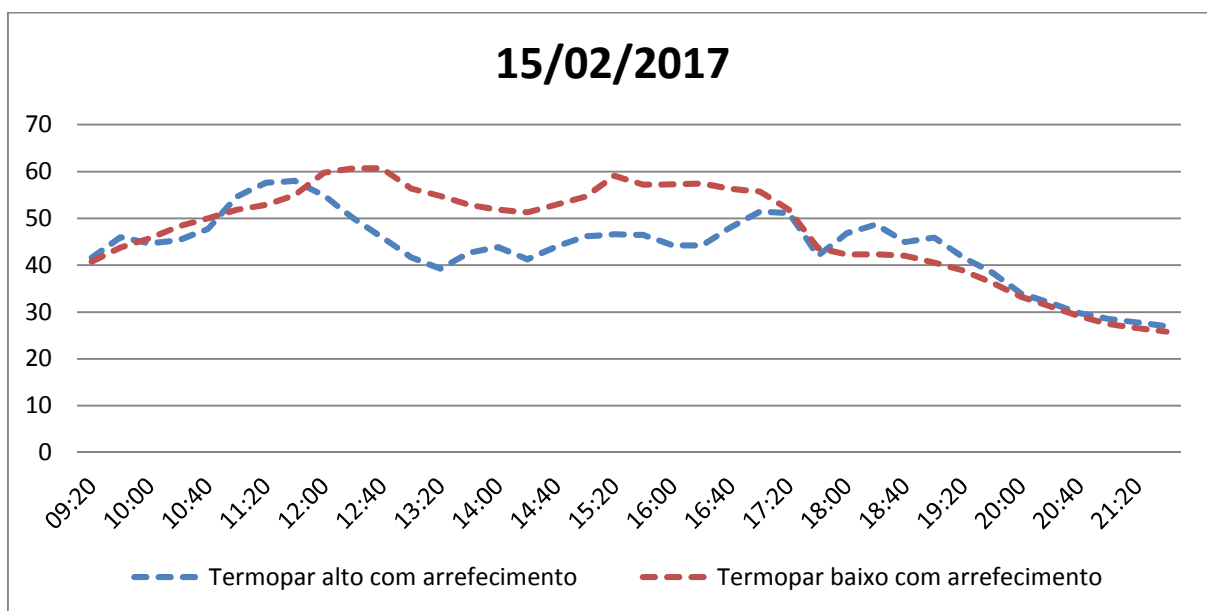
Fonte: o autor

Figura C6 – Leituras célula-teste vidro.



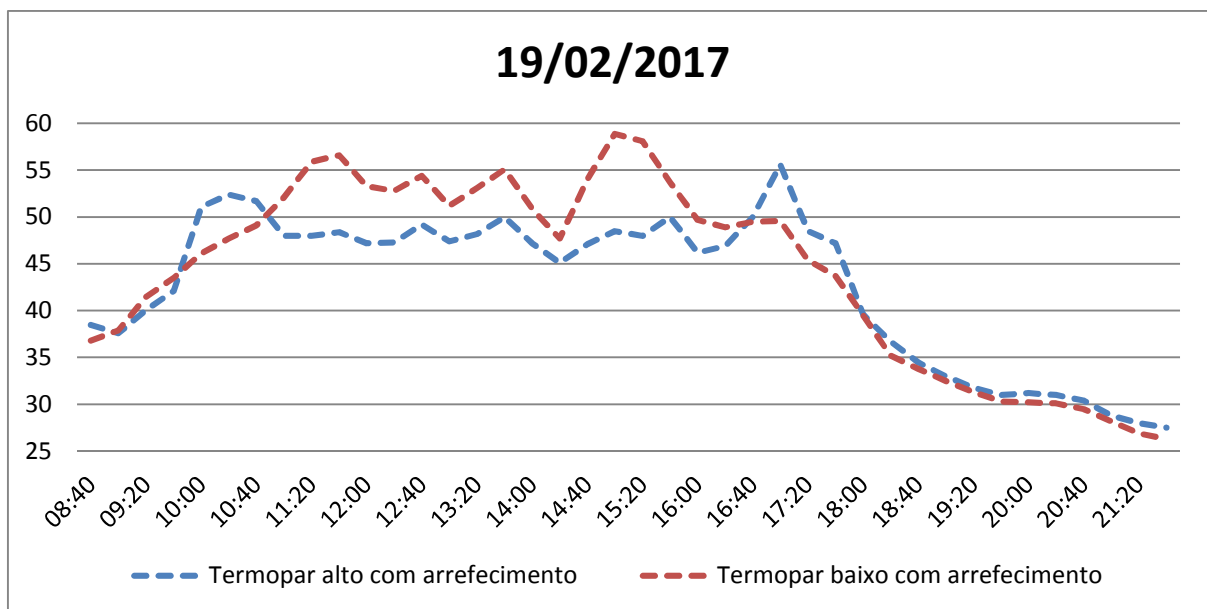
Fonte: o autor

Figura C7 – Leituras célula-teste vidro.



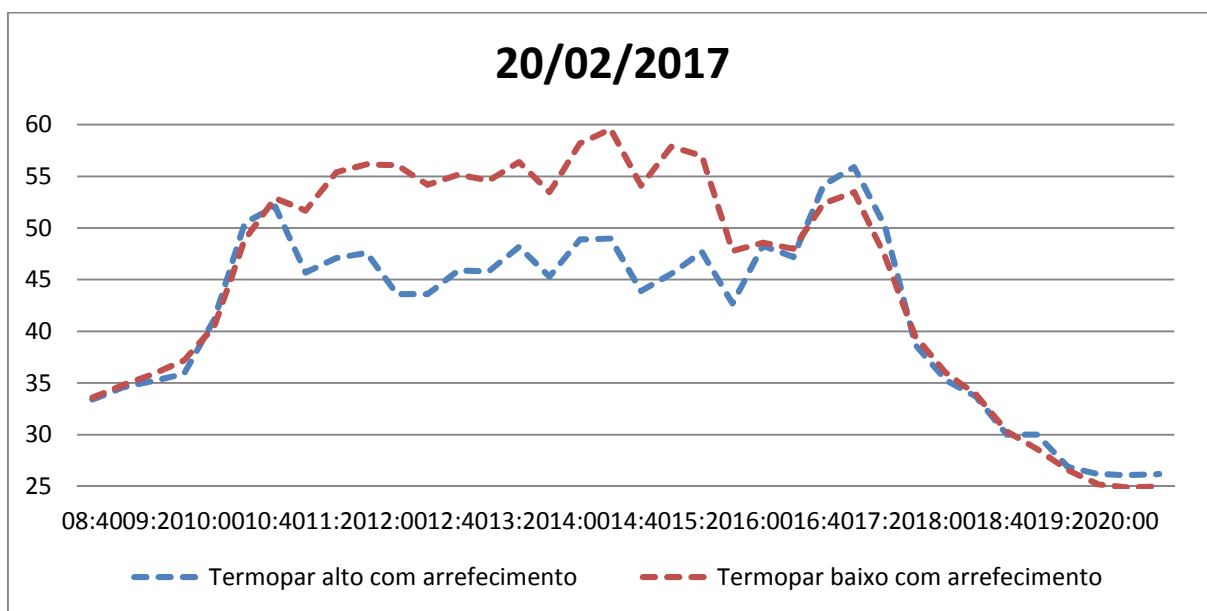
Fonte: o autor

Figura C8 – Leituras célula-teste vidro.



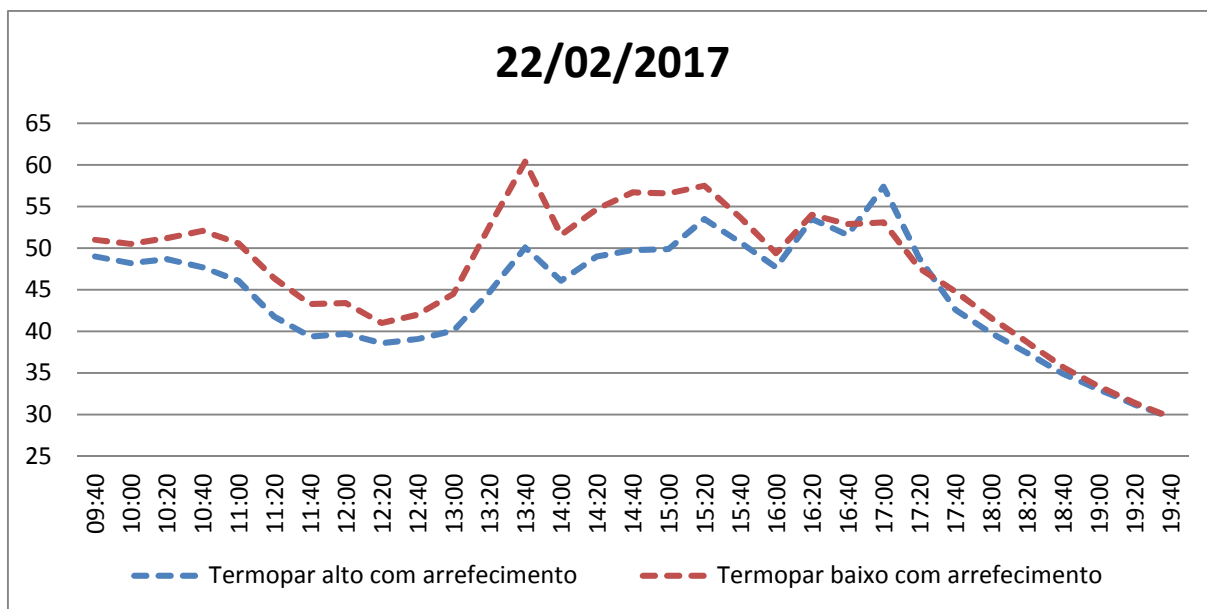
Fonte: o autor

Figura C9 – Leituras célula-teste vidro.



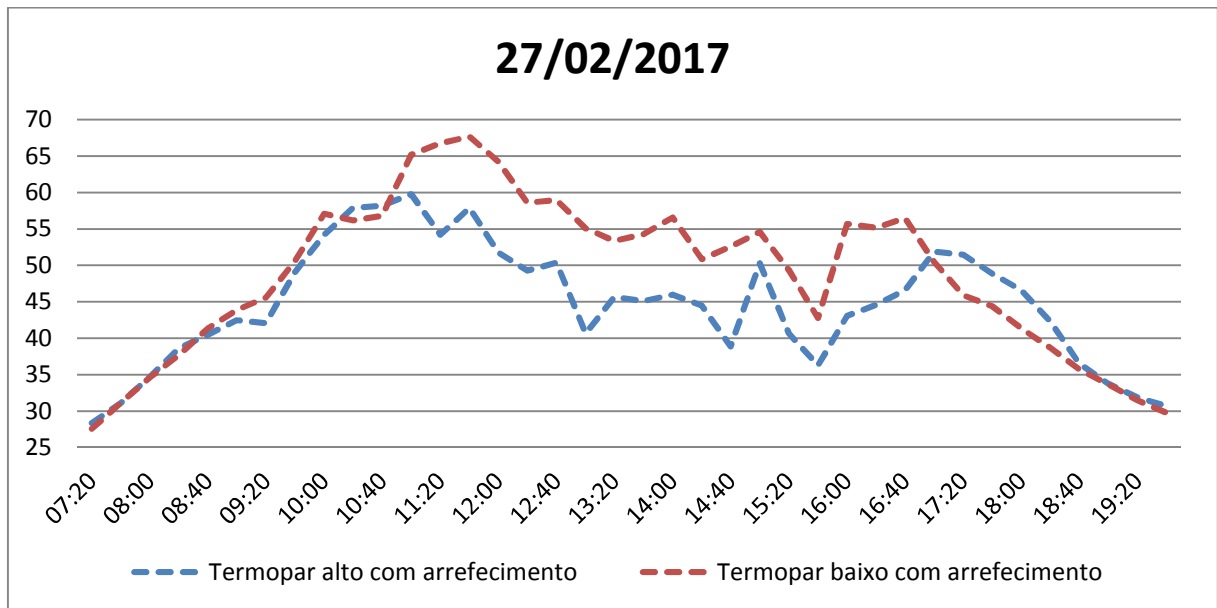
Fonte: o autor

Figura C10 – Leituras célula-teste vidro.



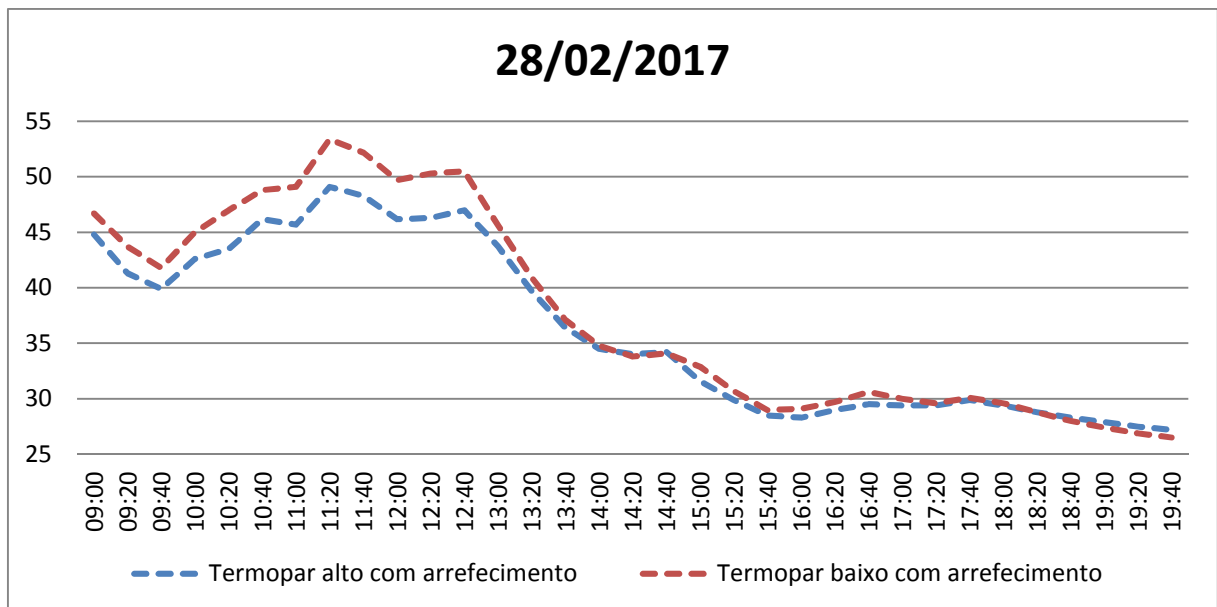
Fonte: o autor

Figura C11 – Leituras célula-teste vidro.



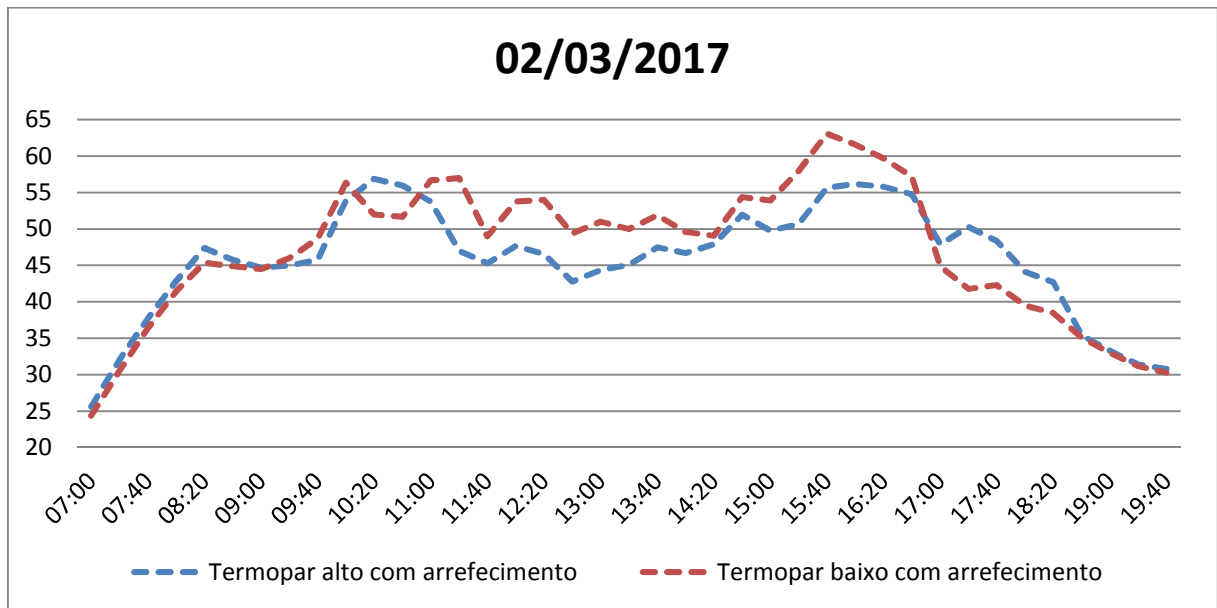
Fonte: o autor

Figura C12 – Leituras célula-teste vidro.



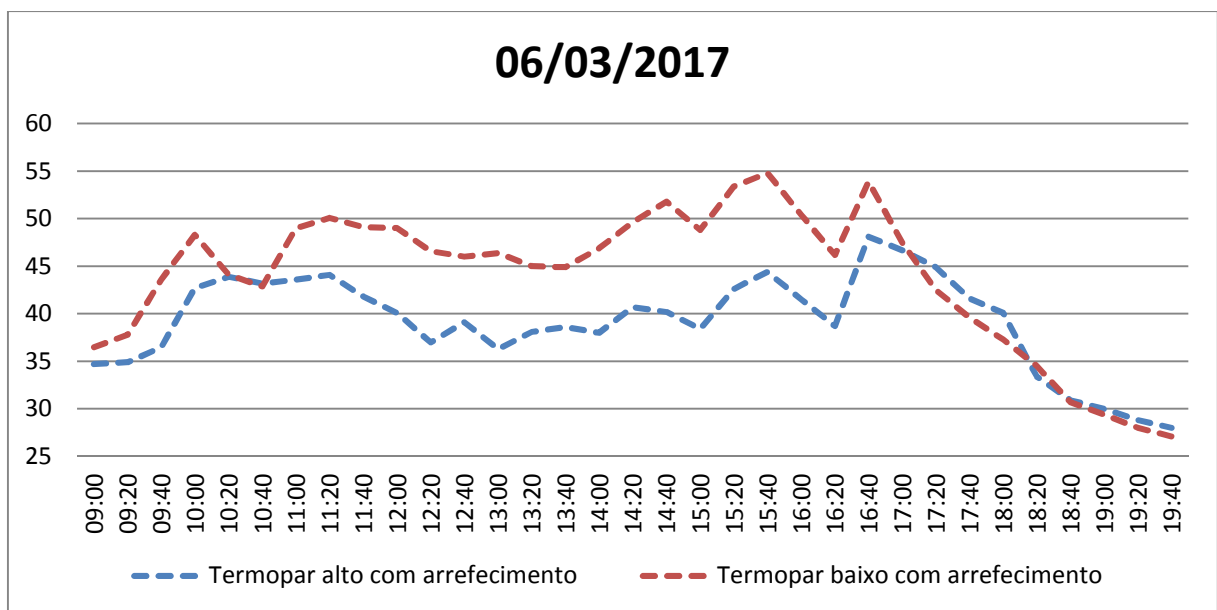
Fonte: o autor

Figura C13 – Leituras célula-teste vidro.



Fonte: o autor

Figura C14 – Leituras célula-teste vidro.



Fonte: o autor

ANEXO D – Cálculos de transmitância térmica (U)

D.1 Fibrocimento sem inserção de água

A tabela D1 apresenta os dados construtivos referentes à telha de fibrocimento e suas propriedades térmicas segundo a NBR 15220.

Tabela D1 – Dados da telha de fibrocimento

Comprimento do telhado (m)	1,00
Condutividade térmica (W/m. K)	0,65
Espessura da telha (m)	0,008

Fonte: NBR 15220-2 (2005, p.9)

- Resistência térmica (R_t)

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,008 \text{ m}}{0,65 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,0123 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Resistência térmica total (R_T)

$$R_T = R_{Si} + R_t + R_{Se} = 0,17 + 0,0123 + 0,04 = 0,2223 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,2223 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 4,45 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

D.2 Fibrocimento com inserção de água

A tabela D2 apresenta os dados construtivos referentes à telha de fibrocimento e suas propriedades térmicas segundo a NBR 15220.

Tabela D2 – Dados da telha de fibrocimento

Comprimento do telhado (m)	1,00
Resistência térmica da água ($m^2 \cdot K/W$)	0,05
Condutividade térmica (W/m. K)	0,65
Espessura da telha (m)	0,008

Fonte: NBR 15220-2 (2005, p.9)

- Resistência térmica (R_t)

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,008 \text{ m}}{0,65 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,0123 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Resistência térmica total (R_T)

$$R_T = R_{Si} + R_t + R_{Se} + R_{\text{água}} = 0,17 + 0,0123 + 0,04 + 0,05 = 0,2723 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,2723 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 3,67 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

D.3 Aluzinco sem inserção de água

A tabela D3 apresenta os dados construtivos referentes à telha de aluzinco e suas propriedades térmicas segundo a NBR 15220.

Tabela D3 – Dados da telha de fibrocimento

Comprimento do telhado (m)	1,00
Condutividade térmica (W/m. K)	112
Espessura da telha (m)	0,0005

Fonte: NBR 15220-2 (2005, p.10)

- Resistência térmica (R_t)

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,0005 \text{ m}}{112 \frac{W}{m \cdot K}} = 4,46 \times 10^{-6} \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Resistência térmica total (R_T)

$$R_T = R_{Si} + R_t + R_{Se} = 0,17 + 4,46 \times 10^{-6} + 0,04 = 0,21 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,21 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 4,76 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

D.4 Aluzinco com inserção de água

A tabela D4 apresenta os dados construtivos referentes à telha de fibrocimento e suas propriedades térmicas segundo a NBR 15220.

Tabela D4 – Dados da telha de fibrocimento

Comprimento do telhado (m)	1,00
Resistência térmica da água (m ² .K/W)	0,05
Condutividade térmica (W/m. K)	112
Espessura da telha (m)	0,0005

Fonte: NBR 15220-2 (2005, p.9)

- Resistência térmica (R_t)

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,0005 \text{ m}}{112 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} = 4,46 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

- Resistência térmica total (R_T)

$$R_T = R_{Si} + R_t + R_{Se} + R_{\text{água}} = 0,17 + 4,46 \times 10^{-6} + 0,04 + 0,05 = 0,26 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

- Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,26 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} = 3,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

D.5 Vidro sem inserção de água

A tabela D5 apresenta os dados construtivos referentes à telha de fibrocimento e suas propriedades térmicas segundo a NBR 15220.

Tabela D5 – Dados da telha de fibrocimento

Comprimento do telhado (m)	1,00
Condutividade térmica (W/m. K)	1
Espessura da telha (m)	0,004

Fonte: NBR 15220-2 (2005, p.9)

- Resistência térmica (R_t)

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,004 \text{ m}}{1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} = 4 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

- Resistência térmica total (R_T)

$$R_T = R_{Si} + R_t + R_{Se} = 0,17 + 4 \times 10^{-3} + 0,04 = 0,214 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,214 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 4,67 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

D.6 Vidro com inserção de água

A tabela D6 apresenta os dados construtivos referentes à telha de fibrocimento e suas propriedades térmicas segundo a NBR 15220.

Tabela D6 – Dados da telha de fibrocimento

Comprimento do telhado (m)	1,00
Resistência térmica da água ($m^2 \cdot K/W$)	0,05
Condutividade térmica ($W/m \cdot K$)	1
Espessura da telha (m)	0,004

Fonte: NBR 15220-2 (2005, p.9)

- Resistência térmica (R_t)

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,004 \text{ m}}{1 \frac{W}{m \cdot K}} = 4 \times 10^{-3} \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Resistência térmica total (R_T)

$$R_T = R_{Si} + R_t + R_{Se} + R_{\text{água}} = 0,17 + 4 \times 10^{-3} + 0,04 + 0,05 = 0,264 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

- Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,264 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 3,78 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$