

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso

**Análise da Eficiência Térmica de Diferentes Tipos de Coberturas para
Casas de Emergência**

Responsável pela Disciplina: Isabel Correa Guedes

Professor Orientador: Pedro de Alcântara Pessoa Filho

Data: 10/08/2012

Lucas Pedote

6520342

Thiago Teixeira Franco

6481096

Resumo

Este trabalho estuda o fenômeno de transferência de calor através de diferentes tipos de coberturas em casas de madeira. Tem como base o modelo em miniatura de Casa de Emergência construído pela ONG TETO para famílias que vivem em situação de extrema pobreza na América Latina. O estudo foi realizado a partir da análise do perfil de temperatura das camadas que compõem as coberturas, sendo estas compostas por telhas ou telhas sobrepostas a mantas térmicas. Mostra-se de forma qualitativa e quantitativa a melhor eficiência no isolamento dos modelos nos quais se utilizam mantas térmicas. Conclui-se que o conjunto usado atualmente pela ONG TETO, telha de aço zincado e manta térmica composta por lâmina de alumínio com camadas de filme de polietileno com alvéolos de ar extrudados, é a melhor opção para as condições climáticas enfrentadas pelas famílias beneficiadas pelo projeto no Brasil.

Palavras-chave: Transferência de calor. Condução. Radiação. Manta Térmica. Isolamento. TETO.

Agradecimentos

A escolha do tema do nosso Trabalho de Conclusão de Curso teve um objetivo principal: utilizar conceitos e métodos aprendidos durante o curso de engenharia em prol de uma causa social. Acreditamos que uma faculdade pública é um investimento em cidadãos a fim de que estes retribuam o mesmo para a sociedade. Esta é a meta que a dupla levará consigo durante essas carreiras que se iniciam.

Pelos pontos apresentados, o primeiro agradecimento será para nossos pais, pelos valores ensinados durante todos os anos decorridos. Em segundo lugar, gostaríamos de agradecer um ao outro, não só pela parceria e dedicação neste trabalho, mas principalmente pela excelente amizade cultivada ao longo da faculdade.

Como não se vai a lugar nenhum sem eles, agradecemos profundamente aos amigos e às respectivas namoradas, por terem contribuído efetivamente na realização deste trabalho.

Também apresentamos aqui nossa gratidão ao nosso prof. Orientador, aos demais professores, pós-doutores e funcionários da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo que contribuíram de maneiras específicas e essenciais para a produção final do trabalho, bem como para a vida que se segue.

Além destes, agradecemos todo o apoio da ONG TETO ao nosso estudo e parabenizamos a mesma pela excelente postura de seus voluntários perante à nossa sociedade: não podemos fechar os olhos para a nossa realidade.

Por fim, e mais importante, agradecemos a Deus pela maior e melhor oportunidade que existe: viver.

A todos, muito obrigado!
Lucas e Thiago, Thiago e Lucas

Índice

1	Introdução	7
1.1	Breve Histórico	8
1.2	Controle de Temperatura	12
1.3	ONG: TETO – Brasil.....	12
2	Materiais e Métodos	17
2.1	Materiais.....	17
2.1.1	Miniaturas de casas de madeira	17
2.1.2	Telha de fibrocimento	17
2.1.3	Telhas de aço zinkado.....	17
2.1.4	Manta térmica A.....	17
2.1.5	Manta térmica B.....	18
2.1.6	Termômetros com armazenamento de dados	18
2.1.7	Software de medida.....	18
2.2	Métodos	19
2.2.1	Calibração dos termômetros.....	19
2.2.2	Projeto das miniaturas	19
2.2.3	Avaliação do desempenho térmico dos tipos de forro	20
2.2.4	Determinação dos coeficientes globais de troca térmica.....	22
3	Modelamento Matemático	23
3.1	Conservação de Energia em um Volume de Controle Fechado.....	23
3.1.1	Balanço de Energia em uma Superfície	24
3.1.2	Tipos de Energia.....	24
3.2	Definindo o Cenário Estudado.....	28
3.3	Equacionando Genericamente o Problema Estudado.....	31
3.3.1	Volume de Controle 1	31
3.3.2	Volume de Controle 2	32
3.3.3	Volume de Controle 3	33
3.3.4	Coeficiente Global de Transferência de Calor do Sistema	33
4	Resultados Experimentais.....	37
4.1	Calibração dos termômetros	37
4.2	Avaliação do desempenho térmico dos tipos de forro.....	38
4.2.1	Análise comparativa das temperaturas internas	38
4.2.2	Dados de Temperaturas de Superfícies – Comparativos	40
4.3	Determinação dos coeficientes globais de troca térmica	44

4.3.1 Dados de Temperaturas de Superfícies – Perfil das Camadas das Coberturas	44
4.3.2 Dados de Radiação Térmica	46
5 Análise e Tratamento de Dados	47
5.1 Calibração dos Termômetros	47
5.2 Avaliação do desempenho térmico dos tipos de forro	48
5.2.1 Conforto térmico interno	48
5.2.2 Dados de Temperaturas de Superfície – Comparativos	52
5.3 Avaliação quantitativa da eficiência térmica das diferentes coberturas	56
5.3.1 Determinação dos coeficientes de condutividade térmica	58
5.3.2 Cálculo da eficiência térmica	61
6 Conclusão	68
7 Bibliografia	70
Anexo I: Equação de Conservação de Energia Térmica	71
Anexo II: Transferência de Calor Unidimensional em Meio Sólido	73
Anexo III: Método Empírico de Escoamento Externo Paralelo a Placa Plana	75
Anexo IV: Método Empírico de Convecção Natural em Escoamentos Externos em Superfície Horizontal	78
Anexo V: Resultados experimentais de Radiação Solar Global	80
Anexo VI: Propriedades termofísicas do ar atmosférico	84

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Calibração dos termômetros de medida	37
Gráfico 2: Calibração dos termômetros a partir de referência STM	38
Gráfico 3: Desempenho Térmico dos forros - Estudo 1	39
Gráfico 4: Desempenho Térmico dos forros - Estudo 2 (parte 1)	39
Gráfico 5: Desempenho Térmico dos forros - Estudo 2 (parte 2)	40
Gráfico 6: Temperaturas de superfície - conjunto 2 (Zn) - 1 ^a etapa	41
Gráfico 7: Temperaturas de superfície - conjunto 3 (Zn + mtA) - 1 ^a etapa	41
Gráfico 8: Temperaturas de superfície - conjunto 2 (Zn) - 2 ^a etapa	42
Gráfico 9: Temperaturas de superfície - conjunto 4 (Zn + mtB) - 2 ^a etapa	42
Gráfico 10: Temperaturas de superfície - conjunto 3 (Zn + mtA) - 3 ^a etapa	43
Gráfico 11: Temperaturas de superfície - conjunto 4 (Zn + mtB) - 3 ^a etapa	43
Gráfico 12: Perfil de temperaturas entre camadas - Conjunto 3	44
Gráfico 13: Perfil de temperaturas entre camadas - Conjunto 4	45
Gráfico 14: Radiação Solar Global - Cidade Universitária São Paulo - 14 a 18/07 ...	46
Gráfico 15: Desempenho térmico dos forros - Estudo 2 - Recorte 1	50
Gráfico 16: Desempenho térmico dos forros - Estudo 2 - Recorte 2	51
Gráfico 17: Comparativo de Temp. Interna de Superfície - conjuntos 2 e 3	53

Gráfico 18: Comparativo de Temp. Interna de Superfície - conjuntos 3 e 4.....	55
Gráfico 19: Dados de Radiação Solar Global - Período: 28/06 - 9:00 a 29/07 - 17:00	81
Gráfico 20: Dados de Radiação Solar Global - Período: 06/07 - 14:00 a 08/07 - 11:00.....	81
Gráfico 21: Dados de Radiação Solar Global - Período: 08/07 - 13:00 a 11/07 - 11:00.....	82
Gráfico 22: Dados de Radiação Solar Global - Período: 11/07 - 13:00 a 13/07 - 11:00.....	82
Gráfico 23: Dados de Radiação Solar Global - Período: 13/07 - 13:00 a 11/07 - 14:00.....	83
Gráfico 24: Dados de Radiação Solar Global - Período: 21/07 - 17:00 a 23/07 - 14:00.....	83
Gráfico 25: Densidade do ar em função da temperatura.....	84
Gráfico 26: Viscosidade do ar em função da temperatura.	85
Gráfico 27: Coeficiente de Condutividade do ar em função da temperatura.	85
Gráfico 28: Coeficiente de Prandtl do ar em função da temperatura.....	86

1 Introdução

Tudo o que podemos imaginar envolve constante transferência de energia térmica, a qual sempre se “movimenta” de uma fonte de maior temperatura para um receptor de menor temperatura. O controle térmico é um problema mundialmente conhecido e o ser humano, sempre em busca do conforto térmico, busca maneiras de interromper ou amenizar os efeitos da natureza através do desenvolvimento de produtos e materiais que interferem no processo de transferência de energia.

Essa questão é um grande desafio, pois é extremamente desejável que os ambientes habitáveis apresentem dualidade de comportamento, ou seja, devem impedir a entrada de calor em climas quentes e devem reter o calor em climas frios. Este é um fato bem coerente devido ao perfil de temperatura durante o dia (normalmente com temperaturas amenas no período da noite e temperaturas mais brandas no período do dia, apresentando pico de temperatura na metade do período) e devido à troca de estações durante o ano (as quais se diferenciam pela própria variação no perfil de temperatura durante o dia e pelas médias de temperaturas apresentadas durante cada estação).

Além disso, o Planeta Terra está suscetível às mudanças de temperatura devido a causas naturais e a causas antropogênicas comprovadas cientificamente. Esses dois eventos contribuem para mudanças climáticas que alteram o estado de nossa atmosfera, considerando variações de tempo de algumas décadas ou até de milhões de anos. Dentre as causas naturais, existem as de influência externa, como por exemplo, o ciclo solar, a variação orbital e o impacto de meteoritos, e as de influência interna, como por exemplo, a deriva dos continentes, os fenômenos naturais como o El Niño e a La Niña, o esfriamento global com o vulcanismo e as glaciações. Entre as causas antropogênicas, a mais alarmante é a emissão de gases que favorecem o efeito estufa. As teorias atuais comprovam que as ações humanas são os principais fatores responsáveis pelo aquecimento do planeta nos últimos anos.

1.1 Breve Histórico ^[1]

A origem certa das tentativas de isolamento térmico pelos seres humanos é desconhecida. Porém sabe-se que esse é um problema existente desde a pré-história, onde os primeiros seres vivos se vestiam com lãs e peles de animais e construían casas de madeira, barro ou se alocavam em cavernas para se proteger dos tempos frios de inverno e dos tempos quentes de verão. Na antiguidade, os egípcios acomodavam-se em grutas ou câmaras subterrâneas isoladas por terra em dias quentes. Os romanos usavam cortiça nas vestimentas dos pés para aquecer. Os primeiros espanhóis forravam suas casas com pedras cobertas por casca de cortiça e os norte-africanos usavam cortiça misturada com barro nas paredes de suas moradias.



Figura 1: Ser pré-histórico vestindo pele de animal.

Com o tempo, a tecnologia se desenvolveu e novas formas de controlar a temperatura foram aparecendo, tanto para expulsar o calor como para manter o calor dentro dos edifícios. Por exemplo, noruegueses e islandeses introduziram a lareira e a chaminé em suas casas, controlando o fogo como fonte de calor. As cabanas no norte europeu eram construídas com telhados de palha de 60 cm de espessura e paredes de barro com palha. As casas das missões espanholas no



sudoeste dos Estados Unidos eram construídas com vários pés de espessura de barro e palha para amenizar temperaturas externas entre 0°C e 50°C. Nativos do arquipélago do Havaí foram os primeiros a usar fibra mineral, as quais advinham de depósitos vulcânicos, para cobrir suas cabanas.

Figura 2: Cabot's Quilt.

A partir da revolução industrial do século XIX, a aplicação comercial dos isolamentos térmicos começou a se difundir. A partir da década de 1890, cobertores térmicos começaram a ser desenvolvidos, como por exemplo, a Cabot's Quilt (Manta de Cabot), criada por Samuel Cabot em 1891. Essa

manta continha uma planta marinha posta ou costurada entre duas camadas de papel kraft.

Em 1840, pela primeira vez, lã mineral foi produzida comercialmente como isolante de tubos no país de Gales e em 1875, os Estados Unidos também começaram a produzi-la. Em 1897, o engenheiro químico C. C. Hall começou a produzir lã de rocha e em 1901, fundou uma fábrica em Alexandria, Indiana; em 1928, possuía oito fábricas de produção de lã de rocha (ou lã de escória) nos Estados Unidos. Aos poucos, esse produto foi sendo substituído pelo amianto, semelhante em aparência, mas de melhor eficiência térmica.

A fibra de vidro, conhecido material isolante, foi produzida inicialmente no Antigo Egito, quando as pessoas descobriram que podiam fazer segmentos de vidro a quente para colocá-los em vasos como decoração. Em 1931, foi desenvolvida por Owens-Illinois uma técnica moderna para produção de fibra de vidro, o que envolve jateamento de vidro fundido através de pequenos orifícios aquecidos por corrente de ar de alta velocidade, em que as fibras resultantes tornam-se muito finas e de grande comprimento. Corning, como se chama a companhia de Owens-Illinois, foi o único produtor deste material (mais tarde conhecida como fibra de vidro da Owens-Corning) até uma ação antitruste de 1949 pelo Departamento de Justiça.

Em 1904, quando o Ato de Kincaid abriu parte do território de Nebraska para moradias, a palha era um dos únicos materiais indígenas disponíveis na região. Apesar de os colonos inicialmente pensarem na construção de casas “reais”, o dinheiro economizado com a construção de casas de palha era tanto que elas se disseminaram na região de Sandhills do Nebraska mais do que em qualquer outro lugar conhecido. Depois de 10 anos, essas casas começaram a ganhar uma cobertura externa e espessa de gesso e estuque de cimento. Mais tarde ainda, com a construção das ferrovias na região, a palha indígena foi gradualmente sendo substituída pela madeira.

Já se tratando de metais, em 1804, deu-se início ao patenteamento de materiais reflexivos de superfícies brilhantes e metálicas como isolantes. O alumínio tornou-se o material predominante, porém teve seu auge somente na década de 1930.

Em 1910, deu-se início à produção de placas semi-rígidas: dois produtos feitos de fibra têxtil advinda de plantas eram manufaturados em Minnesota e chamavam-se Flaxlinum e Fibrofelt. Em 1914, estes foram sendo substituídos pela placa rígida chamada Insulite, manufaturada no próprio estado de Minnesota, contendo também

pedaços de madeira de produtos residuais que passavam por um processo de secagem e se tornavam materiais secos e leves. Por volta de 1920, a Celotex Company introduziu no mercado uma placa isolante feita de bagaço de cana-de-açúcar. Depois disso, a mesma companhia introduziu uma placa de isolante resistente ao fogo com uma ou duas superfícies com fibrocimento (cimento amianto), usada em habitações de baixo custo.

Até a década de 1920, o isolamento térmico nas construções não era prioridade por causa dos próprios materiais usados naquela época, mais pesados e espessos, provendo maior resistência às variações de temperatura. Porém, a grande necessidade por construções mais econômicas com materiais mais leves fizeram crescer a necessidade de materiais isolantes. Na década de 1920, viu-se um aumento considerável dos isolantes térmicos. Enquanto a chapa de fibras era a opção mais econômica da época, os “batts” foram ganhando popularidade com o tempo. Nessa mesma época, a lã de rocha foi perdendo forças e sendo substituída pelo amianto. Na década de 1930, a fibra de vidro começou a ser produzida, ganhando força no mercado.

Na década de 1940, com o crescimento da indústria de celulose nos Estados Unidos, cujos subprodutos normalmente eram usados como isolantes sonoros, foi percebida a eficiência desses subprodutos em isolamento térmico. No entanto, o uso do material ganhou apenas uma pequena parcela do mercado devido à grande popularidade da fibra de vidro após a 2^a Guerra Mundial.



Figura 3: Aplicação de isolamento batt.

O gradual aparecimento de sistemas de ar-condicionado no design das construções também contribuiu para a necessidade de isolamento térmico. Em 1928, o Milam Building em San Antonio, Texas, foi o primeiro prédio de escritórios a ter um sistema completo e integrado de ar-condicionado. No mesmo ano, Willis Carrier instalou o primeiro sistema residencial “condicionador de ar”, chamado Weathermarker, uma vez que esquentava, esfriava, umidificava, limpava e circulava o ar na casa inteira. Um ano depois, em 1929, a General Motors introduziu o seu primeiro “room cooler” para quartos individuais. Nessa década, também surgiu o “ar-condicionado de janela” e a popularidade desse produto foi enorme até a década de 1950 quando houve a evolução para sistemas menores de ar-condicionado que

usavam condensadores de água gelada, se tornando os mais comuns para o uso residencial.

Durante a 2ª Guerra Mundial, o isolamento térmico se fez necessário para preservar os próprios metais das intempéries e dos sistemas de ar-condicionado para economizar combustíveis, que são voláteis a altas temperaturas. De forma geral, foi se despertando maior conscientização na população e nos próprios governos sobre as possibilidades de se economizar recursos com o uso de materiais de isolamento térmico aliado ao bem-estar e conforto térmico. Por exemplo, no começo da década de 1940, a Dow Chemical Company, nos Estados Unidos, começou a fabricar poliestireno extrudado como isolante térmico, antes usado como material flutuante em botes salva-vidas, pela ótima resistência à absorção de água. Esse material ganhou o nome de Styrofoam e foi inicialmente usado para situações simples de baixa temperatura como pisos, paredes e teto de frigoríficos e isolamento de tubos. Logo, a partir da década de 1950, o Styrofoam ganhou proporções em construções residenciais, comerciais e industriais.

A partir dos anos 70, houve um grande crescimento da conscientização da população pelo uso econômico e pela conservação de energia. As crises do petróleo, com a elevação excessiva dos preços do mesmo, contribuíram para a discussão pública de programas de desenvolvimento de novos tipos de energia. Políticas governamentais foram implementadas em vários países para a redução do consumo de energia e essas iniciativas não só contribuíram para conscientização energética da população em geral, mas como também aos produtores, instaladores e designers de métodos e materiais de isolamento.

Como resultado da crise de 70, houve muitas tentativas de se achar maneiras efetivas de isolamento térmico visando à diminuição do consumo de energia para essa finalidade. Por exemplo, vários produtores ingressaram na indústria de celulose provocando uma grande popularização dos isolantes feitos a partir da celulose. Quando a crise acabou, somente alguns investidores continuaram empenhados no aperfeiçoamento desse material isolante.

No Canadá, o material UFFI (forro térmico de formaldeído de uréia, em inglês urea formaldehyde foam insulation) foi largamente aplicado para o isolamento



Figura 4: Aplicação de UFFI.

térmico das habitações, porém em 1980 foi banido devido a comprovação de problemas de saúde causado por ele. Além disso, o UFFI era solúvel em água, causando problemas à estrutura do produto.

1.2 Controle de Temperatura

O controle térmico é uma questão mundialmente conhecida e tratada de diferentes formas devido às localidades no Planeta Terra que possuem tipos de clima e comportamentos de temperatura distintos. Não é uma questão que se restringe somente às habitações, também é extremamente importante nas áreas comerciais na preservação dos recursos físicos e áreas industriais no controle de processos que dependem de temperaturas ideais para ocorrerem.

Indubitavelmente, o controle térmico é um ponto que todos os habitantes do planeta enfrentam direta ou indiretamente todos os dias e o tema desse trabalho foi escolhido tendo em vista uma questão social: a situação de extrema pobreza de muitas famílias na América Latina. Apesar das várias maneiras e artifícios de se controlar a temperatura interna das habitações, foi escolhida a manta térmica, forro que funciona como material isolante, devido a sua maior facilidade de obtenção de acordo com a realidade financeira das comunidades aqui tratadas.

1.3 ONG: TETO – Brasil

TETO é uma Organização Não Governamental Latino-Americana, iniciada no Chile em 1997, liderada por jovens universitários ou recém-formados cujo objetivo é erradicar a extrema pobreza no continente. Não satisfeitos com a realidade atual e a indiferença com que as famílias, que vivem nesta condição, são tratadas pela sociedade e os órgãos governamentais, a ONG trabalha para melhorar a qualidade de vida destas e denunciar a exclusão e falta de oportunidade existente.

O trabalho do TETO, até o reposicionamento da marca, consistia em três etapas distintas: *Construção de Casas de Emergência, Habilitação Social e Comunidade Sustentável*. Cada etapa envolve diferentes ações e interações dos jovens com a comunidade e são detalhadas a seguir:

Etapa I: Construção de Casas de Emergência

No início da organização, um grupo de jovens, liderados por um sacerdote jesuítico, percebeu que uma maneira efetiva de melhorar a qualidade de vida das famílias que vivem em estado de extrema pobreza não passava por doações monetárias. Um dos principais problemas destas é a sua moradia, geralmente barracos em favelas ou assentamentos com chão de terra e goteiras no telhado. Também foi percebido o quanto a falta de condições básicas de moradia, segurança e até de sono atrapalhavam as possibilidades de seus moradores procurarem emprego e estudar, sabendo que não podiam deixar filhos para trás com ratos e outros insetos em casa, sabendo que cada chuva poderia representar o estrago dos seus móveis, etc. Identificada essa necessidade, a ONG estabeleceu a primeira fase de seu projeto como a construção de moradias de emergência para as famílias.

A “Casa do TETO” é uma construção simples de 18 m² (3m x 6m) feita de madeira, com telhado de zinco forrado por manta térmica em baixo e erguida a aproximadamente meio metro do chão para evitar inundações, umidade, insetos entre outros problemas. Ela é sustentada por estacas de madeiras – denominadas pilotis – e possuem durabilidade estimada de 5 anos. A casa tem formato padrão em toda a América Latina e serve de porta-voz da denúncia da ONG: o TETO não concorda com a realidade destas pessoas e está agindo para transformá-la.



Figura 5. Casa de Emergência em construção pela ONG.

Normalmente, a construção é feita por equipes de 8 a 10 voluntários, com a ajuda da família envolvida, durante o período de um final de semana. Os moradores são escolhidos em pesquisas prévias, que avaliam a situação da moradia e o desejo de seus moradores de se reerguer. Estes devem participar integralmente do processo, construindo junto, preparando almoço para os voluntários, não utilizando álcool ou

drogas durante o final de semana e pagando uma quantia de R\$150,00 (valor simbólico, sendo o preço total de uma casa padrão de R\$3.500,00). Tais medidas buscam enfatizar o caráter de ação conjunta e não uma doação da atividade. O objetivo principal da casa é simbolizar um recomeço, uma nova oportunidade, e mostrar que elas não foram esquecidas pela sociedade.

Além do significado para a família, a construção é uma porta de entrada para os voluntários terem contato com esta realidade com grande impacto físico e emocional. As relações feitas durante esta experiência são extremamente profundas e de mudança de comportamento, sendo que a integração e indignação desta geração com os problemas à sua volta é fundamental na luta por um futuro mais digno e justo para todos.

Não obstante, esse contato da ONG com a comunidade é essencial para firmar laços de confiança e permitir a execução das próximas etapas do projeto.

Etapa II: Habilitação Social

Após a comunidade possuir nível básico de condição para seus moradores, a organização passa a trabalhar com planos que visam diminuir a vulnerabilidade enfrentada pelas famílias. O objetivo desta etapa é desenvolver ferramentas e estratégias para que a comunidade possa se fortalecer a partir de sua própria realidade e consiga se mover adiante.

Os pontos mais abordados nesta fase são listados a seguir:

- ✓ *Plano de Educação*: onde são organizados programas de nivelamento escolar e de alfabetização para crianças, jovens e adultos.
- ✓ *Capacitação em Ofício*: com o objetivo de aumentar a produtividade e possibilidade de geração de renda dos moradores, estes são capacitados em distintos ofícios e atividades.
- ✓ *Plano de Saúde*: visando um estilo de vida mais saudável para as famílias, direcionamentos de saúde são passados, envolvimento da comunidade em redes de apoio e início de engajamento de membros voltados para a questão de saneamento básico. Tratar do assunto com órgãos do governo para viabilizar a busca por esses serviços.
- ✓ *Plano de Fomento Produtivo (microcrédito)*: a ONG busca contribuir com o desenvolvimento de empreendimentos por meio de microcrédito e capacitações na formação de novos negócios.

Concretizada esta etapa, o objetivo é capacitar a comunidade para que esta seja capaz de lidar de maneira independente com os problemas locais e isso constitui a fase seguinte.

Etapa III: Comunidade Sustentável

A última etapa do projeto visa garantir a todos que vivem em situação de extrema pobreza oportunidades para que consigam obter uma melhor qualidade de vida, por conta própria. Depois de terminadas as construções e habilitações, a ONG passa a ter trabalho apenas colaborativo, capacitando a comunidade para que esta seja capaz de exigir seus direitos e consolidar sua identidade. São criadas lideranças que entendam as necessidades em questão e consigam se expor para os órgãos responsáveis, como os de saúde, educação, transporte, etc. de modo a serem inseridos no relacionamento das redes formais.

No Brasil, a ONG estabeleceu-se há sete anos, trabalhando apenas no estado de São Paulo e por ora, desenvolve a primeira etapa do projeto exclusivamente. O objetivo para 2012 é abrir escritórios no Rio de Janeiro e Nordeste, para o início de construções nestes locais e iniciar a segunda etapa em algumas comunidades de São Paulo, nas quais o trabalho já atingiu estágio mais avançado.

Os fatores limitantes de um maior crescimento são o financeiro e “mão de obra”. A necessidade por voluntários, que trabalhem não só durante as construções, mas também no escritório e nos demais projetos, é constante. Uma expansão está diretamente ligada ao número de pessoas interessadas e com dedicação ao projeto.

O fator econômico também é essencial para o crescimento do projeto desejado, e necessário, para o país. A ONG é sustentada por parcerias com empresas, doações particulares, plano de sócios e fundos de organismos internacionais, além de campanhas e eventos de arrecadação. Portanto, o aumento das atividades está relacionado à divulgação da organização e de seus objetivos, para atrair maior número de interessados em parcerias ou em voluntariar-se.



Figura 6. Família participante do projeto.

Reposicionamento da ONG

Neste ano, foi finalizado o trabalho de reposicionamento de marca, visão, missão e objetivos da ONG. Com isso, houve a mudança do nome *Um Teto Para Meu País* para TECNO em todos os países de atuação, com exceção do Brasil, onde está passou-se a chamar TETO, visto que este é o único país cuja língua não é o castelhano.

Além disso, a intenção da alteração era estabelecer novas missões e objetivos para a organização. O que levou às seguintes definições^[8]:



Figura 7: Novo logo da ONG, no Brasil.

Missão: Trabalhar sem descanso nos assentamentos precários para superar a extrema pobreza, através da formação e da ação conjunta de seus moradores e jovens voluntários, promovendo o desenvolvimento comunitário, denunciando a situação na qual vivem as comunidades mais excluídas e incidindo, junto a outros, em política.

Visão: Uma sociedade justa e sem pobreza, onde todas as pessoas tenham oportunidades para desenvolver suas capacidades e exercer plenamente seus direitos.

A partir do novo posicionamento, o TETO propõe-se a executar as etapas acima descritas sem uma restrição de ordem, ou seja, há comunidades nas quais o desenvolvimento comunitário necessite apenas de atividades das antigas etapas II e III. No novo modelo, estes trabalhos podem ser iniciados sem a construção prévia de moradias de emergência. Com isso, a comunidade passará a fazer parte do perfil com o qual a ONG atua – antigamente, por questão de maior urgência, somente eram feitos trabalhos nas comunidades onde a construção de casas se fazia necessária.

Não se pode deixar de comentar, que a prioridade da organização continua sendo diminuir o número de famílias cuja moradia encontra-se em estado precário, e com isso a construção de casas ainda permanece como sendo a principal atividade do TETO no Brasil, contudo a reestruturação possibilita que esta seja feita de maneira mais qualificada e com uma maior interação entre família e voluntários.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Para a realização dos experimentos práticos deste relatório, foram utilizados os seguintes materiais para o trabalho:

2.1.1 Miniaturas de casas de madeira

As casas construídas pela ONG foram simuladas para o estudo em escala menor (60 x 90 x 60 cm). Foram construídas quatro miniaturas rigorosamente semelhantes, visando que não houvesse disparidades nos resultados por conta da estrutura.

As miniaturas não contém estrutura de telhado, e são elevadas do chão para diminuir a troca de calor com piso abaixo.

Medidas: 60 x 90 x 60 cm

2.1.2 Telha de fibrocimento

Uma unidade de telha de fibrocimento.

Medidas: 100 x 110 x 0,6 cm

2.1.3 Telhas de aço zíncado¹

Três unidades de telhas de zinco galvanizado.

Medidas: 70 x 100 x 0,043 cm.

2.1.4 Manta térmica A¹

Manta térmica composta por lâmina de alumínio (com pureza expressa pelo fabricante de 99,85%), camadas de filme de polietileno com alvéolos de ar extrudados a 180°C.

Foi utilizada apenas uma unidade.

Medidas: 60 x 90 x 0,3 cm

2.1.5 Manta térmica B¹

Manta térmica de fibras plásticas de polietileno de alta densidade *não tecidas*.

Uma das faces recebe acabamento em alumínio e coating acrílico.

Foi utilizada apenas uma unidade.

Medidas: 60 x 90 x 0,021 cm

2.1.6 Termômetros com armazenamento de dados



Termômetros integrados a dispositivos armazenadores de dados de temperatura. Foram utilizados cinco unidades ao longo dos experimentos.

Figura 8: Termômetro armazenador de dados.

2.1.7 Software de medida

Interface dos termômetros com o computador. Software utilizado para a programação das medições no início de cada experimento e para a recuperação e exportação dos dados para posterior análise.

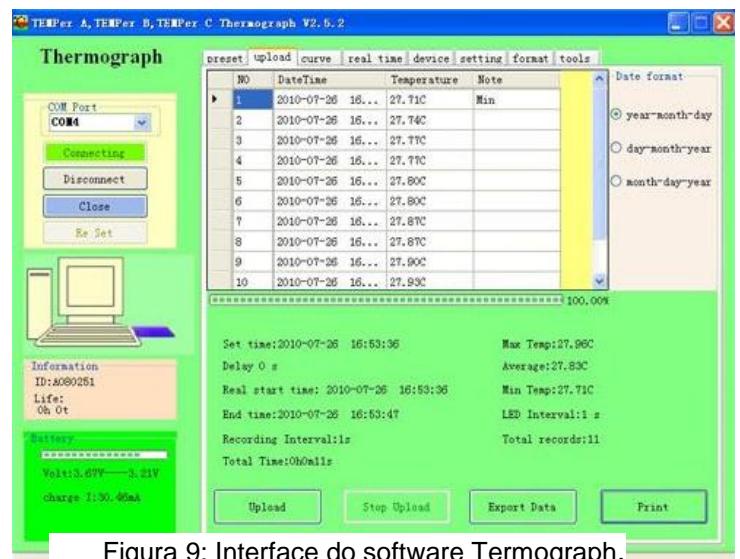


Figura 9: Interface do software Termograph.

¹ Neste estudo, os fornecedores dos materiais utilizados não serão revelados, a fim de manter o enfoque nas propriedades físicas e generalizadas dos mesmos.

2.2 Métodos

2.2.1 Calibração dos termômetros

Os termômetros foram calibrados a partir de medição simultânea de temperatura.

Para isso, foi feita a programação de início e de intervalo de medidas idênticos para todos os dispositivos e foram deixados expostos às mesmas condições de temperatura ambiente, exposição ao sol e incidência de ventos.

2.2.2 Projeto das miniaturas

As miniaturas foram projetadas no software gráfico Google SketchUp® e desenvolvidas em parceria com fabricante de “casas de cachorro”.

O projeto é apresentado a seguir:

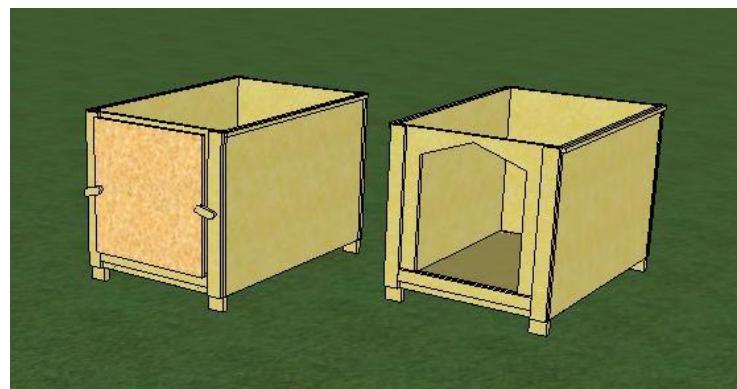


Figura 10: Projeto eletrônico da casa miniatura modelo.

2.2.3 Avaliação do desempenho térmico dos tipos de forro

O experimento principal do relatório foi desenvolvido para quatro situações. Estes são definidos a seguir:

Tabela 1: Composição dos conjuntos experimentais.

Conjunto	Composição
1	Telha de fibrocimento
2	Telha de zinco
3	Telha de zinco e Manta A
4	Telha de zinco e Manta B

a) Disposição dos materiais

Cada conjunto foi disposto em uma das miniaturas, sendo o *conjunto 3* composto pela manta A – com a lâmina de alumínio voltada para cima – sobreposta pela telha de zinco. Enquanto que o *conjunto 4* foi composto pela manta B – com a face com acabamento de alumínio voltada para baixo – sobreposta também pela telha de zinco.

Ambas as disposições foram feitas de acordo com as instruções disponibilizadas pelos fabricantes.

b) Análise comparativa das temperaturas internas

Para a obtenção das temperaturas, foi utilizado um termômetro com armazenamento de dados medindo a temperatura ambiente ao longo do experimento e outro dentro de cada modelo.

O ponto crítico e fundamental do experimento é a paridade das condições ambientes entre todos os conjuntos. Com isso, o experimento foi conduzido em ambiente amplo no qual não houvesse interferências pontuais – sombras, correntes de vento, entre outros – em um ou mais modelos, visando a consistência do experimento.

Todos os testes experimentais foram feitos no terraço do bloco Semi-Industrial da Engenharia Química da Escola Politécnica.

c) Análise comparativa das temperaturas de superfícies

Nesta seção, foram utilizados dois termômetros por modelo para a obtenção das temperaturas de superfície externa da telha e temperatura interna da manta térmica, como mostra a figura a seguir:

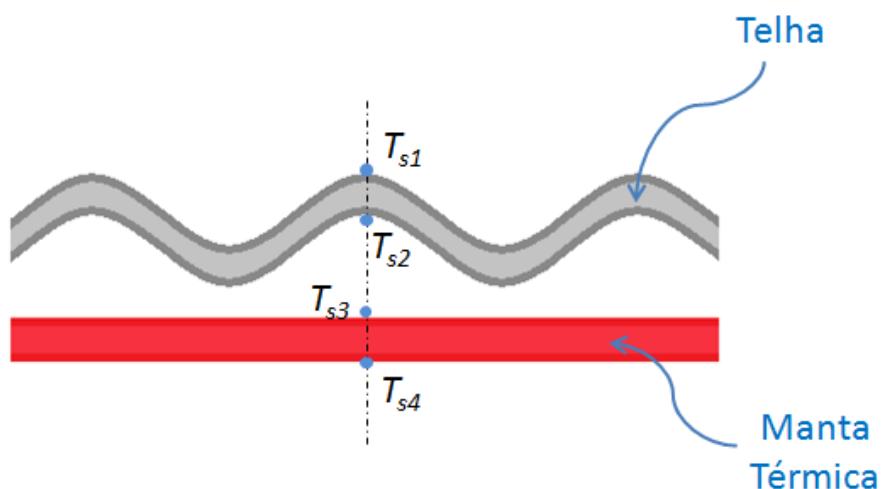


Figura 11: Ilustração das temperaturas de superfície.

Onde,

T_S : temperatura superficial.

T_{S1} : temperatura da superfície externa da telha.

T_{S2} : temperatura da superfície interna da telha.

T_{S3} : temperatura da superfície externa da manta.

T_{S4} : temperatura da superfície interna da manta.

Além destas medidas, foram colhidos dados de temperaturas de superfície externa e interna da telha de zinco (denominadas T_{S1} e T_{S2}) do conjunto 2, para servir como base comparativa das medidas.

Para a comparação entre todas as miniaturas, o experimento foi realizado em três etapas, nas quais foram medidos dois conjuntos por vez. A distribuição destas etapas é apresentada a seguir:

Tabela 2: Conjuntos medidos em cada etapa do experimento.

Etapas	Conjuntos medidos
1 ^a	2 e 3
2 ^a	2 e 4
3 ^a	3 e 4

A temperatura ambiente também foi levantada em todas as bateladas de obtenção de dados.

2.2.4 Determinação dos coeficientes globais de troca térmica

Os coeficientes globais de troca térmica foram determinados para os conjuntos 3 e 4, por se tratarem daqueles nos quais há a composição de camadas – telha, camada de ar e manta.

a) Dados de Temperaturas de Superfícies – Perfil das camadas das coberturas

Como parte seguinte do experimento, foram medidas as quatro temperaturas de superfície dos conjuntos 3 e 4 - T_{S1} , T_{S2} , T_{S3} , e T_{S4} .

Para a obtenção destas, foi disposto um termômetro em contato com cada lado da superfície (interno e externo) dos dois componentes do conjunto (telha e manta).

Mais uma vez, a temperatura ambiente foi levantada simultaneamente.

b) Dados de Radiação Térmica

Para o cálculo dos coeficientes globais de troca térmica, foram utilizados os dados de radiação solar referentes aos períodos de testes experimentais do relatório.

Estes dados foram coletados por um radiômetro (modelo CMP3) e fornecidos pela Pós Doutora em Engenharia Química Katia Ribeiro, do Centro de Engenharia de Sistemas Químicos – CESQ/DEQ - EPUSP.

3 Modelamento Matemático

3.1 Conservação de Energia em um Volume de Controle Fechado^[3]

De acordo com a primeira Lei da Termodinâmica, em um volume de controle, o aumento na quantidade de energia acumulada deve ser igual à quantidade de energia que entra menos a quantidade de energia que deixa o sistema. Para um sistema fechado, há duas formas para as quantidades de energia que entram e saem: transferência de calor (Q) através da fronteira e trabalho (W) realizado ou recebido pelo sistema.

$$\Delta E_{acu}^{tot} = Q - W$$

A primeira Lei da Termodinâmica refere-se à energia total, ou seja, energia constituída pelas energias cinética e potencial (conhecidas juntas por energia mecânica), e pela energia interna (composta pelas energias térmica e outras como a química e a nuclear). Para o estudo de transferência de calor, o relevante são as energias térmicas e mecânicas, contudo, as outras formas de energia podem ser convertidas em energia térmica, como por exemplo, quando no sistema há uma reação química. Logo, reescrevendo a equação, podemos considerar o acúmulo de energia como sendo a diferença entre as energias de entrada (E_{ent}) e de saída (E_{sai}) acrescida de uma geração (E_g) de energia térmica:

$$\Delta E_{acu} = E_{ent} - E_{sai} + E_g$$

Esta equação pode ser aplicada para um intervalo de tempo Δt , com as energias medidas em joules. Porém, para cada instante de tempo t , a primeira Lei da Termodinâmica também deve ser satisfeita. A equação deve ser escrita então, com base nas taxas de energia, medidas em joules por segundo (W):

$$\dot{E}_{acu} = \frac{dE_{acu}}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g \quad \text{Eq. 1}$$

Importante frisar que a aplicação e a análise da primeira Lei da Termodinâmica iniciam-se com a identificação do volume de controle apropriado. Posteriormente, deve-se decidir se o estudo de transferência de calor será feito em um intervalo de tempo Δt ou em um instante de tempo t .

3.1.1 Balanço de Energia em uma Superfície

Quando um volume de controle definido é uma superfície, não há o envolvimento de transferência de massa (e volume) em ambos os lados da fronteira física. Dessa maneira, os termos de geração e de acúmulo na Eq. 1 de conservação não são mais relevantes, restante somente os termos relacionados aos fenômenos de superfície:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0 \quad \text{Eq. 2}$$

3.1.2 Tipos de Energia

a) Condução^[5]

O mecanismo de condução está relacionado à transferência de calor em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido. Quando não há movimentação física das matérias envolvidas, a troca de energia acontece em níveis atômicos e moleculares. A condução pode ser vista como a transferência de energia entre partículas em diferentes estados energéticos devido à interação entre as mesmas.

No caso de fluido, a principal interação que rege a transferência por condução é a difusão energética, devida ao movimento molecular aleatório.

Para o equacionamento matemático da condução térmica nos isolantes, a taxa de transferência de calor é definida pela *Lei de Fourier*:

$$\vec{q}'' = -k \cdot \vec{V}T$$

Onde,

k : coeficiente de condutividade térmica do material.

$\vec{\nabla}T$: gradiente de temperatura no material. Definido por $\vec{\nabla}T = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \hat{k}$

Sendo uma condução unidimensional, no eixo x, hipótese adotada para o sistema que será estudado:

$$q''_{cond\ x} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

O volume de controle hipotético está representado a seguir:

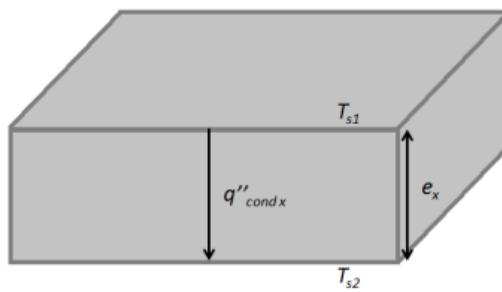


Figura 12: Volume de controle representativo da condução.

No Anexo II, pode-se encontrar a dedução da fórmula usada para transferência de calor unidimensional nos isolantes do problema usado:

$$q''_{cond\ x} = -k \cdot \left(\frac{T_{s1} - T_{s2}}{e_x} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

b) Convecção^{[3][7]}

O termo convecção refere-se à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido, em movimento, que se encontram a diferentes temperaturas.

Além da difusão das partículas do fluido, o movimento em conjunto das mesmas contribui para a troca energética.

A transferência de calor por convecção é definida pela *Lei de Resfriamento de Newton*:

$$q''_{conv} = h \cdot (T_s - T_\infty)$$

Onde,

h : coeficiente convectivo do fluido.

T_∞ : temperatura do fluido distante da superfície.

Contudo, o coeficiente convectivo h , sofre grande influência do escoamento do ar em lugares com ventilação. A figura a seguir representa a transferência de calor por convecção:

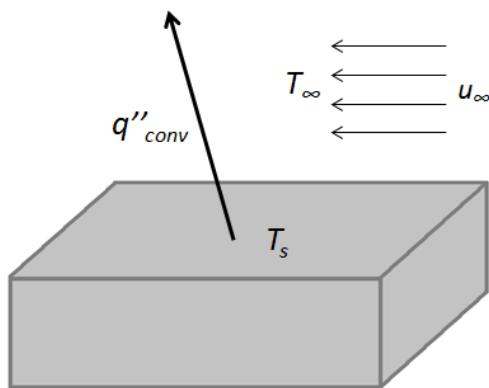


Figura 13: Volume de controle representativo da convecção.

Logo, considera-se o efeito da velocidade do escoamento do ar u_∞ no coeficiente convectivo, que por sua vez passa a ser considerado uma média na superfície estudada:

$$q''_{conv} = \bar{h} \cdot (T_s - T_\infty) \quad \text{Eq. 4}$$

O modelo empírico usado para a determinação do coeficiente convectivo médio \bar{h} em placa plana encontra-se no Anexo III.

c) Radiação^[3]

Em corpos cujas temperaturas não são nulas, mudanças nas configurações eletrônicas de seus átomos e moléculas são responsáveis pela emissão de calor. Esta emissão é denominada *radiação* e é transportada por ondas eletromagnéticas, as quais não dependem do meio para serem emitidas. No caso estudado, há dois tipos de transferência de calor por radiação: absorção e emissão.

A absorção refere-se à porção da irradiação (G) de fontes de energia ou da vizinhança do sistema que é absorvida pela superfície ou fluido em questão. As demais porções são refletidas para o meio. O calor absorvido pode ser calculado por:

$$q''_{abs} = \alpha \cdot G \quad \text{Eq. 5}$$

Onde,

α : absorvividade, propriedade radiante da superfície que indica o quanto da radiação incidente é absorvida por ela. Logo, $0 \leq \alpha \leq 1$.

Já a emissão, é a radiação emitida por uma superfície com poder emissivo, definida pela *Lei de Stefan-Boltzmann*:

$$q''_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad \text{Eq. 6}$$

Onde,

ε : emissividade, propriedade radiante de uma superfície que fornece uma medida de eficiência de emissão de energia em relação ao corpo negro ($\varepsilon = 1$). Logo, $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$).

Podemos observar esses fenômenos na figura a seguir:

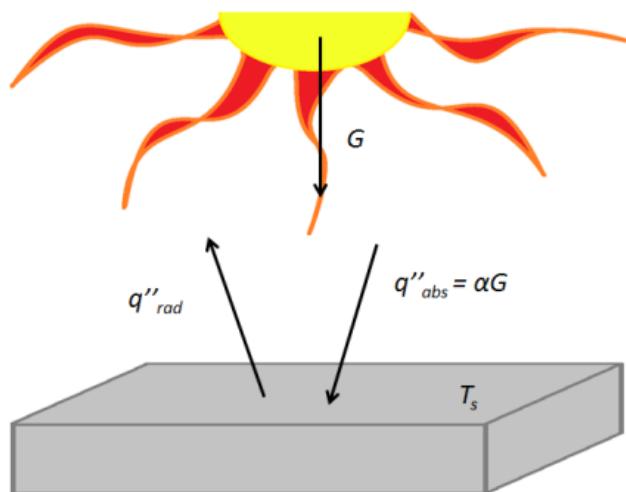


Figura 14: Volume de controle representativo da radiação.

3.2 Definindo o Cenário Estudado

No problema proposto, a transferência de calor é estudada em diferentes disposições de telhados. Um esquema geral das miniaturas pode ser vista na figura a seguir:

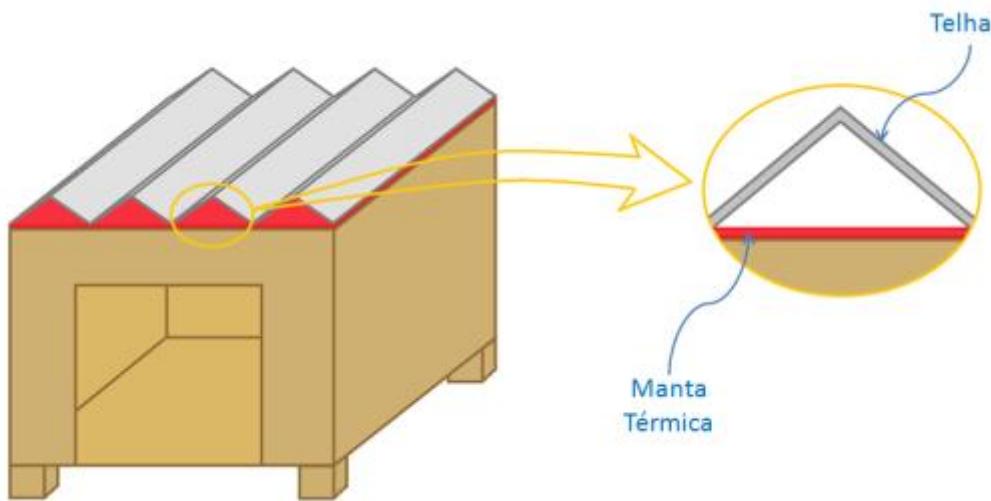


Figura 15: Esquema representativo das miniaturas com telha e manta térmica.

Como visto, as disposições de telhados podem conter até no máximo três camadas de barreiras para a transferência de calor: a telha, o ar e a manta térmica.

➤ Hipóteses simplificadoras

Uma hipótese simplificadora usada nesse projeto é de que as telhas serão consideradas placas planas a fim de se estudar o escoamento do ar na superfície externa. Além disso, esse escoamento será considerado paralelo. Isso auxiliará o desenvolvimento das equações para balanço energético, uma vez que já existem métodos empíricos para o escoamento externo com essa geometria.

Com isso, pode-se definir o cenário estudado:

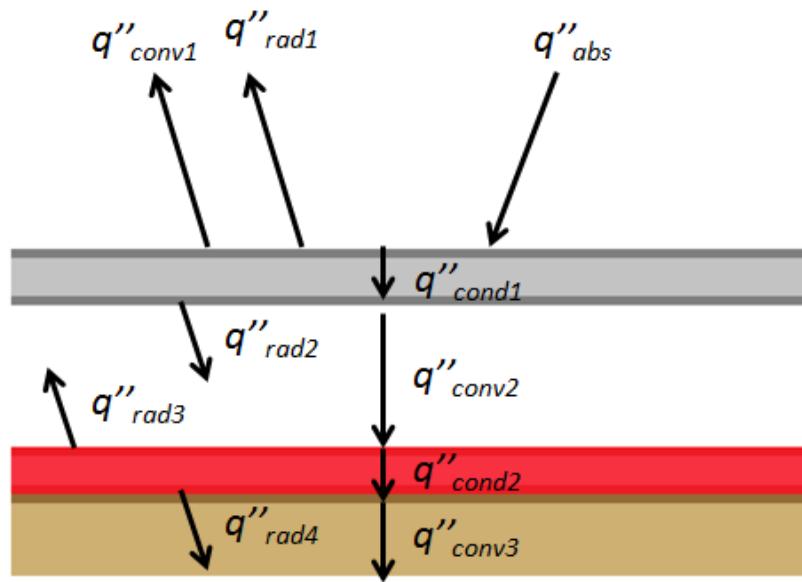


Figura 16: Fluxos de calor no cenário estudado.

Onde,

q''_{abs} : fluxo de calor absorvido pela telha.

q''_{rad1} : fluxo de calor emitido pela superfície externa da telha.

q''_{conv1} : fluxo de calor convectivo entre a telha e o ar ambiente.

q''_{cond1} : fluxo de calor de condução na telha.

q''_{conv2} : fluxo de calor convectivo na camada de ar.

q''_{rad2} : fluxo de calor emitido superfície interna da telha.

q''_{rad3} : fluxo de calor emitido superfície externa da manta térmica.

q''_{cond2} : fluxo de calor de condução na manta térmica.

q''_{rad4} : fluxo de calor emitido superfície interna da manta térmica.

q''_{conv3} : fluxo de calor convectivo que dentro na miniatura.

Além disso, pode-se definir os volumes de controle pertinentes à transferência de calor no cenário:

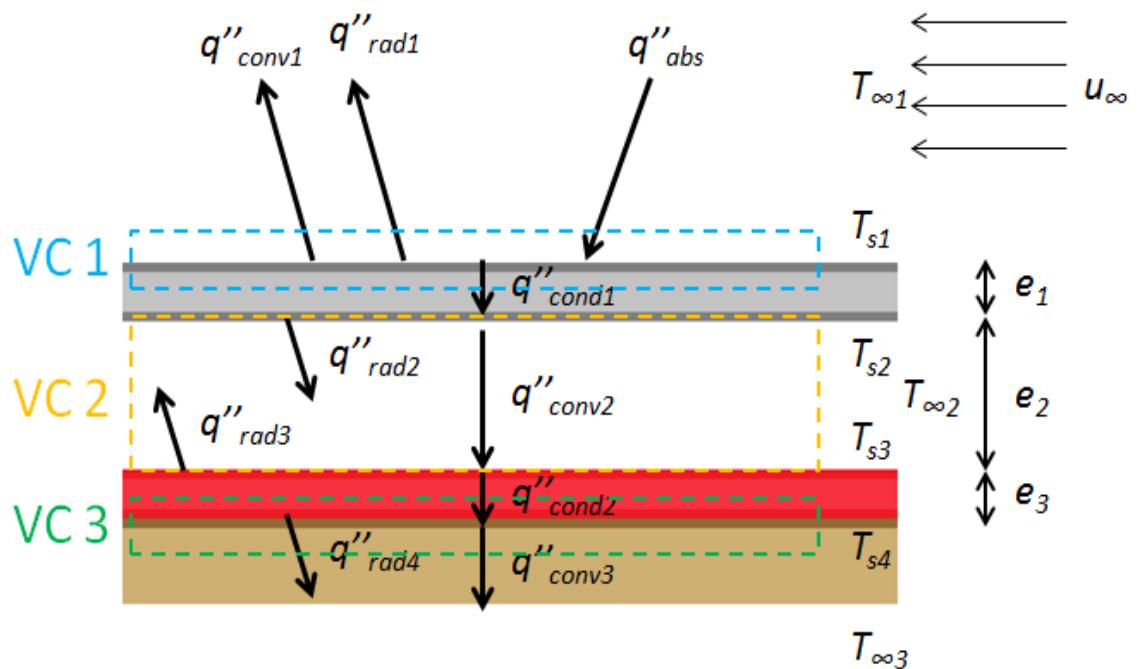


Figura 17: Volumes de controle no cenário estudado.

Onde,

$T_{\infty 1}$: temperatura do ar ambiente.

u_∞ : velocidade do ar ambiente.

T_{s1} : temperatura na superfície superior da telha.

T_{s2} : temperatura na superfície inferior da telha.

$T_{\infty 2}$: temperatura da camada de ar.

T_{s3} : temperatura na superfície superior da manta térmica.

T_{s4} : temperatura na superfície inferior da manta térmica.

$T_{\infty 3}$: temperatura do ar interno.

e_1 : espessura da telha.

e_2 : espessura da camada de ar.

e_3 : espessura da manta térmica.

3.3 Equacionando Genericamente o Problema Estudado

A seguir, está equacionado de forma genérica o problema estudado, pois o comportamento da transferência de calor durante o dia pode mudar, e algumas componentes listadas podem deixar de existir ou mudar o sentido, o que em termos práticos é corrigido anulando o componente ou alterando o sinal no equacionamento, respectivamente.

Algumas considerações e hipóteses foram usadas para o modelamento matemático nos volumes de controle definidos:

- Condições de regime estacionário.
- Propriedades dos materiais e do ar constantes em cada instante.
- Temperaturas nas superfícies uniformes.
- Condução unidimensional.
- Não há geração de energia nos volumes de controle considerados.
- Ar é um fluido incompressível e a sua dissipação viscosa é desprezível.
- Ao longo da telha, a queda de pressão é desprezível.

3.3.1 Volume de Controle 1

O primeiro volume de controle considerado está a seguir representado isoladamente:

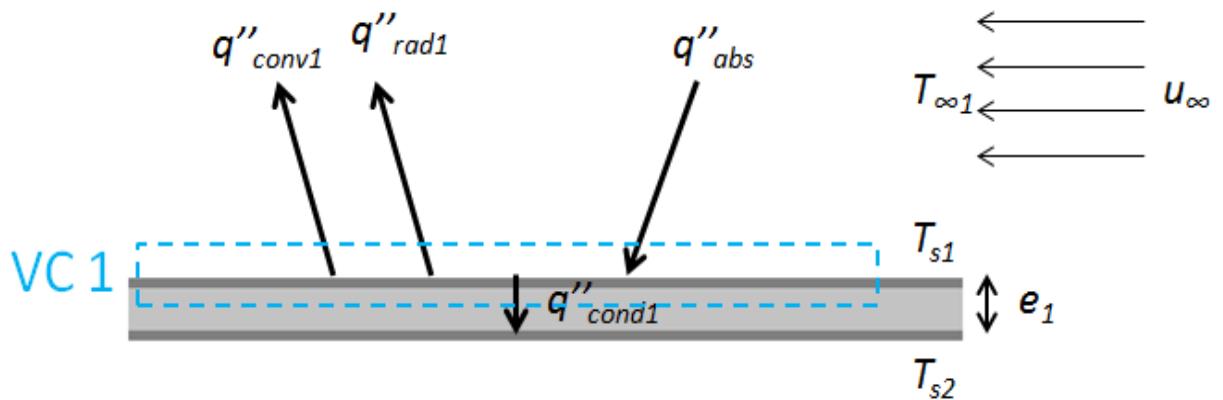


Figura 18: Volume de controle 1 para o balanço energético.

Logo, com o esquema acima e com as considerações feitas, podemos fazer o balanço energético correspondente ao VC 1 a partir da Eq. 2 (pg. 24):

$$\dot{E}_{acu_1} = \dot{E}_{ent_1} - \dot{E}_{sai_1} = 0$$

$$q''_{abs} - q''_{rad1} - q''_{conv1} - q''_{cond1} = 0$$

$$\alpha \cdot G - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{s1}^4 - \overline{h_1} \cdot (T_{s1} - T_{\infty 1}) - k_1 \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{e_1} = 0 \quad \text{Eq. 7}$$

3.3.2 Volume de Controle 2

O segundo volume de controle considerado encontra-se a seguir representado:

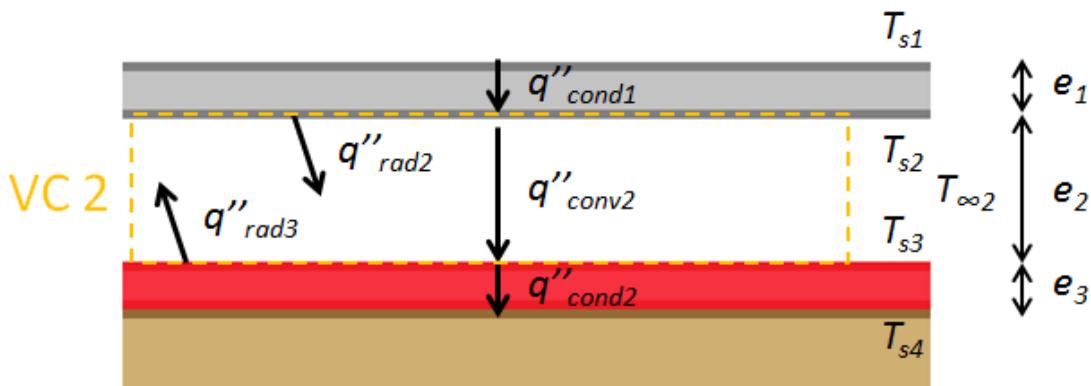


Figura 19: Volume de controle 2 para o balanço energético.

Dessa maneira, podemos fazer o balanço energético correspondente ao VC 2:

$$\dot{E}_{acu_2} = \dot{E}_{ent_2} - \dot{E}_{sai_2} = 0$$

$$q''_{cond1} \cdot A_1 - q''_{cond2} \cdot A_2 = 0$$

$$k_1 \cdot A_1 \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{e_1} - k_2 \cdot A_2 \cdot \frac{(T_{s3} - T_{s4})}{e_3} = 0 \quad \text{Eq. 8}$$

Onde,

A_1 : área superficial da telha.

A_2 : área superficial da manta.

k_1 : coeficiente de condutividade da telha.

k_2 : coeficiente de condutividade da manta.

3.3.3 Volume de Controle 3

O terceiro volume de controle considerado encontra-se a seguir representado:

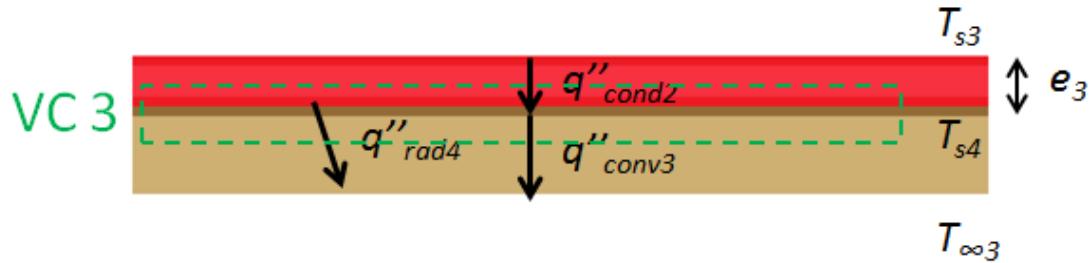


Figura 20: Volume de controle 3 para o balanço energético.

Da mesma forma, define-se o balanço energético correspondente ao VC 3:

$$\dot{E}_{acu_3} = \dot{E}_{ent_3} - \dot{E}_{sai_3} = 0$$

$$q''_{condz} - q''_{conv3} - q''_{rad4} = 0$$

$$k_2 \cdot \frac{(T_{s3} - T_{s4})}{e_3} - \overline{h}_3 \cdot (T_{s4} - T_{\infty_3}) - \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_{s4}^4 = 0 \quad \text{Eq. 9}$$

3.3.4 Coeficiente Global de Transferência de Calor do Sistema

Para determinação do coeficiente global do sistema genérico estudado, é preciso primeiramente determinar o coeficiente de transferência de calor na camada de ar. Para isso, será considerado um fluxo de calor efetivo que engloba tanto o termo da convecção quanto os termos de radiação. Dessa maneira, o novo cenário é representado da seguinte forma:

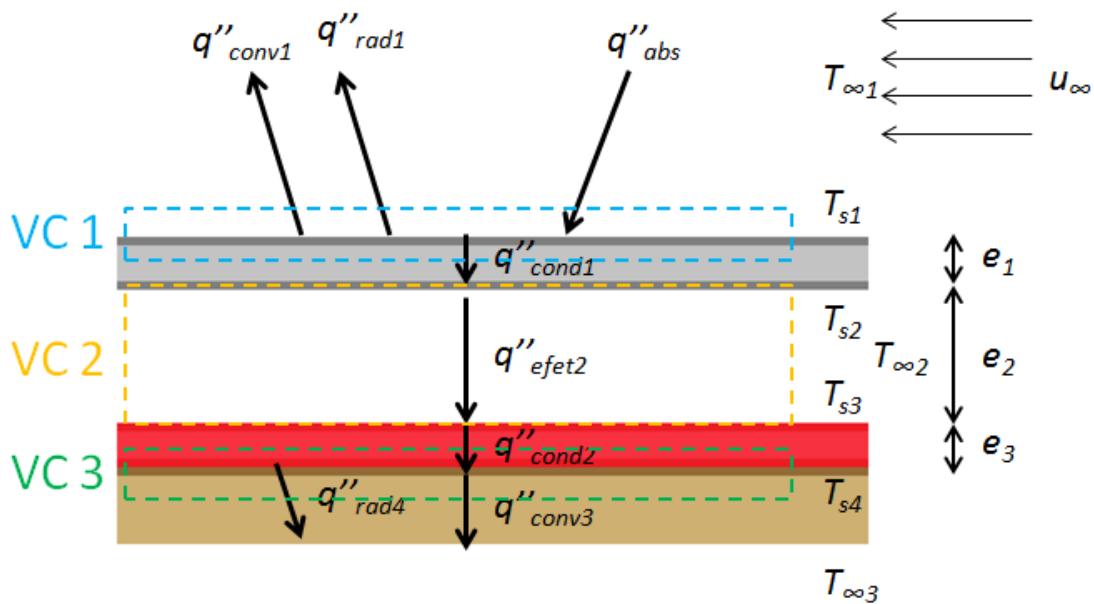


Figura 21: Cenário estudado com troca efetiva de calor na camada de ar.

Onde,

q''_{efet2} : fluxo de calor efetivo na camada de ar.

Com isso, assume-se que o fluxo de calor efetivo é convectivo, podendo-se usar a Equação 4 para a determinação de seu coeficiente de transferência de calor efetivo. Para essa finalidade, cria-se um quarto volume de controle:

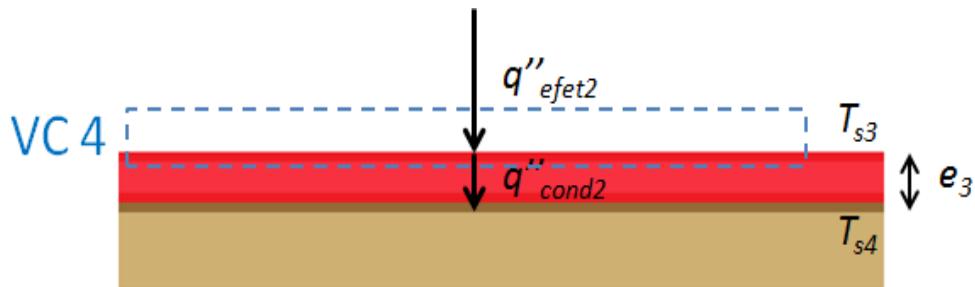


Figura 22: Volume de controle 4 para o balanço energético.

Logo, considerando-se as áreas de fluxos iguais, define-se o balanço energético no VC4:

$$\dot{E}_{acu_4} = \dot{E}_{ent_4} - \dot{E}_{sai_4} = 0$$

$$q''_{efet2} - q''_{cond2} = 0$$

$$\bar{h}_{efet2} \cdot (T_{s2} - T_{s3}) - k_2 \cdot \frac{(T_{s3} - T_{s4})}{e_3} = 0 \quad \text{Eq. 10}$$

Onde,

\bar{h}_{efet2} : coeficiente convectivo de calor efetivo na camada de ar.

Então, resolvendo todos os balanços energéticos propostos, é possível determinar a resistência total do sistema, a partir da equação 3.12 de (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007), obtendo a seguinte expressão:

$$R_{total} = \frac{e_1}{k_1 \cdot A_1} + \frac{1}{\bar{h}_{efet2} \cdot A_2} + \frac{e_3}{k_2 \cdot A_2} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde,

R_{total} : resistência total à transferência de calor do sistema. É definido matematicamente por $E_{ent} = \frac{\Delta T}{R_{total}}$ e nesse caso isso significa $q''_{cond1} \cdot A_1 = \frac{(T_{s1} - T_{s4})}{R_{total}}$.

Dessa maneira, interpretando o sistema telha, camada de ar e manta térmica um sistema puramente condutivo, podemos estimar o coeficiente global de transferência de calor para ele:

$$k_{global} = \frac{(e_1 + e_2 + e_3)}{R_{total} \cdot A_{efet}} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde,

A_{efet} : área efetiva do sistema. Consiste na média simples das áreas de transferência da telha e da manta térmica.

O coeficiente global do sistema, k_{global} , auxiliará na comparação de diferentes sistemas de telhas e mantas no tratamento de dados para experimentos simultâneos.

Pelos balanços nos volumes de controle, pode-se perceber que o calor transferido em todas as camadas do sistema é igual, respeitando a hipótese de regime estacionário. Logo a Eq. 7 (pg. 32) pode ser usada da seguinte maneira:

$$\alpha \cdot G - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{s1}^4 - \bar{h}_1 \cdot (T_{s1} - T_{\infty 1}) - q''_{global} \cdot \frac{A_{efet}}{A_1} = 0 \quad \text{Eq. 13}$$

Onde,

q''_{global} : fluxo de calor global do sistema. Respeita a seguinte relação - $q''_{global} \cdot A_{efet} = q''_{cond1} \cdot A_1 = q''_{cond2} \cdot A_2$. Além disso, através da Eq. 12 e da definição de R_{total} , podemos dizer que $q''_{global} = k_{global} \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s4})}{e_1 + e_2 + e_3}$.

4 Resultados Experimentais

A seguir, são apresentados os resultados das três etapas de experiências: *Calibração dos termômetros, Avaliação do desempenho térmico dos tipos de forro e determinação dos coeficientes globais de troca térmica*, nas quais o trabalho foi dividido.

4.1 Calibração dos termômetros

Para avaliar a calibração dos termômetros, foram realizados dois experimentos: programação dos cinco aparelhos para medir a temperatura de um mesmo ponto durante 24 horas, nas condições ambientes, e medida comparativa deste com um termômetro STM de mercúrio, em ambiente fechado. Os resultados obtidos são expostos a seguir:

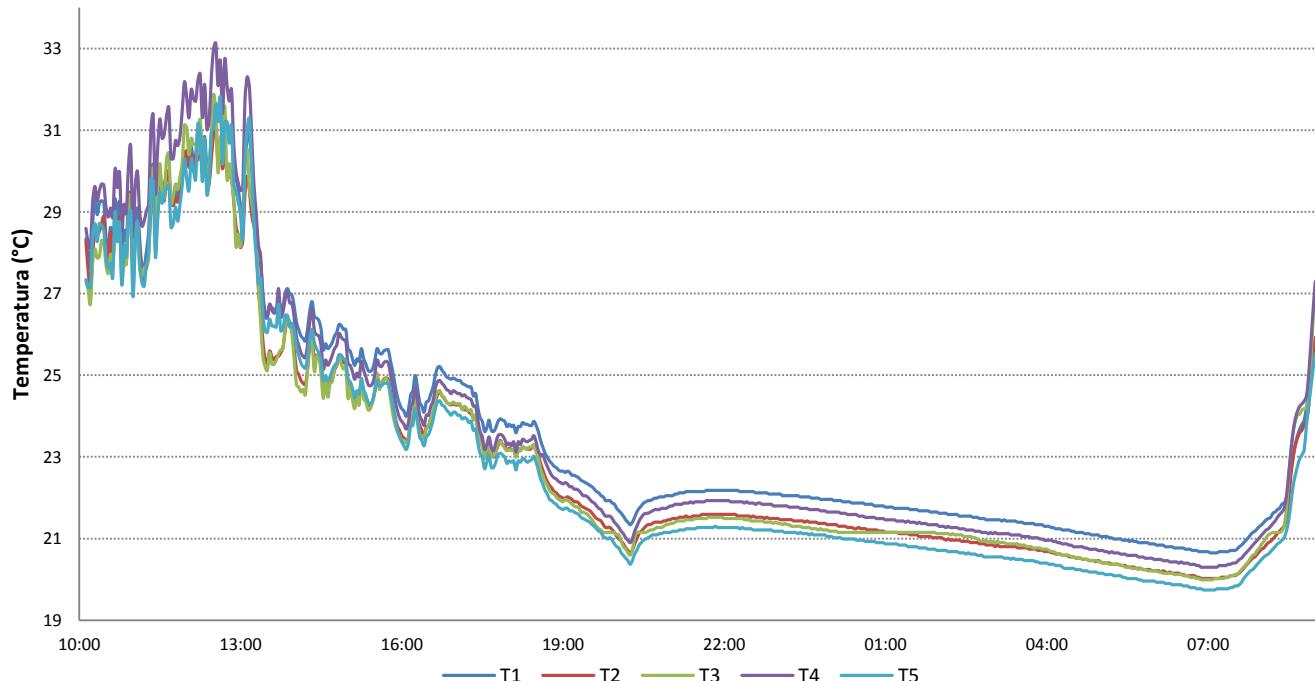


Gráfico 1: Calibração dos termômetros de medida.

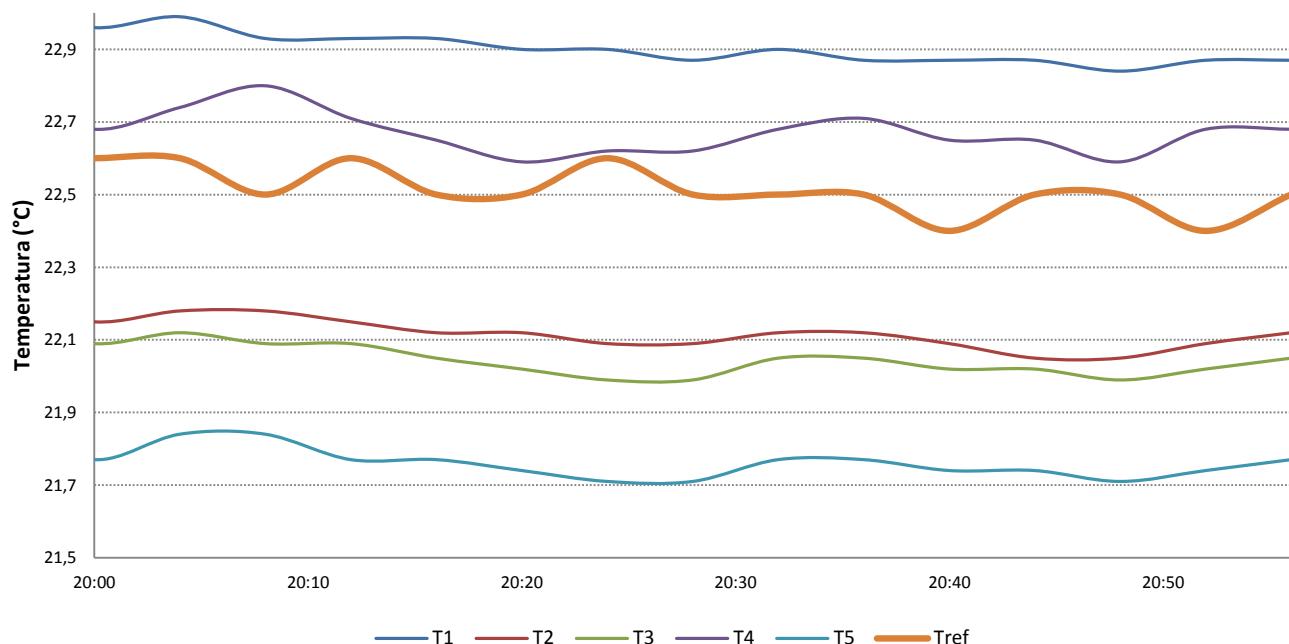


Gráfico 2: Calibração dos termômetros a partir de referência STM.

4.2 Avaliação do desempenho térmico dos tipos de forro

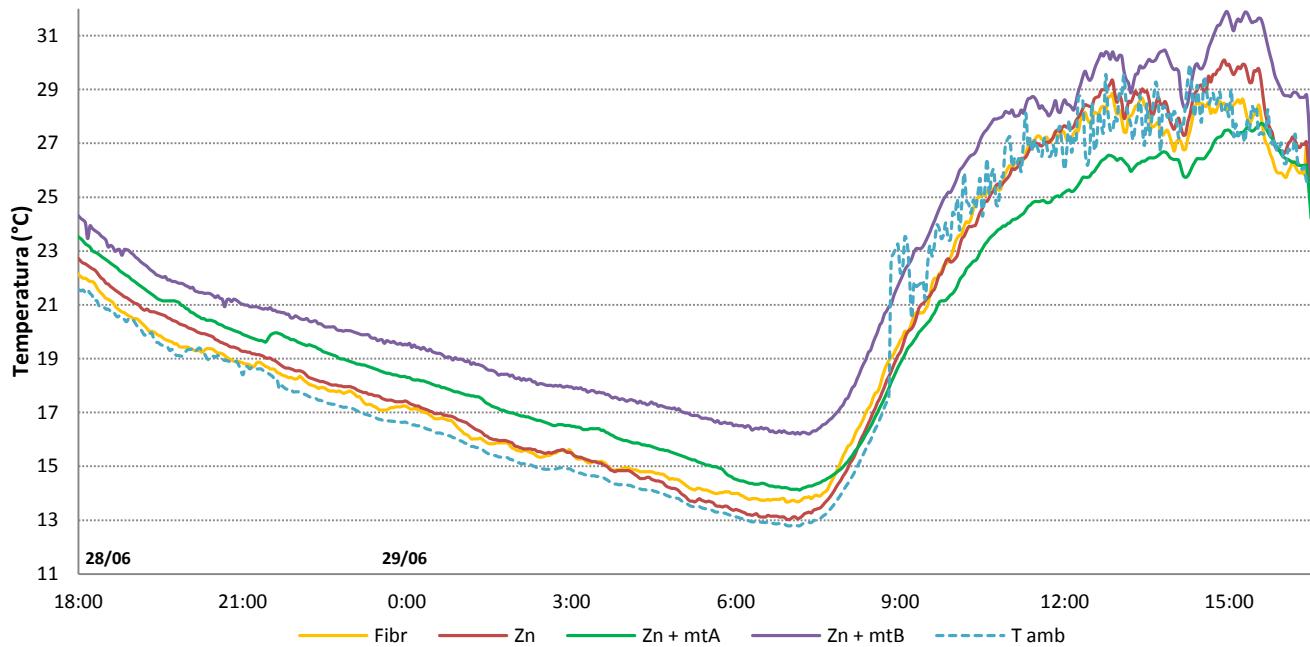
4.2.1 Análise comparativa das temperaturas internas

Foram realizados dois estudos de desempenho térmico das quatro miniaturas. Os períodos destes são apresentados a seguir:

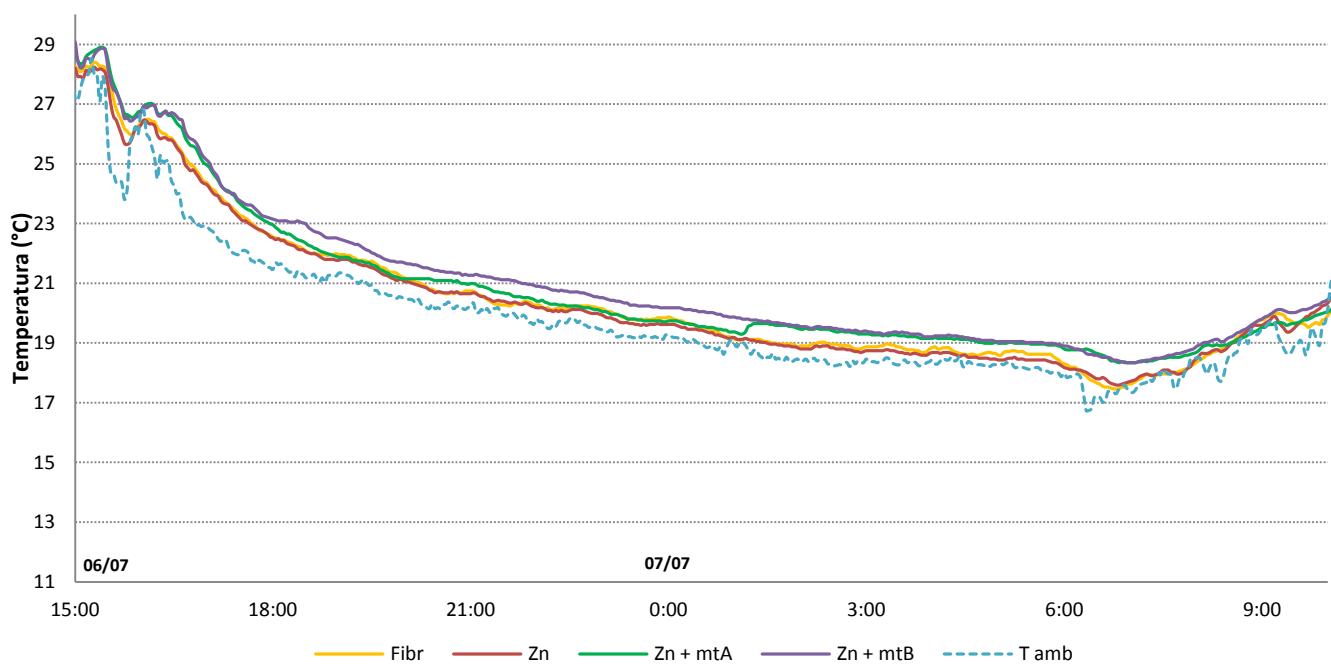
Tabela 3: Duração dos experimentos de medida de temperatura interna dos modelos.

Estudo	Período	Duração
1	28/06 – 18h00 à 29/06 – 16h30	22h30"
2	06/07 – 15h00 à 08/07 – 9h00	42h00"

Abaixo, os resultados obtidos:



Com o objetivo de facilitar a visualização dos resultados, o segundo estudo foi dividido em dois gráficos, sendo o ponto de divisão os dados do dia 07/07, às 10h00.



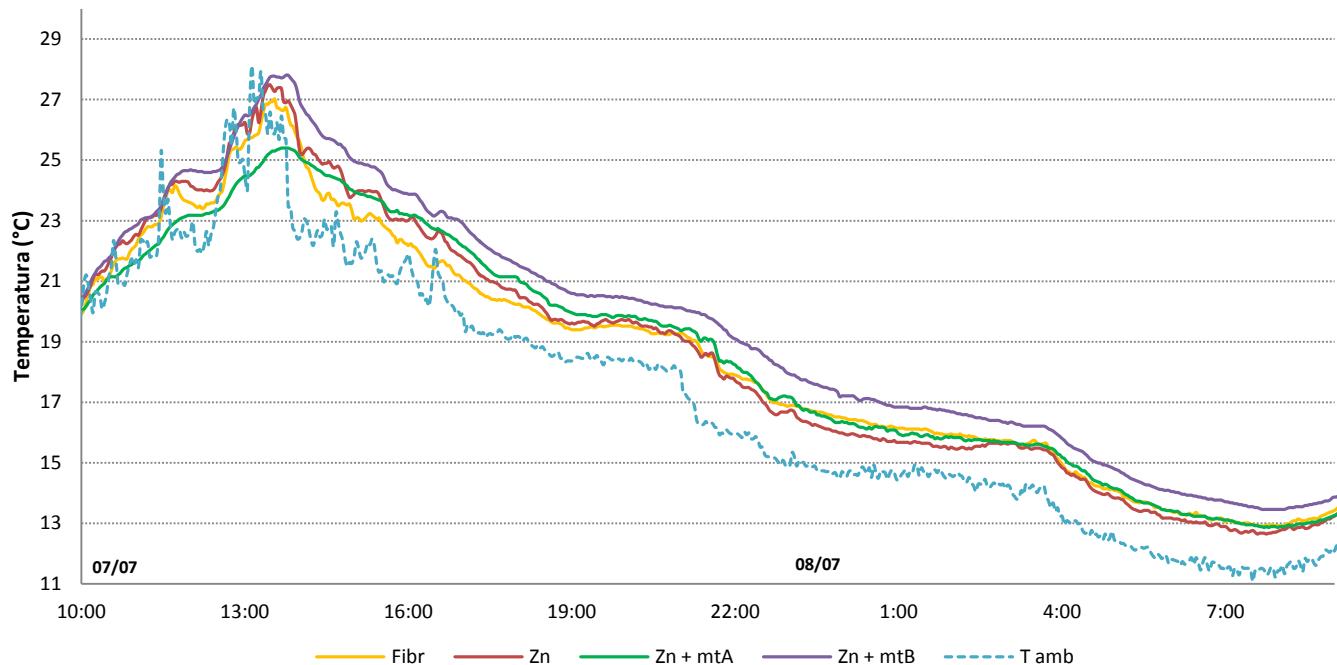


Gráfico 5: Desempenho Térmico dos forros - Estudo 2 (parte 2)

4.2.2 Dados de Temperaturas de Superfícies – Comparativos

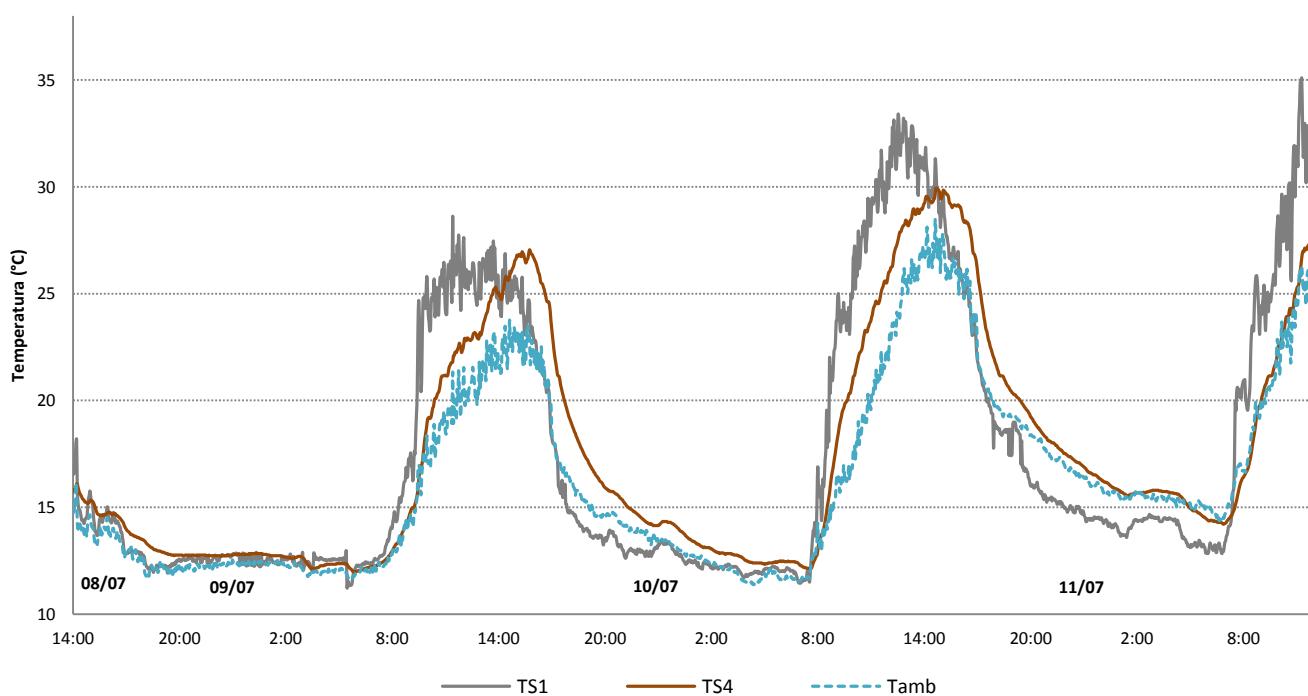
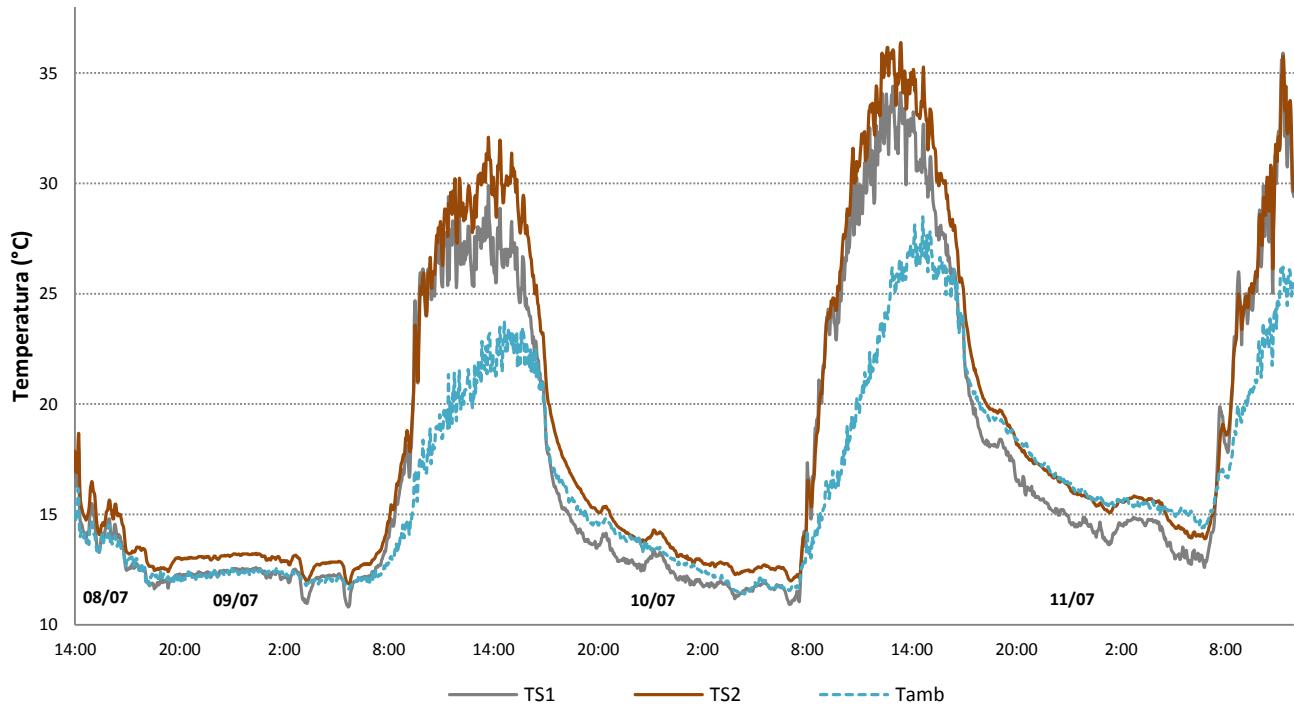
As três etapas deste experimento foram realizadas nos períodos apresentados a seguir:

Tabela 4: Duração dos experimentos de medida de temperaturas de superfícies.

Etapa	Conjuntos medidos	Período	Duração
1 ^a	2 e 3	08/07 – 14h00 à 11/07 – 11h00	69h00"
2 ^a	2 e 4	11/07 – 13h00 à 13/07 – 12h30	47h30"
3 ^a	3 e 4	13/07 – 13h00 à 18/07 – 12h00	119h00"

Abaixo os resultados obtidos:

1^a etapa:



2^a etapa:

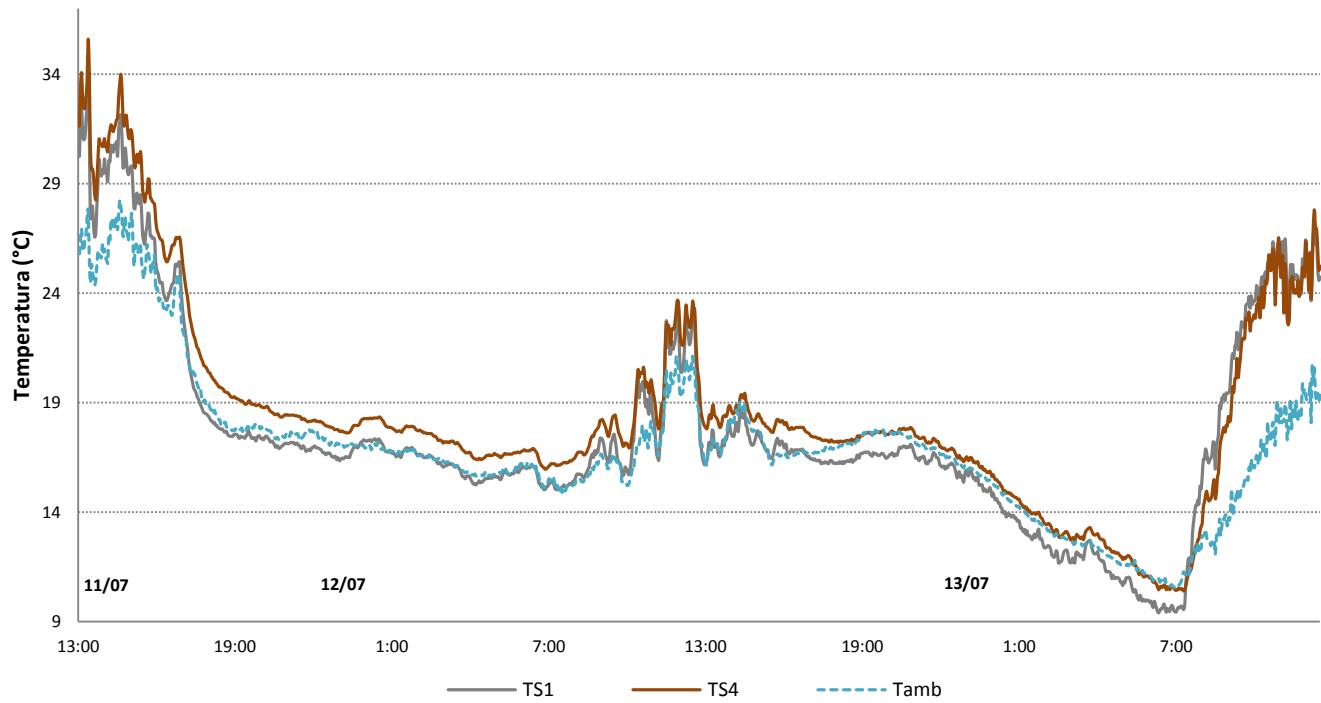


Gráfico 8: Temperaturas de superfície - conjunto 2 (Zn) - 2^a etapa

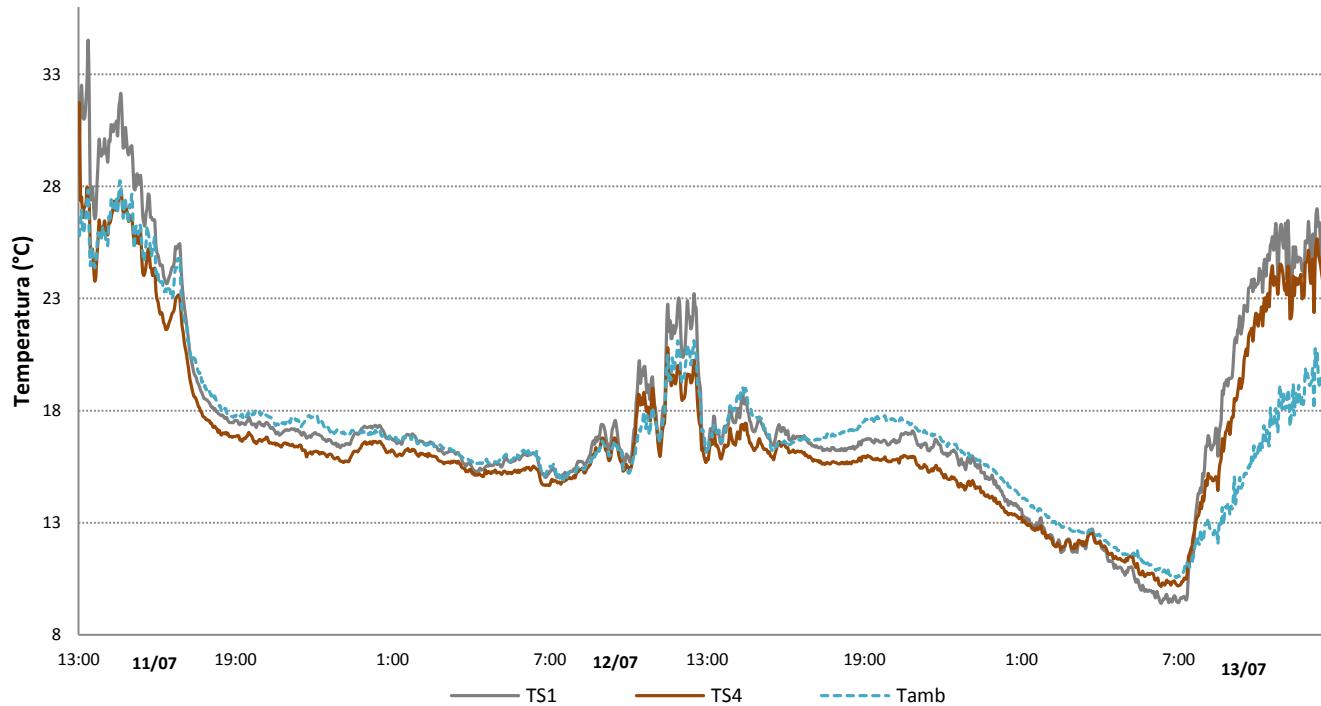


Gráfico 9: Temperaturas de superfície - conjunto 4 (Zn + mtB) - 2^a etapa

3^a etapa:

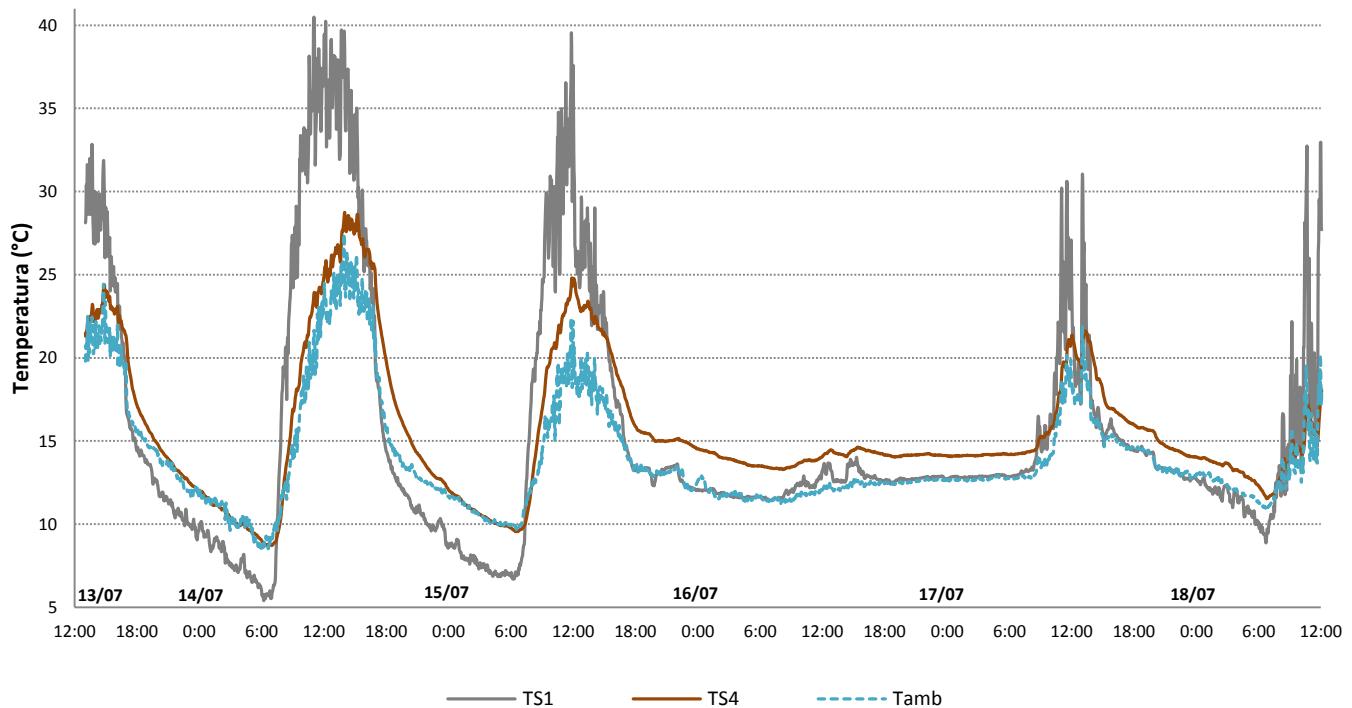


Gráfico 10: Temperaturas de superfície - conjunto 3 (Zn + mtA) - 3^a etapa

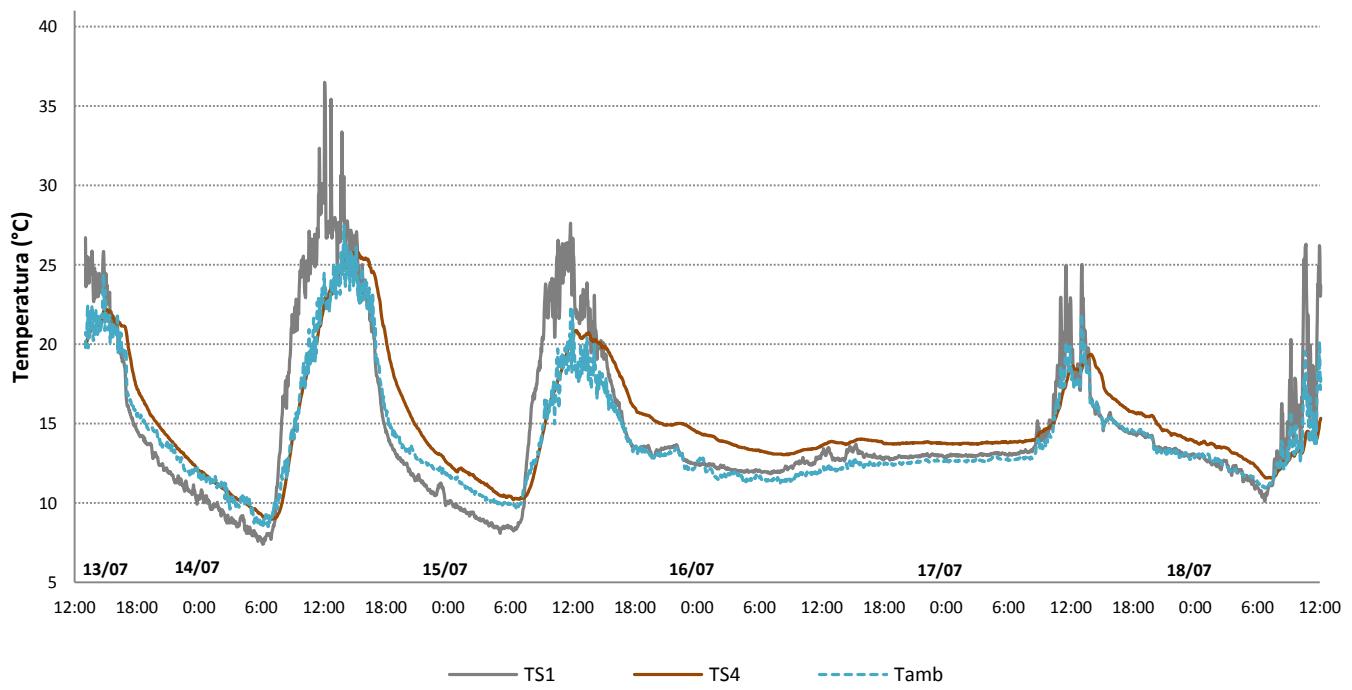


Gráfico 11: Temperaturas de superfície - conjunto 4 (Zn + mtB) - 3^a etapa

4.3 Determinação dos coeficientes globais de troca térmica

4.3.1 Dados de Temperaturas de Superfícies – Perfil das Camadas das Coberturas

Para determinar as transferências de troca térmica entre as camadas das coberturas dos conjuntos 3 e 4, foram medidas as temperaturas externas e internas das telhas e mantas envolvidas.

As duas etapas deste experimento foram realizadas nos períodos apresentados a seguir:

Tabela 5: Duração dos experimentos de medidas dos perfis de temperatura entre camadas.

Etapa	Período	Duração
Conjunto 3	18/07 – 13h00 à 21/07 – 17h00	76h00"
Conjunto 4	21/07 – 18h00 à 23/07 – 21h00	51h00"

A seguir, os perfis de temperatura obtidos:

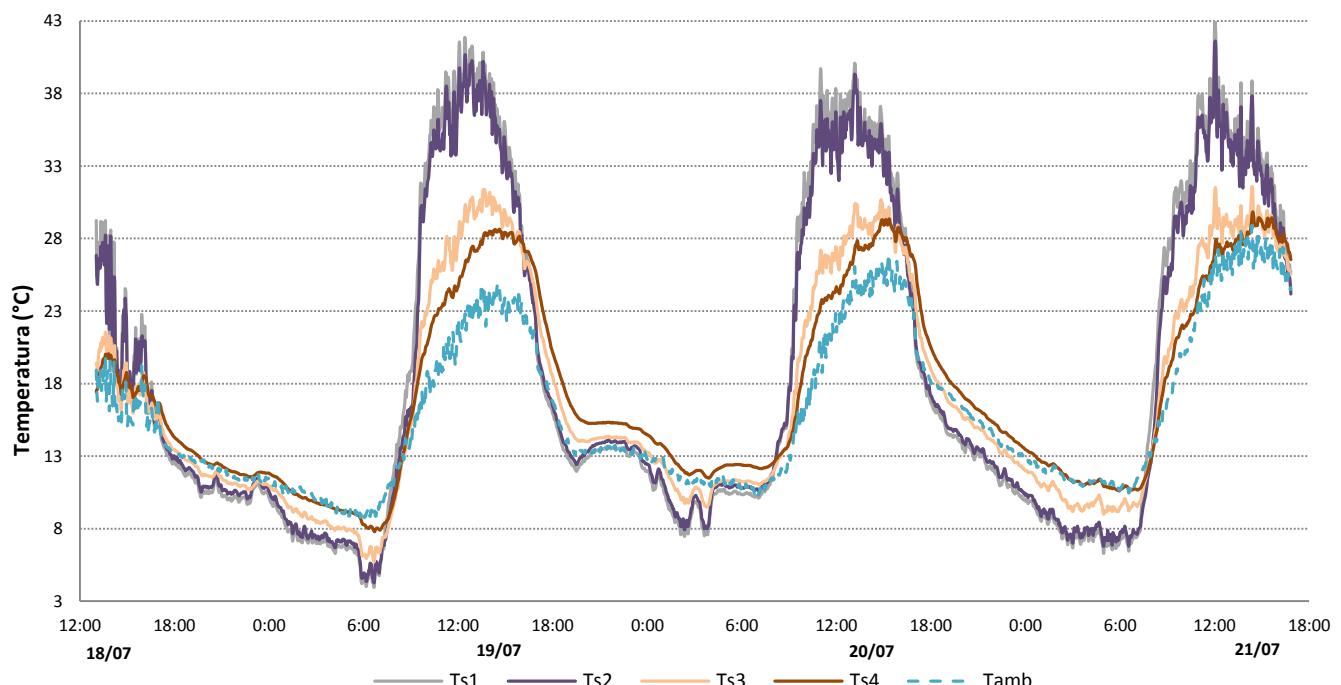


Gráfico 12: Perfil de temperaturas entre camadas - Conjunto 3.

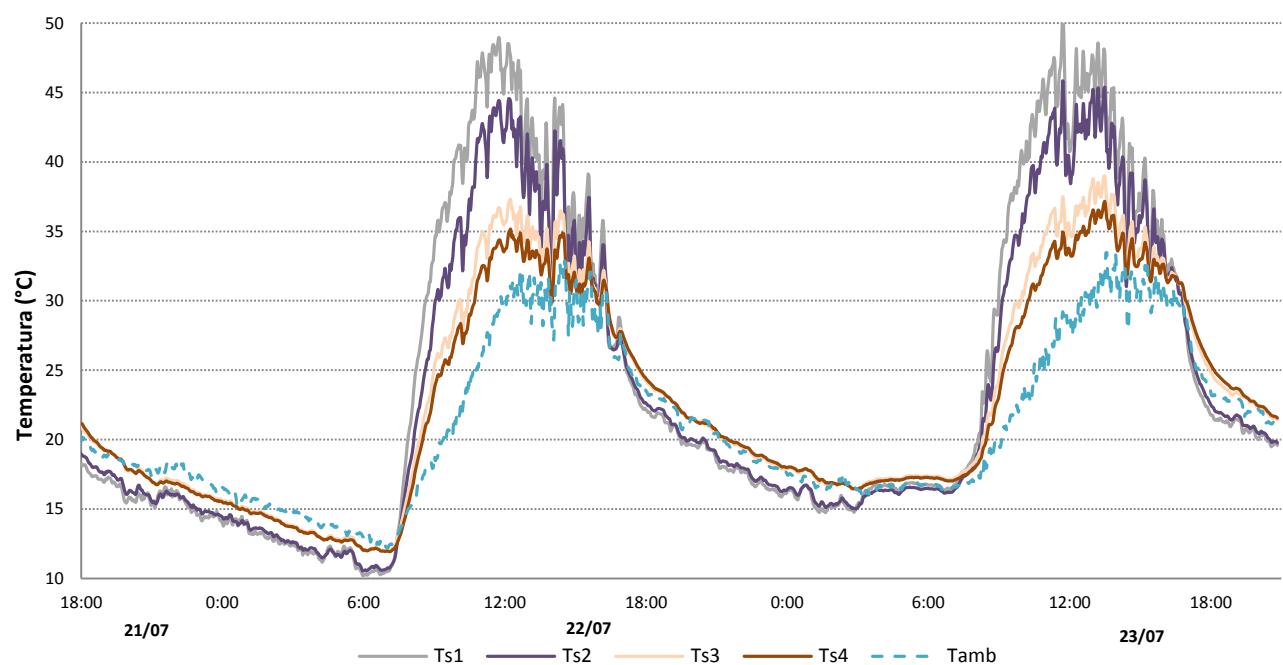


Gráfico 13: Perfil de temperaturas entre camadas - Conjunto 4.

4.3.2 Dados de Radiação Térmica

Os dados de radiação foram obtidos através de um radiômetro (modelo CMP3), como comentado, com um intervalo de cinco minutos entre as medidas. O perfil dos resultados, mostrado a seguir, é referente às medidas realizadas entre os dias 14 e 18/07. Os demais resultados utilizados no tratamento de dados estão contidos no Anexo V.

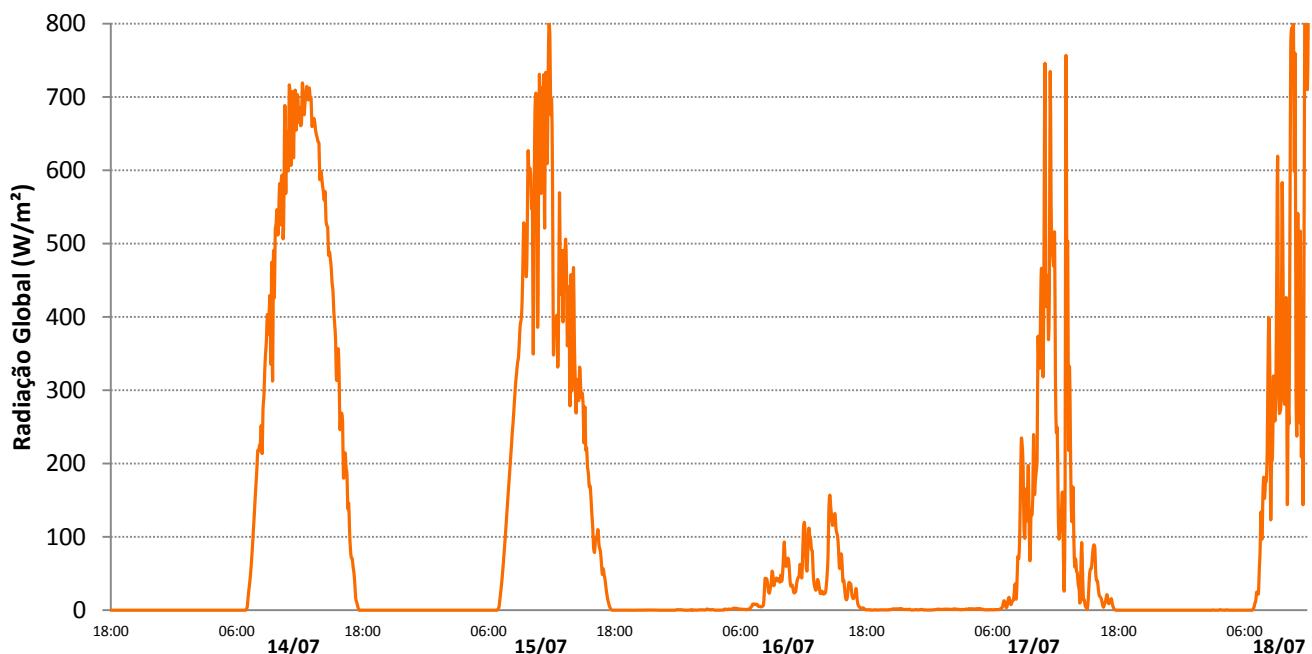


Gráfico 14: Radiação Solar Global - Cidade Universitária São Paulo - 14 a 18/07

5 Análise e Tratamento de Dados

5.1 Calibração dos Termômetros

Foram realizados dois experimentos para avaliar a calibração dos termômetros utilizados: avaliação do comportamento dos instrumentos durante 24 horas, e comparação dos mesmos com um termômetro STM de mercúrio, utilizado como referência. Os resultados são apresentados nos gráficos Gráfico 1 e Gráfico 2 (pg. 37), respectivamente.

A avaliação do comportamento dos termômetros durante 24 horas resultou em um desvio padrão médio apresentado a seguir:

$$\bar{\sigma} = \pm 0,405 \text{ } ^\circ\text{C}$$

O valor máximo de desvio apresentado foi de $1,1^\circ\text{C}$, durante o período de pico e queda brusca de temperatura ocorrida entre 12h e 13h. Uma maior variação neste momento é considerada razoável, devido à inconstância da temperatura (com variações de até 6°C) e, por consequência, maior interferência da inércia térmica dos termômetros – tempo de resposta a uma alteração térmica.

Enquanto que na comparação com o termômetro de referência, o valor do desvio padrão médio foi de:

$$\bar{\sigma} = \pm 0,432 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este valor apresentou maior constância do que o do experimento anterior devido às condições do estudo: medição de temperaturas em ambiente fechado e durante menor período de tempo. Contudo, o estudo foi suficiente para observar que as medidas de temperatura dos instrumentos possuem uma divergência sistemática apenas, e não sofrem alterações aleatórias durante período no qual não houve variação significativa da temperatura.

Para efeitos do trabalho apresentado, o desvio foi considerado nos fatores de incerteza das análises, contudo a variação foi admitida como razoável e os dados experimentais como representativos dos fenômenos estudados. Portanto, não foi realizada a manipulação dos dados obtidos.

5.2 Avaliação do desempenho térmico dos tipos de forro

5.2.1 Conforto térmico interno

O estudo de conforto interno foi realizado com as quatro miniaturas e o perfil levantado foi apresentado Gráfico 3, Gráfico 4 e Gráfico 5 (pgs. 39 e 40).

A análise de conforto térmico foi realizada estipulando-se 23°C como uma temperatura ambiente ideal em um cômodo. A definição de conforto térmico é um cálculo significativamente complexo que leva em consideração, de acordo com (FROTA e SCHIFFER, 1988) e (LAMBERTS, 2011), aspectos ambientais e aspectos do ser humano – físicos e mentais. Como aproximação, utilizamos a faixa de neutralidade térmica, faixa na qual o organismo não necessita ativar seus mecanismos reguladores de temperatura. Esta faixa varia de 22 – 25°C. Com isso, definimos o valor citado acima: 23°C. Deste modo, a cobertura utilizada na situação que apresentou a temperatura interna mais próxima do referido valor foi considerada a com melhor capacidade de manter o conforto térmico.

Com base neste conceito, as seguintes análises foram realizadas:

Conjunto 1 e 2

Pelo Gráfico 5 (pg. 40), observamos que, no momento de pico de temperatura, Os conjuntos de telha de fibrocimento e aço zinkado possuem temperaturas mais próximas à ambiente, logo a de conforto.

Esta situação não condiz com o esperado antes do experimento: ambas as miniaturas, por suposição, deveriam estar com temperaturas internas maiores do que aquelas que possuem uma camada de material isolante térmico, visto que este é o objetivo do produto.

Pela consideração acima, pode-se inferir que a paridade das condições de troca térmica entre as miniaturas não foi ideal. O fator levantado como responsável pela diferença foi a não conformidade das telhas com a redução de escala: entende-se que a ondulação de ambas as telhas possibilitou a entrada de ar ambiente, em forma de vento. Com isso, ficou possível a existência de troca de calor com o ambiente por convecção direta, além das trocas com a manta e a telha.

Considera-se que esta condição, que seria assumida como desprezível, impactou significativamente o experimento.



Figura 23: Ondulação das telhas conjunto 1 e 2, respectivamente.

Uma camada protetora de isopor foi utilizada para minimizar esta perda, contudo não foi suficiente para o isolamento total da miniatura, como se percebe nos resultados.

A hipótese de que a convecção direta com o ambiente interfere no resultado final é corroborada pela disposição dos conjuntos 3 e 4, nos quais as mantas isolam as frestas entre a miniatura e a telha, como mostra a Figura 24, deixando as medidas internas desses conjuntos mais condizentes com a proposta do estudo.



Figura 24: Disposição do forro do conjunto 4.

Os dados de temperatura de superfície interna do conjunto 2, expostos no Gráfico 6 (pg. 41), comprovam que a telha de aço zíncado, sem a utilização de manta térmica, não tem uma resposta adequada em relação ao isolamento térmico. Com base nestes dados, podemos avaliar que o conforto térmico do conjunto 2 não é satisfatório: uma cobertura composta apenas pela telha de aço zíncada não é indicada como composição ideal para isolamento térmico. Esta avaliação é de fácil entendimento e comprova as suposições iniciais do estudo. Esta cobertura foi estudada principalmente para servir de comparação na etapa seguinte: análise quantitativa - item 5.3 (pg. 56).

A análise dos dados do conjunto 1 apresentados acima, não permitiu uma conclusão satisfatória sobre a capacidade de isolamento da telha de fibrocimento. A

partir da expertise da ONG TETO, que utilizava anteriormente este tipo de telha em suas construções, e relatos das famílias para as quais as moradias de emergência foram construídas, o desempenho térmico da telha de fibrocimento não é satisfatório. No entanto, de acordo com os dados apresentados, este desempenho se mostrou melhor do que os demais conjuntos. Considerando o desvio apresentado no experimento – entrada de ar no modelo – as análises do estudo não serão adotadas como representativas.

Conjunto 3 e 4

Os desempenhos dos conjuntos 3 e 4 (definidos na pg. 17), podem ser observados a partir dos seguintes recortes do Gráfico 5 (pg. 40):

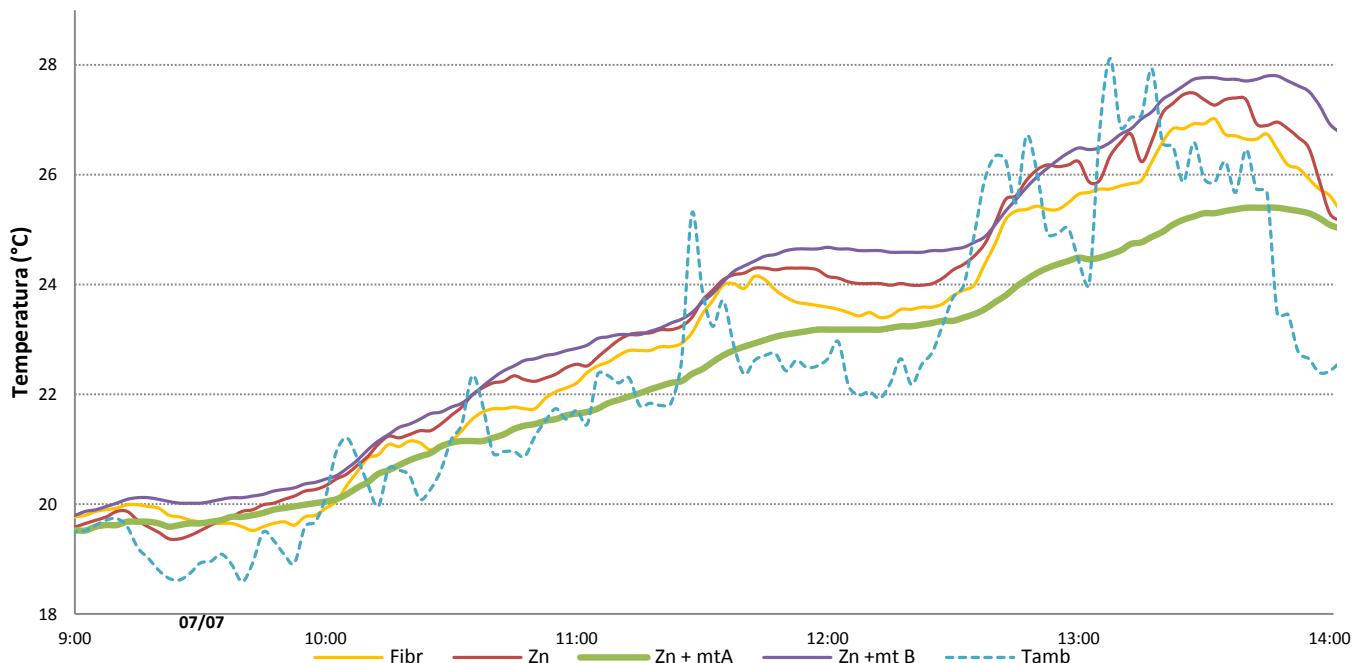


Gráfico 15: Desempenho térmico dos forros - Estudo 2 - Recorte 1

Durante o período de aumento de temperatura do dia 07/07, pode-se observar que o conjunto 3 apresenta uma variação de temperatura mais branda do que o conjunto 4: 5°C contra 8°C, aproximadamente. Com isso, a temperatura interna se manteve mais próxima do ponto de conforto estabelecido (23°C).

Esta menor variação de temperatura, para semelhantes condições do meio externo, pode ser classificada como uma melhor eficiência térmica do conjunto 3 – Manta com lâmina de alumínio e filme de polietileno com alvéolos de ar.

Vale ressaltar que esta conclusão é válida para os períodos de aumento de temperatura ambiente.

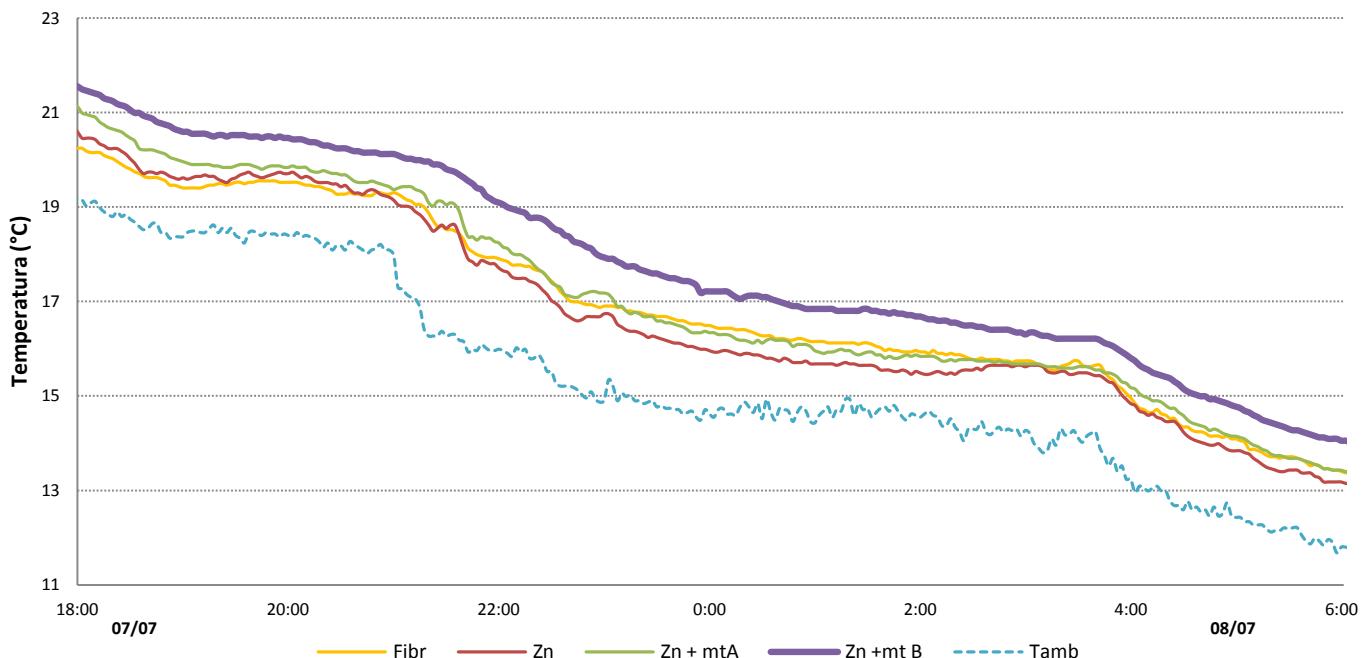


Gráfico 16: Desempenho térmico dos forros - Estudo 2 - Recorte 2

Analizando o período noturno, no qual ocorre um decréscimo da temperatura do ambiente e por consequência da temperatura interna dos modelos, a conclusão sobre eficiência térmica se inverte: o tipo de forro com o melhor desempenho térmico é aquele que melhor retém o calor dentro da casa, mantendo a temperatura interna maior do que a externa e mais perto do conforto térmico. Admite-se, nesta análise, a consideração de que as temperaturas noturnas encontram-se abaixo dos 23°C, condição observada em todos os experimentos realizados no relatório. Portanto, esta condição se mostra válida para os dados apresentados neste estudo.

Com isso em mente, percebe-se que o conjunto 4 retém nitidamente mais calor dentro da miniatura do que o conjunto com a manta A, por apresentar uma maior temperatura interna no modelo durante todo o período noturno. Tal diferença é explicada pelo fabricante da manta B: a face interna, que possui camada de alumínio e coating acrílico, é mais refletora de radiação do que o lado inverso. Por essa propriedade, o calor contido dentro da miniatura é menos absorvido pela manta, ao contrário do que ocorre durante o dia, período no qual o fluxo de calor tem sentido para dentro da casa.

Pelos dados obtidos e especificações analisadas, pode-se afirmar que o conjunto 4 tem melhor desempenho térmico quando o objetivo é reter calor, o que ocorre durante a noite, em períodos de inverno ou em países com condições climáticas médias mais frias do que o Brasil.

- As conclusões apresentadas de forma qualitativa nesta seção serão avaliadas quantitativamente no item 5.3, no qual as eficiências de transferência térmica dos conjuntos 3 e 4 serão avaliadas para os períodos de aumento e redução de temperatura.

5.2.2 Dados de Temperaturas de Superfície – Comparativos

O objetivo destes experimentos é comparar o comportamento entre as superfícies limites, externa e interna, dos conjuntos 2, 3 e 4, e com isso comparar qual o efeito das mantas térmicas no transporte de calor. Em virtude da quantidade limitada de termômetros, as medidas foram feitas comparando as miniaturas em pares. E as três etapas, descritas anteriormente, são analisadas a seguir:

1^a Etapa

Foram levantados os perfis de temperatura dos conjuntos 2 e 3, e os resultados são apresentados nos gráficos Gráfico 6 e Gráfico 7 (pg. 41).

Pela comparação entre os gráficos, é possível observar nitidamente uma maior diferença entre as temperaturas de superfície externa e interna do conjunto com manta térmica. Isto significa que, ao serem expostas uma mesma quantidade de calor, a telha de zinco transfere uma maior quantidade para dentro do modelo, fazendo com que a temperatura interna seja semelhante à da superfície externa. Por outro lado, a transferência de calor para dentro do conjunto 3 é menor, o que contribui menos para o aumento da temperatura no interior desse modelo. Com isso a diferença para a temperatura externa torna-se maior.

O fenômeno observado nestes gráficos pode ser considerado como o princípio básico do isolamento térmico.

O gráfico a seguir compara as temperaturas das superfícies internas de ambos os conjuntos:

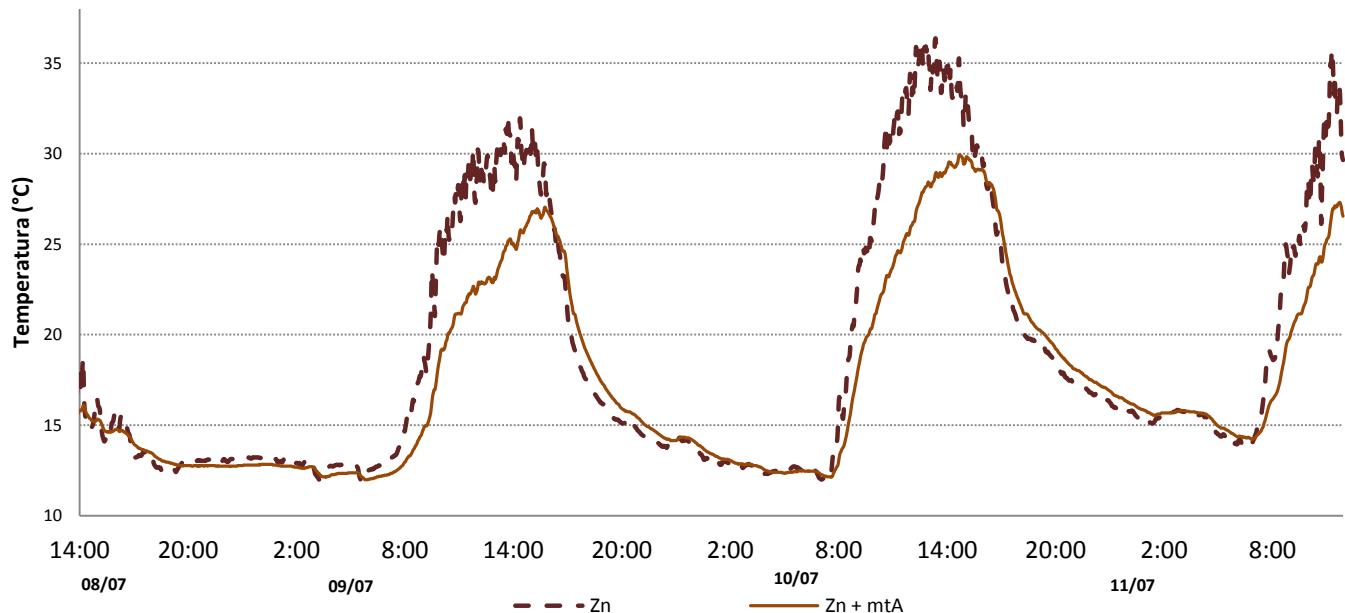


Gráfico 17: Comparativo de Temp. Interna de Superfície - conjuntos 2 e 3.

Por este, observa-se que a temperatura interna do forro do conjunto 3 é menor na comparação com o conjunto 2, nos momentos de pico de temperaturas diárias, o que mostra um melhor desempenho térmico.

Além disso, pode-se observar uma diferença no eixo temporal para um mesmo aumento de temperatura, o que também é função do coeficiente de troca térmica (k [$W/(m.K)$]), ou seja, uma igual transferência de energia leva mais tempo para ocorrer no conjunto 3 do que no 2, o que indica que o primeiro possui menor valor de k .

2^a Etapa

Esta etapa de resultados envolve os conjuntos 2 e 4, que são apresentados nos gráficos Gráfico 8 e Gráfico 9 (pg.42).

Os perfis de temperatura deste experimento mostram-se semelhantes entre si devido às chuvas que ocorreram durante os dias dos testes. Com essa condição, o impacto da radiação solar foi praticamente nulo nas miniaturas, o que reduz consideravelmente a diferença entre a ação dos dois tipos de forro estudados.

Pode-se avaliar o melhor desempenho do conjunto 4 apenas no primeiro pico de temperaturas do dia 11/07, no qual, assim como na 1^a etapa, fica visível a maior diferença de temperaturas de superfícies do que no conjunto 2.

3^a Etapa

A comparação entre os dois tipos de manta, conjuntos 3 e 4, foi apresentada nos gráficos Gráfico 10 e Gráfico 11 (pg. 43).

A partir destes resultados foi possível observar novamente a diferença entre as eficiências dos dois principais conjuntos do estudo: percebe-se que durante os picos de temperaturas diárias, o ΔT do conjunto 3 é visivelmente maior, chegando a uma diferença média de 13°C, no dia 14/07, enquanto o conjunto 4 possuía 6°C aproximadamente. Esta diferença, para uma mesma radiação solar, é considerada uma evidência de um melhor isolamento térmico promovido pela Manta térmica A.

Contudo, é importante ressaltar que esta maior diferença entre a T. superfície externa e interna não está diretamente ligada a uma menor temperatura no interior da miniatura. Pode-se notar que, nos picos diários, a temperatura da superfície externa da telha do conjunto 3 é significativamente superior à do conjunto 4. Dado que ambos estão suscetíveis às mesmas condições de meio, e mesma radiação solar, é possível afirmar que esta maior temperatura seja devida à Manta térmica A, pois esta possui a face com filme de alumínio voltada para a telha. Essa disposição aumenta consideravelmente a refletividade da manta, logo a radiação emitida pela telha de aço zinado é refletida novamente para esta, o que propicia a elevação de temperatura notada.

Pela suposição apresentada acima, observa-se que a Manta térmica A age de duas maneiras para propiciar um isolamento térmico: além de possuir uma *baixa condutibilidade térmica*, o que diminui a transferência de calor por condução, ela possui uma *alta refletividade*, o que minimiza o calor absorvido pela manta, logo o que será transferido para dentro da casa.

Enquanto que o conjunto 4 reduz o calor transferido para dentro do modelo, principalmente, por uma baixa condutibilidade térmica. Esta avaliação só é válida nos períodos de transferência de calor com o sentido do ambiente para o interior da casa, pois esta possui alta refletividade no sentido inverso, como comentado no item 5.2.1 (pg. 48)

O gráfico a seguir compara as temperaturas de superfície interna de cada conjunto:

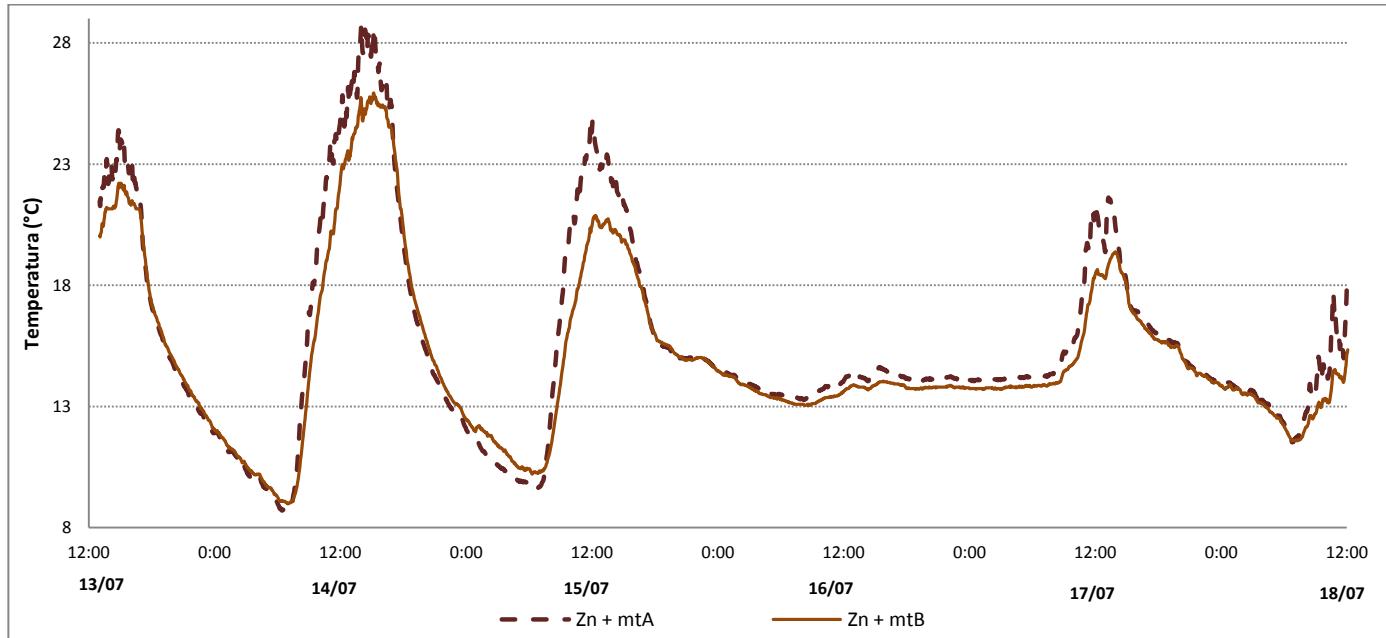


Gráfico 18: Comparativo de Temp. Interna de Superfície - conjuntos 3 e 4.

Pelos dados apresentados, observa-se que a temperatura de superfície interna do conjunto 3 é maior nos picos diários. Este fato pode ser entendido pela hipótese apresentada acima: apesar de a diferença entre as temperaturas externa e interna da cobertura do conjunto 3 ser maior, como a temperatura de sua superfície externa é mais alta, esta diferença não implica uma menor temperatura interna do modelo. A figura XX ilustra a hipótese comentada:

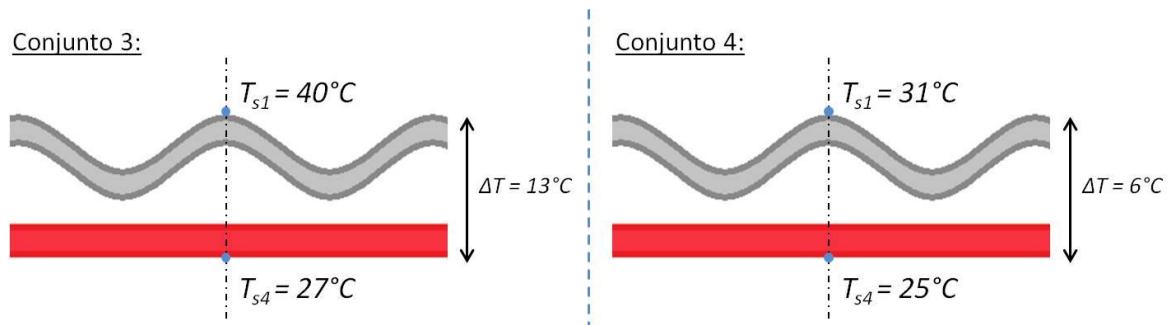


Figura 25: Comparação entre perfis de temperatura dos conjuntos 3 e 4, em pico um diário.

Ao comparar os dados do Gráfico 18 com os de temperatura interna das miniaturas (gráficos Gráfico 3, Gráfico 4 e Gráfico 5 – pg. 39), percebe-se uma inversão de temperaturas: nos picos diários, as temperaturas no interior do conjunto

3 são menores do que as do conjunto 4, enquanto suas temperaturas de superfície interna apresentam-se maiores do que as deste - Gráfico 18.

Como visto no modelamento matemático, item 3.3.3 (pg. 33), as trocas de calor que ocorrem dentro do modelo são: convecção natural (INCROPERA, DEWITT, et al., 2007) e a troca por radiação da manta com as vizinhanças – paredes, piso e ar interno. Admitindo-se condições semelhantes de convecção natural dentro dos experimentos, é possível avaliar que o fator responsável por esta inversão é radiação emitida por cada manta, logo suas respectivas emissividades.

De acordo com as propriedades informadas pelos fabricantes, a Manta térmica A possui emissividade dez vezes menor do que a Manta térmica B. Essa menor emissão de calor por radiação para dentro da miniatura, é uma hipótese plausível para explicar os fenômenos observados experimentalmente. Contudo, o número de graus de liberdade deste volume de controle (pg. 33) não nos permite quantificar a hipótese adotada: para calcular a interferência da temperatura interna de superfície da manta na temperatura do interior do conjunto, seriam necessários os seguintes dados experimentais: temperatura interna, das paredes e do piso do modelo. A obtenção de todas estas medidas necessitava de mais termômetros do que os disponíveis no estudo. Por este motivo, esta avaliação limitou-se ao caráter teórico qualitativo.

5.3 Avaliação quantitativa da eficiência térmica das diferentes coberturas

Na avaliação da eficiência térmica, foram usados os resultados experimentais de ensaio feito para os conjuntos 3 e 4 contendo as temperaturas $T_{\infty 1}$, T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} e T_{s4} , de acordo com os Gráfico 12 e Gráfico 13 (pgs. 44 e 45).

Para tanto, foi preciso o levantamento de alguns dados dos materiais utilizados a partir de fontes bibliográficas ou de medidas experimentais:

Tabela 6: Propriedades termofísicas, dos materiais envolvidos, utilizadas na análise quantitativa.

Variável	Símbolo	Valor	Unidades	Fontes
Absortividade da telha	α	0,6	-	<p>1) INCROPERA^[3] - Tabela A.12 - Chapa de metal galvanizada: $\alpha = 0,65$</p> <p>2) Texto: "Desempenho térmico de coberturas", http://www.perfilor.com.br/texto_03.php - Aço Zincado: $\alpha = 0,6$</p> <p>3) *Especificação técnica do fornecedor: $\alpha = 0,6$</p>
Emissividade da telha	ϵ_1	0,1	-	<p>1) INCROPERA^[3] - Tabela A.12 - Chapa de metal galvanizada: $\epsilon = 0,13$</p> <p>2) Metals Index - Tabela "Emissivity of Common Materials", http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivitya.html - Steel, Unoxidized : $\epsilon = 0,08$</p> <p>3) *Especificação técnica do fornecedor</p>
Coeficiente condutivo da telha	k_1	45,7	W/(m.K)	<p>1) Manual técnico de telhas, http://www.fctelhas.com.br/dados-tecnicos.aspx - Aço Zincado: $k = 39,4$ kcal/(h.m.°C)</p> <p>2) Texto: "Desempenho térmico de coberturas", www.perfilor.com.br/texto_03.php - Aço Zincado: $k = 52,0$ W/(m.K)</p>
Espessura telha	e_1	0,00043	m	*Especificação técnica do fornecedor
Espessura da camada de ar	e_2	0,017	m	*Especificação técnica do fornecedor
Espessura manta	e_3	0,003	m	*Especificação técnica do fornecedor
Área superficial da telha	A_1	0,585	m^2	Medidas experimentais
Área superficial da manta	A_2	0,540	m^2	Medidas experimentais
Comprimento da placa	L	0,9	m	Medidas experimentais

* Os fornecedores não foram citados de acordo com o item 2.1 (pg. 17)

5.3.1 Determinação dos coeficientes de condutividade térmica

Para vários pontos dos resultados experimentais, foram calculadas médias dos coeficientes k_2 (coeficiente das mantas térmicas) e k_{global} , durante o dia e durante a noite, variando-se a velocidade do vento do ambiente em 0,1 m/s, 2 m/s e 5 m/s. Como essa velocidade é um parâmetro desconhecido no experimento, mas que não pode ser desprezado, foram escolhidos valores diferentes para representar situações amenas e de turbulência; afim de analisar seu efeito nos resultados finais .

Para demonstrar a sistemática dos cálculos, foi escolhido um momento aleatório para o conjunto 3, apresentado abaixo:

Tabela 7: Dados experimentais utilizados para a exemplificação da análise quantitativa.

Dia / Horário	T_{s1} (°C)	T_{s2} (°C)	T_{s3} (°C)	T_{s4} (°C)	$T_{\infty 1}$ (°C)	G (W/m ²)
19/07/2012 12:32:30	37,65	37,43	29,34	26,49	22,18	661,55

Para determinar o calor que atravessa o sistema, utilizou-se a Eq. 7 (pg. 32):

$$\alpha \cdot G - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{s1}^4 - \bar{h}_1 \cdot (T_{s1} - T_{\infty 1}) - q''_{cond1} = 0$$

O coeficiente convectivo (\bar{h}_1) foi determinado pela Eq. An. III - 1 ou Eq. An. III - 2 (pg. 76) - respectivamente para regimes laminar e turbulento - para escoamento de fluido em placa plana.

A temperatura usada para determinação das propriedades do fluido, nesse caso o ar, é a temperatura de filme, definida pela média de T_{s1} e $T_{\infty 1}$.

As propriedades necessárias para definir o coeficiente \bar{h}_1 são Pr , μ , ρ e k , estas foram definidas no Anexo VI (pg. 84). Usando os polinômios, apresentados no mesmo anexo, encontramos os seguintes valores para as propriedades:

Tabela 8: Propriedades do ar utilizadas na análise quantitativas.

T_f (K)	Pr	μ (N.s/m ²)	ρ (kg/m ³)	k (W/(m.K))
302,92	0,762	$1,861 \cdot 10^{-5}$	1,148	0,0265

A velocidade escolhida será $u_{\infty} = 2$ m/s. Logo, calcula o número de Reynolds para determinar se o regime é laminar ou turbulento, sabendo-se que o Reynolds crítico é $Re_{x,c} = 5 \cdot 10^5$.

$$Re_L = \frac{\rho \cdot u_{\infty} \cdot L}{\mu} = \frac{1,148 \cdot 2 \cdot 0,9}{1,861 \cdot 10^{-5}} = 1,11 \cdot 10^5$$

Dessa forma, o regime é laminar, pois $Re_L < Re_{x,c}$, então usa-se a Eq. An. III - 1 (pg. 76) para determinação do coeficiente convectivo:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_L \cdot L}{k} = 0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad [Pr \geq 0,6]$$

$$\frac{\overline{h}_1 \cdot 0,9}{0,0265} = 0,664 \cdot (1,11 \cdot 10^5)^{1/2} \cdot 0,762^{1/3}$$

$$\overline{h}_1 = 5,945 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Com todas essas informações, o primeiro passo foi usar a Eq. 7, para determinar o calor que atravessa o sistema:

$$\alpha \cdot G - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{s1}^4 - \overline{h}_1 \cdot (T_{s1} - T_{\infty 1}) - q''_{cond1} = 0$$

$$0,6 \cdot 661,55 - 0,1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (273,00 + 37,65)^4 - 5,945 \cdot (37,65 - 22,18) - q''_{cond1} = 0$$

$$q''_{cond1} = 252,16 \frac{W}{m^2}$$

O próximo passo foi calcular o coeficiente de condutividade k_2 através da Eq. 8 (pg. 32):

$$q''_{cond1} \cdot A_1 \cdot -k_2 \cdot A_2 \cdot \frac{(T_{s3} - T_{s4})}{e_3} = 0$$

$$252,16 \cdot 0,585 \cdot -k_2 \cdot 0,540 \cdot \frac{(29,34 - 26,49)}{0,003} = 0$$

$$k_2 = 0,287 \frac{W}{m \cdot K}$$

Da hipótese de regime permanente, sabemos que o calor que atravessa o sistema é igual em todas as camadas e pela definição de q''_{global} , item 3.3.4 (pg. 33), temos:

$$q''_{global} \cdot A_{efet} = q''_{cond1} \cdot A_1$$

Onde,

$$q''_{global} = k_{global} \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s4})}{e_1 + e_2 + e_3}$$

Logo,

$$q''_{global} = \frac{252,16 \cdot 0,585}{0,5625} = 262,25 \text{ W/m}^2$$

$$262,25 = k_{global} \cdot \frac{(37,65 - 26,49)}{0,00043 + 0,017 + 0,003}$$

$$k_{global} = 0,444 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$$

A sequência de cálculos apresentada acima foi efetuada para uma série de pontos experimentais, durante o dia e a noite, e para diferentes velocidades do ar atmosférico. Com isso, calculou-se uma média para os coeficientes obtidos nos diferentes cenários. As tabelas a seguir apresentam os valores encontrados e seus respectivos desvios padrão:

Tabela 9: Coeficientes de condutividade experimentais do Conjunto 3 - período: DIA

Intervalos*	u_{∞} (m/s)	k_{global} W/(m/K)	Desvio padrão	k_2 W/(m/K)	Desvio padrão
19/07/2012 10:25 - 13:45	0,1	0,547	0,086	0,417	0,093
	2	0,434	0,088	0,332	0,088
20/07/2012 10:12 - 13:30	5	0,349	0,090	0,267	0,086
	Média	0,443	0,120	0,339	0,108

*Total de ponto utilizados nos cálculos: 175

Tabela 10: Coeficientes de condutividade experimentais do Conjunto 3 - período: Noite

Intervalos*	u_{∞} (m/s)	k_{global} W/(m/K)	Desvio padrão	k_2 W/(m/K)	Desvio padrão
18/07/2012 17:50 - 22:15	0,1	0,361	0,048	0,131	0,014
	2	0,295	0,059	0,107	0,017
19/07/2012 00:05 - 00:52	5	0,245	0,068	0,088	0,021
	Média	0,300	0,075	0,109	0,025

*Total de ponto utilizados nos cálculos: 114

Tabela 11: Coeficientes de condutividade experimentais do Conjunto 4 - período: DIA

Intervalos*	u_{∞} (m/s)	k_{global} W/(m/K)	Desvio padrão	k_2 W/(m/K)	Desvio padrão
22/07/2012 12:15 - 14:25	0,1	0,590	0,138	0,047	0,011
	2	0,481	0,141	0,038	0,010
	5	0,400	0,143	0,031	0,010
23/07/2012 12:30 - 14:10	Média	0,490	0,160	0,039	0,012

*Total de ponto utilizados nos cálculos: 63

Tabela 12: Coeficientes de condutividade experimentais do Conjunto 4 - período: NOITE

Intervalos*	u_{∞} (m/s)	k_{global} W/(m/K)	Desvio padrão	k_2 W/(m/K)	Desvio padrão
21/07/2012 17:57 - 20:10	0,1	0,283	0,027	0,083	0,063
	2	0,213	0,028	0,064	0,045
	5	0,169	0,032	0,050	0,033
23/07/2012 01:07 - 01:37	Média	0,222	0,055	0,066	0,050

*Total de ponto utilizados nos cálculos: 71

5.3.2 Cálculo da eficiência térmica

Para o cálculo da eficiência térmica das diferentes coberturas, foram criados um cenário para o período diurno e um para o noturno, nos quais definiu-se as temperaturas ambiente, temperatura interna da manta e radiação solar, respectivamente, $T_{\infty 1}$, T_{s4} e G . A temperatura T_{s4} foi estipulada como sendo 25°C, pois simula a condição de conforto térmico dentro da casa, ou seja, uma temperatura interna $T_{\infty 3} \approx 23^{\circ}\text{C}$. Para a simulação do período diurno, foi considerado radiação solar $G = 700 \text{ W/m}^2$, valor coerente com os dados experimentais obtidos nos picos de temperatura diárias, e temperatura ambiente $T_{\infty 1} = 24^{\circ}\text{C}$, sendo esta uma média amostral dos mesmos intervalos (entre 11 e 14 horas). Para a simulação do período noturno, foi considerado radiação solar $G = 0 \text{ W/m}^2$ e temperatura ambiente $T_{\infty 1} = 20^{\circ}\text{C}$, definindo assim uma condição de menor temperatura externa.

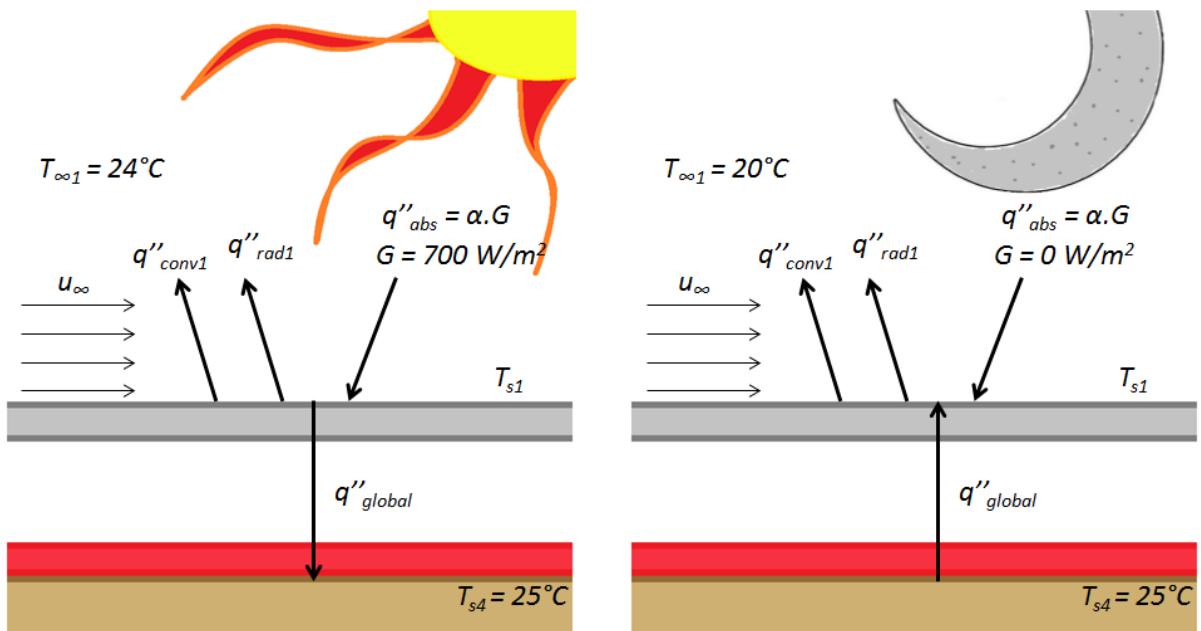


Figura 26: Cenários de avaliação da eficiência térmica.

Para a exemplificação da sistemática de cálculos, foi escolhido um cenário noturno, velocidade de escoamento do ar $u_{\infty} = 5 \text{ m/s}$ e as propriedades encontradas para o conjunto 4.

a) Determinação do perfil de temperaturas da simulação

Primeiramente, determinou-se a temperatura externa da telha T_{s1} pela Eq. 13 (pg. 35) e pela definição de q''_{global} , item 3.3.4 (pg. 33):

$$\alpha \cdot G - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{s1}^4 - \bar{h}_1 \cdot (T_{s1} - T_{\infty 1}) - q''_{global} \cdot \frac{A_{efet}}{A_1} = 0$$

$$\alpha \cdot G - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{s1}^4 - \bar{h}_1 \cdot (T_{s1} - T_{\infty 1}) - k_{global} \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s4})}{e_1 + e_2 + e_3} \cdot \frac{A_{efet}}{A_1} = 0$$

Para os coeficientes de condutividade k_{global} e k_2 foram usados os valores encontrados no item 5.3.1. A equação resultante do primeiro passo nesse exemplo fica:

$$0,6 \cdot 0 - 0,1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (273,00 + T_{s1})^4 - \bar{h}_1 \cdot (T_{s1} - 20,00) - 0,169 \cdot \frac{(T_{s1} - 25,00)}{0,00043 + 0,017 + 0,003} \cdot \frac{0,5625}{0,585} = 0$$

Para a determinação do coeficiente convectivo \bar{h}_1 , foi usado o mesmo raciocínio do item 5.3.1 (pg. 58). Sendo que, nesta etapa, o processo de determinação das temperaturas de superfície é iterativo, ou seja, a temperatura de filme T_f , que

determina as propriedades do ar e assim, o coeficiente \bar{h}_1 , depende da temperatura T_{s1} e esta, por sua vez, depende do coeficiente \bar{h}_1 de acordo com a Eq. 13 (pg. 35).

Por esse motivo, estima-se um valor inicial de T_{s1} , e a partir desse inicia-se o processo iterativo até a convergência ser atingida.

Dessa maneira, os valores encontrados foram:

Tabela 13: Resultados dos parâmetros a partir do processo iterativo.

T_{s1} (°C)	T_f (K)	Re_L	Regime	Pr	μ (N.s/m ²)	ρ (kg/m ³)	k (W/(m.K))	\bar{h}_1 (W/(m ² .K))
20,22	293,11	$2,95 \cdot 10^{-5}$	Laminar	0,759	$1,813 \cdot 10^{-5}$	1,189	0,0257	9,39

Calculou-se a temperaturas T_{s2} e T_{s3} , respectivamente pelas Equações Eq. 7 e Eq. 8 (pg. 32)

$$\alpha \cdot G - \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_{s1}^4 - \bar{h}_1 \cdot (T_{s1} - T_{\infty 1}) - k_1 \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{e_1} = 0$$

$$0,6 \cdot 0 - 0,1 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (273,00 + 20,22)^4 - 9,39 \cdot (20,22 - 20,00) - 45,7 \cdot \frac{(20,22 - T_{s2})}{0,00043} = 0$$

$$T_{s2} = 20,22 \text{ °C}$$

Obs: A diferença entre T_{s2} e T_{s1} é de $4 \cdot 10^{-4}$ °C.

$$k_1 \cdot A_1 \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{e_1} - k_2 \cdot A_2 \cdot \frac{(T_{s3} - T_{s4})}{e_3} = 0$$

$$45,7 \cdot 0,585 \cdot \frac{(-4 \cdot 10^{-4})}{0,00043} - 0,0496 \cdot 0,540 \cdot \frac{(T_{s3} - 25,00)}{0,00021} = 0$$

$$T_{s3} = 24,80 \text{ °C}$$

b) Comportamento da camada de ar entre telha e manta

Também foi observado o comportamento da camada de ar entre a telha e a manta, pelo cálculo do coeficiente efetivo de convecção definido no item 3.3.4 (pg. 33) pela Eq. 10 (pg. 34).

$$\bar{h}_{efet2} \cdot (T_{s2} - T_{s3}) - k_2 \cdot \frac{(T_{s3} - T_{s4})}{e_3} = 0$$

$$\bar{h}_{efet2} \cdot (20,22 - 24,80) - 0,0496 \cdot \frac{(24,80 - 25,00)}{0,00021} = 0$$

$$\bar{h}_{efet2} = 10,40 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

c) Eficiência térmica das diferentes coberturas

O cálculo de eficiência térmica foi feito considerando o conjunto 2, telha de aço zinçada como referência de pior eficiência de isolamento térmico. O perfil de temperatura dos três conjuntos analisados, 2, 3 e 4, foi calculado pelo processo apresentado no item 5.3.2 - a) (pg. 62), para as seguintes velocidades de ar atmosférico: 0,1m/s, 2 m/s e 5m/s. Dessa maneira, determinou-se o calor que atravessou cada sistema na simulação pela definição de q''_{global} no item 3.3.4 (pg. 33):

$$Q_{global} = q''_{global} \cdot A_{efet} = q''_{cond1} \cdot A_1$$

Onde,

Q_{global} : calor efetivo que atravessa o sistema.

Assim, a eficiência de cada conjunto foi definida pela seguinte expressão:

$$\eta = 100 \cdot \frac{Q_{global}^{ref} - Q_{global}}{Q_{global}^{ref}} \quad \text{Eq. 14}$$

Onde,

Q_{global}^{ref} : calor efetivo que atravessa o sistema de referência.

Com isso, para as condições estabelecidas, teremos:

$$Q_{global} = q''_{global} \cdot A_{efet} = k_{global} \cdot \frac{(T_{s1} - T_{s4})}{e_1 + e_2 + e_3} \cdot A_{efet} = 0,169 \cdot \frac{(20,22 - 25,00)}{0,00043 + 0,017 + 0,00021} \cdot 0,5625$$

$$Q_{global} = -25,72 \text{ W}$$

Nota-se que o valor de Q_{global} é negativo. O que significa que o fluxo de calor, durante a noite, ocorreu acontecendo de T_{s4} para T_{s1} , ou seja, de dentro para fora do

modelo. Da mesma forma, foi calculado o Q_{global}^{ref} (do conjunto 2, telha de aço zincada):

$$Q_{global}^{ref} = -78,67 \text{ W}$$

Com essas informações, é possível calcular a eficiência do conjunto 4 em relação ao conjunto 2 pela Eq. 14:

$$\eta = 100 \cdot \frac{Q_{global}^{ref} - Q_{global}}{Q_{global}^{ref}} = \frac{100 \cdot (-78,67 + 25,72)}{-78,67}$$

$$\eta = 67,3\%$$

d) Resultados finais

Dessa maneira, obteve-se os seguintes resultados para os conjuntos 3 e 4, simulados com a média dos valores achados de k_{global} e k_2 no item 5.3.1 (pg. 58):

Tabela 14: Valores referenciais de transferência de calor global nos períodos diurno e noturno.

u_{∞} (m/s)	DIA		NOITE	
	Q_{global}^{ref} (W)	T_{s1} (°C)	Q_{global}^{ref} (W)	T_{s1} (°C)
0,1	320,8	25,00	-44,1	25,00
2	316,9	25,00	-63,9	25,00
5	313,9	25,00	-78,7	25,00
Média	317,2	25,00	-62,2	25,00

Obs: diferenças nos valores de T_{s1} são da ordem de 10^{-4} .

Tabela 15: Valores de transferência de calor global nos períodos diurno e noturno - conjunto 3

u_{∞} (m/s)	DIA			NOITE		
	$Q_{global}^{conj\ 3}$ (W)	T_{s1} (°C)	\bar{h}_{efet2} (W/m ² .K)	$Q_{global}^{conj\ 3}$ (W)	T_{s1} (°C)	\bar{h}_{efet2} (W/m ² .K)
0,1	203,2	38,49	34,9	-27,0	22,28	31,8
2	163,4	38,68	27,7	-29,6	21,35	26,1
5	132,8	38,83	22,2	-28,8	20,74	21,7
Média	164,2	38,46	28,3	-29,8	21,40	26,5

Tabela 16: Valores de transferência de calor global nos períodos diurno e noturno - conjunto 4

u_{∞} (m/s)	DIA			NOITE		
	$Q_{global}^{conj\ 4}$ (W)	T_{s1} (°C)	\bar{h}_{efet2} (W/m ² .K)	$Q_{global}^{conj\ 4}$ (W)	T_{s1} (°C)	\bar{h}_{efet2} (W/m ² .K)
0,1	206,2	35,96	41,3	-26,7	22,04	17,5
2	172,7	36,26	33,7	-27,9	20,90	13,1
5	146,5	36,50	28,0	-25,7	20,22	10,4
Média	173,4	36,09	34,3	-28,3	21,00	13,7

Com esses dados, obtiveram-se os valores de eficiência térmica comparativos listados a seguir:

Tabela 17: Valores de eficiência térmica comparativos.

u_{∞} (m/s)	DIA			NOITE		
	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4
0,1	0,0%	36,7%	35,7%	0,0%	38,7%	39,4%
2	0,0%	48,4%	45,5%	0,0%	53,6%	56,4%
5	0,0%	57,7%	53,3%	0,0%	63,4%	67,3%
Média	0,0%	48,2%	45,3%	0,0%	52,1%	54,6%

e) Análise e considerações finais

Os resultados de eficiência térmica comparativos mostram que, durante o período diurno, o conjunto 3 é mais eficiente que o conjunto 4, ou seja, a manta térmica A apresenta maior eficiência de isolamento do que a manta B. Contudo, no período noturno, a manta B mostra-se mais eficiente que a manta A, corroborando a análise qualitativa do item 5.2.1 (pg. 48).

Para analisar assertivamente as razões para o comportamento invertido entre os períodos diurnos e noturnos dos conjuntos estudados, deve-se aprofundar um estudo do comportamento da camada intermediária de ar, que é regido pela convecção natural. Um indício disso pode ser observado pelos valores de \bar{h}_{efet2} listados no 5.3.2 - d) (pg. 65) nos diferentes períodos para um mesmo conjunto.

Outro fator importante, que deve ser considerado nos resultados são os diferentes valores de emissividade tanto entre as mantas, quanto entre as faces das mesmas. De acordo com as especificações de cada fornecedor, a face metálica da manta A é posta voltada para cima, enquanto que a da manta B é voltada para baixa. Isto significa que o conjunto 3 reflete mais o calor recebido pela telha por radiação para a mesma, enquanto que a manta B reflete maiores quantidades de calor para dentro da casa, o que já foi comentado no 5.2.2 (pg. 52).

Deve-se levar em consideração, que os valores encontrados de eficiência térmica são comparativos: dependem da referência escolhida e do cenário estabelecido. As variações destas condições alteraram os valores de eficiência encontrados, dentro de uma margem de desvio. Vale ressaltar, que estas alterações não interferem na conclusão sobre o material mais eficiente em cada período.

6 Conclusão

O objetivo do trabalho apresentado – avaliação da eficiência térmica de diferentes tipos de coberturas a partir de modelos reduzidos de casas de emergência construídas pela ONG TETO – foi cumprido de forma satisfatória, possibilitando uma análise qualitativa e quantitativa dos fenômenos de transferência térmica que ocorrem através da interação de suas coberturas com o ambiente. É feita uma ressalva para o conjunto cuja cobertura foi composta por telha de fibrocimento: a diminuição de escala do modelo, em comparação com a casa real, sem uma alteração no tamanho de onda da telha utilizada foi fator crítico na interferência da paridade de condições experimentais entre os conjuntos e no isolamento interno da miniatura em questão.

É importante enfatizar que as análises realizadas neste estudo são parciais com relação a uma avaliação de conforto térmico em ambiente fechado, visto que este é um conceito complexo e subjetivo – depende não só de fatores físicos da estrutura como de variáveis físicas e psicológicas referentes aos indivíduos que se encontram na edificação estudada. Dentro deste cenário, a proposta levantada de avaliar comparativamente a interferência das trocas energéticas através da cobertura da residência foi atingida com sucesso.

Nesse projeto, foram encontrados, para os períodos diurno e noturno, os seguintes coeficientes de condutividade global:

Tabela 18: Resultados de coeficiente global para os conjuntos 3 e 4.

Conjunto	DIA		NOITE	
	k_{global} W/(m/K)	Desvio padrão	k_{global} W/(m/K)	Desvio padrão
3	0,445	0,120	0,300	0,075
4	0,490	0,160	0,222	0,055

O menor valor de coeficiente global diurno do conjunto 3, apesar da diferença estar dentro do desvio padrão, é um primeiro indício de que este é um melhor isolante durante o dia. No período noturno, os valores dos coeficientes globais indicam inicialmente uma melhor eficiência do conjunto 4. Pelo método utilizado, tendo o conjunto 2 (telha de aço zinchada) como referência, encontrou-se uma eficiência térmica média de 48,2% para o conjunto 3 e de 45,3% para

o conjunto 4 para o dia, confirmando que a manta A é mais eficiente em relação a manta B nesta etapa, enquanto que no período noturno foram encontradas eficiências térmicas de 52,1% para o conjunto 3 e de 54,6% para o conjunto 4, o que indica uma melhor eficiência da manta B ao longo do decréscimo da temperatura a noite.

Pelos pontos considerados ao longo deste relatório, pode-se concluir que a cobertura indicada, dentre as estudadas, para revestir as casas de emergência construídas pela ONG é a que se consiste de telha de aço zinkado e manta térmica composta por lâmina de alumínio, camadas de filme de polietileno com alvéolos de ar extrudados. Essa opção, referente ao conjunto 3 deste relatório, foi considerada a mais indicada por apresentar, comparativamente, melhor eficiência térmica como isolante em períodos de transferência de energia direcionada para dentro da residência, visto que esta é a principal situação das regiões brasileiras aonde a ONG atua: o principal problema térmico das famílias moradoras de casas de emergência é o calor.

Foram levantados os seguintes pontos de melhoria para este trabalho:

✓ ***Análise econômica dos materiais:***

A variável econômica deve ser levada em consideração em qualquer projeto cujo objetivo é sair do âmbito estritamente acadêmico. Para isso, a participação de fornecedores e demais variáveis de mercado são necessárias.

✓ ***Avaliação da propagação de erros:***

Uma avaliação minuciosa dos erros embutidos no experimento, tanto de medidas experimentais quanto de hipóteses simplificadoras, elevaria a qualidade do estudo, possibilitando a determinação criteriosa do impacto de cada variável nos resultados finais.

✓ ***Determinação de escala de modelo mais adequada:***

Projetar um modelo, visando uma melhor paridade nas condições do experimento, no qual a cobertura composta por telha de fibrocimento possa ser avaliada comparativamente com as demais opções. As possibilidades são: aumento da escala dos modelos ou método de isolamento entre os vãos da cobertura e as paredes da miniatura.

7 Bibliografia

- [1]BYNUM JR., R. T. **Insulation Handbook**. [S.I.]: The McGraw-Hill Companies, 2001.
- [2]FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Nobel, 1988.
- [3]INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [4]LAMBERTS, R. **Desempenho Térmico de Edificações - Aula 2: Conforto Térmico**. UFSC. Florianópolis - SC. 2011.
- [5]PAIVA, J. L.; GUT, J. W. **Notas de Aula - PQI-2302 - Fenômenos de Transporte II**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. [S.I.]. 2010.
- [6]PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. **Investigation of green roof thermal performance in temperature climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil**, Florianópolis, Março 2011.
- [7]PEREIRA DA SILVA, W. et al. **Medida de Calor Específico e Lei de Resfriamento de Newton: Um Refinamento na Análise dos Dados Experimentais**. Revista Brasileira de Ensino de Física, p. Vol. 25, 2003.
- [8]TETO, T. Sobre a ONG: TETO - Brasil. **Site do TETO - Brasil**, 2012. Disponível em: <<http://www.teto.org.br/brasil/>>. Acesso em: 09 Julho 2012.

Anexo I: Equação de Conservação de Energia Térmica

Foram usadas as notas de aula da matéria PQI-2302^[5], Fenômenos de Transporte II, ministrada pelos professores Jorge Gut e José Luis de Paiva, para a dedução da Equação de Conservação de Energia Térmica.

a) Equação Geral de Conservação

Em um volume de controle fixo e fechado, temos o seguinte balanço generalizado para uma propriedade qualquer $\Phi = m \cdot \varphi$, onde m é a massa considerada:

$$\text{Acúmulo} = \text{Entra} - \text{Sai} + \text{Gera}$$

Do seu desenvolvimento, obtém-se:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \varphi)}{\partial t} = -[\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \varphi + \vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_\Phi)] + \dot{\sigma}_{V_\Phi} \quad \text{Eq. 15: An. I - 1}$$

Onde,

$\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \varphi$: termo proveniente do escoamento dentro do volume de controle.

$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_\Phi)$: termo proveniente da difusão dentro do volume de controle.

$\vec{\nabla} \varphi$: gradiente da propriedade φ . Definido por $\vec{\nabla} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \hat{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \hat{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \hat{k}$

$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_\Phi$: divergente da propriedade φ . Definido por $\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_\Phi = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_z}{\partial z}$

b) Conservação de Energia Térmica

A energia dentro de um volume de controle fixo e fechado é composta da entalpia, energia cinética e energia potencial:

$$\Phi = E = H + E_c + E_p$$

Porém, as energias cinética e potencial são consideradas desprezíveis frente à entalpia:

$$\Phi \approx H = m \cdot c_p \cdot T$$

$$\varphi = c_p \cdot T$$

Da *Lei de Fourier*, temos:

$$\vec{J}_\Phi = \vec{q}'' = -k \cdot \vec{\nabla} T$$

Logo, desenvolvendo a Eq. 15: An. I -1, obtemos o seguinte:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -[+\rho \cdot c_p \cdot \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T + \vec{\nabla} \cdot (-k \cdot \vec{\nabla} T)] + \dot{q}_v$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T - \alpha \cdot \nabla^2 T - \frac{\dot{q}_v}{\rho \cdot c_p} = 0$$

Eq. 16: An. I - 2

Onde,

α : difusividade térmica. Definido por $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$

c_p : calor específico do fluido.

ρ : densidade do fluido.

k : coeficiente de condução do fluido.

Anexo II: Transferência de Calor Unidimensional em Meio Sólido

Para condução térmica em meio sólido, a taxa de transferência de calor é definida pela *Lei de Fourier*:

$$\vec{q}'' = -k \cdot \vec{\nabla}T$$

Considerando-se uma condução unidimensional, no eixo x, temos:

$$q''_{cond\ x} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

Eq. 17: An. II - 1

O volume de controle hipotético está representado a seguir:

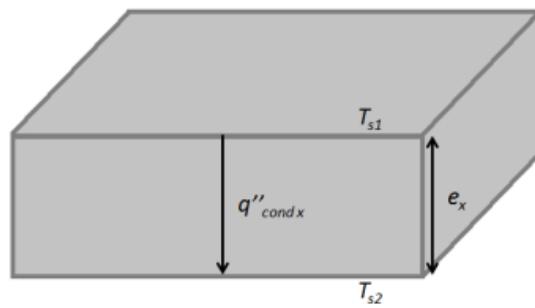


Figura 27: Volume de controle representativo da condução.

Da Eq. An. I - 2 (pg. 72) de Conservação de Energia Térmica, deduzida no Anexo I, temos:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}T - \alpha \cdot \nabla^2 T - \frac{\dot{q}_V}{\rho \cdot c_p} = 0$$

Por hipóteses de regime estacionário, não há geração de energia:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \text{ e } \dot{q}_V = 0$$

Para materiais sólidos, onde não há escoamento de material:

$$\vec{v} = 0$$

Logo, obtém-se:

$$\nabla^2 T = 0$$

Desenvolvendo-se o resultado,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0$$

Dessa forma,

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = C_1$$

Eq. 18: An. II - 2

Integra-se a equação:

$$\int \partial T = C_1 \int \partial x$$

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2$$

Eq. 19: An. II - 3

As condições de contorno utilizadas na Eq. An. II - 3 são:

- 1) $T = T_{S1}$ para $x = 0 \rightarrow T_{S1} = C_2$
- 2) $T = T_{S2}$ para $x = e_x \rightarrow T_{S2} = C_1 \cdot e_x + C_2 = C_1 \cdot e_x + T_{S1}$

Ou seja,

$$C_2 = T_{S1}$$

$$C_1 = \frac{T_{S1} - T_{S2}}{e_x}$$

Com isso, usando-se as Eq. An. I - 1 e Eq. An. I - 2, teremos a expressão para a transferência de calor por condução em um problema unidimensional:

$$q''_{cond x} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -k \cdot C_1$$

$$q''_{cond x} = -k \cdot \left(\frac{T_{S1} - T_{S2}}{e_x} \right)$$

Eq. 20: An. II - 4

Anexo III: Método Empírico de Escoamento Externo Paralelo a Placa Plana^[3]

A dedução do equacionamento da transferência de calor por convecção usado nesse trabalho pode ser encontrado no capítulo 7, intitulado Escoamento Externo, do livro (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007), 6^a edição. É usado um método empírico para determinar o coeficiente convectivo médio em placa plana que sofre a ação de escoamento paralelo de um fluido ao longo de seu comprimento L , de modo que a temperatura da superfície da placa T_s seja maior que a temperatura do fluido T_∞ distante da placa. Leva-se também em consideração, as hipóteses de que o fluido é incompressível, encontra-se em regime estacionário, contém suas propriedades constantes, a dissipação viscosa é desprezível e a pressão ao longo da placa é constante. A figura a seguir representa o problema em questão:

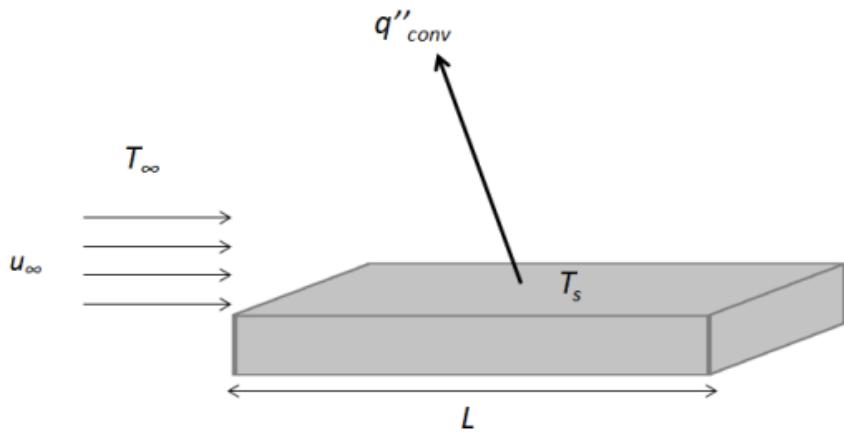


Figura 28: Transferência de calor por convecção sobre um placa plana.

O coeficiente convectivo médio em uma placa plana varia com a velocidade do fluido u_∞ fora da placa, com o comprimento L da placa plana e com a natureza do fluido. Isso é devido ao fato de que a velocidade do fluido na placa é nula, havendo o desenvolvimento de uma camada-limite de espessura δ acima da superfície para que o fluido atinja a velocidade u_∞ . O mesmo é válido para a temperatura do fluido, que na superfície é igual à T_s , e atinge T_∞ na da camada-limite.

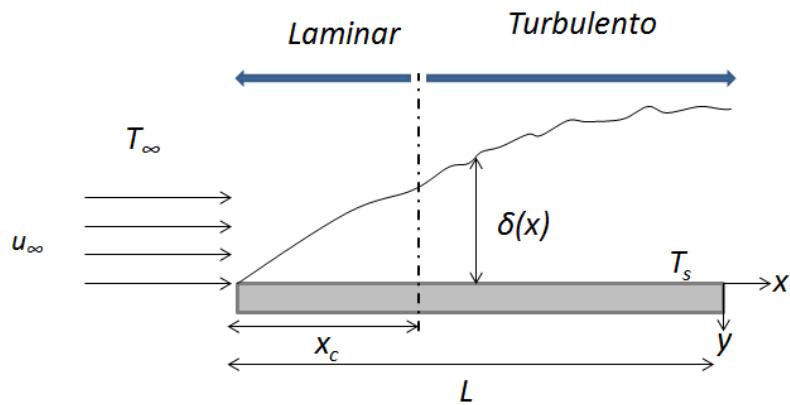


Figura 29: Placa plana em escoamento paralelo.

O escoamento sobre a placa plana começa em regime laminar e pode atingir regime turbulento caso $L > x_c$, determinado representativamente pelo valor de Reynolds crítico, de acordo com a equação 6.24 do (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007), $Re_{x,c} = 5 \cdot 10^5$.

a) Somente Regime Laminar

A equação resultante, 7.30 do (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007), para um regime inteiro de caráter laminar é a seguinte:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_L \cdot L}{k} = 0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{Eq. 21: An. III - 1}$$

$$[Pr \geq 0,6]$$

Onde,

Re_L : número de Reynolds, calculado por $Re_x = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot x}{\mu}$

Pr : número de Prandtl, calculado por $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \cdot \mu}{k}$

c_p : calor específico do fluido.

μ : viscosidade do fluido.

ρ : densidade do fluido.

k : coeficiente de condução do fluido.

b) Escoamento Misto

Quando há escoamento turbulento, a equação se torna mais complexa. A equação 7.38 do (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007) é o resultado da dedução para essa situação:

$$\overline{Nu_L} = \frac{\overline{h_L} \cdot L}{k} = (0,037 \cdot Re_L^{4/5} - A) \cdot Pr^{1/3} \quad \text{Eq. 22: An. III - 2}$$

$$A = 0,037 \cdot Re_{x,c}^{\frac{4}{5}} - 0,664 \cdot Re_{x,c}^{\frac{1}{2}}$$

$$[0,6 \leq Pr \leq 60]$$

$$[Re_{x,c} \leq Re_L \leq 10^8]$$

Anexo IV: Método Empírico de Convecção Natural em Escoamentos Externos em Superfície Horizontal^[3]

A dedução do equacionamento da transferência de calor por convecção natural sobre uma superfície horizontal usado pode ser encontrado no capítulo 9, do livro (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007), 6^a edição, intitulado Convecção Natural. É usado um método empírico para determinar o coeficiente convectivo médio em placa plana horizontal, sendo a temperatura da superfície da placa T_s e a temperatura do fluido T_∞ . Leva-se também em consideração, as hipóteses de que o fluido é incompressível, encontra-se em regime estacionário, contém sua propriedades constantes, a dissipação viscosa é desprezível e a pressão ao longo da placa é constante. A figura a seguir representa o problema em questão:

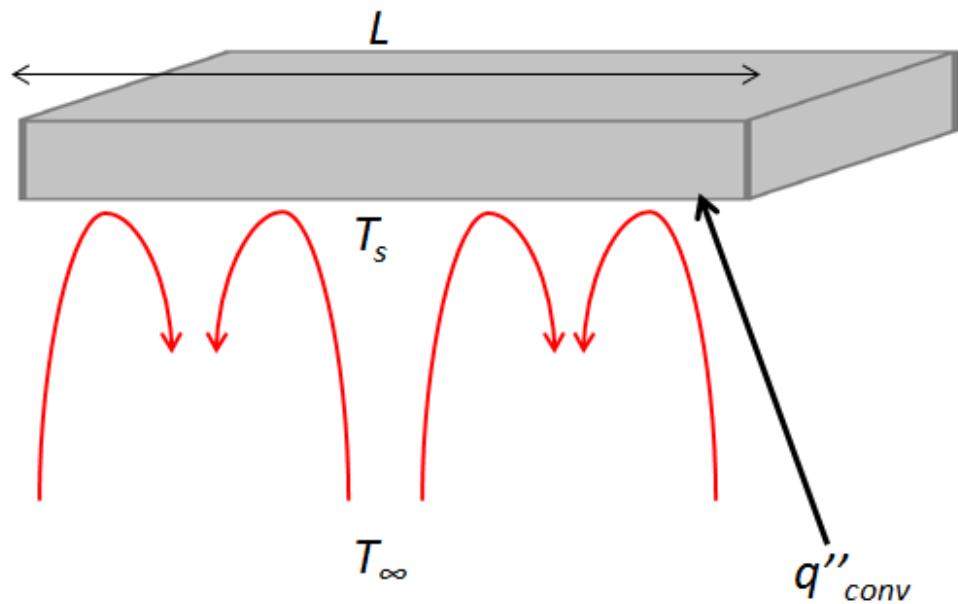


Figura 30: Transferência de calor por convecção natural sobre um placa plana horizontal.

A seguir estão as equações para as possíveis situações de convecção natural em placa plana horizontal.

- a) Superfície Superior de uma Placa Aquecida ou Superfície Inferior de uma Placa Resfriada

As equações 9.30 e 9.31 do (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007), para suas respectivas faixas de aplicação:

$$\overline{Nu_L} = \frac{\overline{h_L} \cdot L}{k} = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4} \quad [10^4 \leq Ra_L \leq 10^7] \quad \text{Eq. 23: An. IV - 1}$$

$$\overline{Nu_L} = \frac{\overline{h_L} \cdot L}{k} = 0,15 \cdot Ra_L^{1/3} \quad [10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}] \quad \text{Eq. 24: An. IV - 2}$$

Onde,

$$Ra_L: \text{número de Rayleigh, calculado por } Ra_x = \frac{1}{T_\infty} \cdot \frac{g \cdot (T_s - T_\infty) \cdot x^3}{\nu \cdot \alpha}$$

- b) Superfície Inferior de uma Placa Aquecida ou Superfície Superior de uma Placa Resfriada

Para essas situações, usa-se a equação 9.32 do (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007) a seguir:

$$\overline{Nu_L} = \frac{\overline{h_L} \cdot L}{k} = 0,27 \cdot Ra_L^{1/4} \quad [10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}] \quad \text{Eq. 25: An. IV - 3}$$

Anexo V: Resultados experimentais de Radiação Solar Global

Os dados de radiação utilizados no relatório foram disponibilizados pela Pós Doutora em Engenharia Química Katia Ribeiro, do Centro de Engenharia de Sistemas Químicos – CESQ/DEQ-EPUSP.

Estes foram obtidos através de um radiômetro (Kipp & Zonen, modelo CMP3) instalado no terraço do prédio Semi-Industrial da Engenharia Química da Escola Politécnica da USP, mesmo local aonde foram realizados os experimentos deste relatório. O equipamento mede a radiação solar global no intervalo de 310-2800 nm. Uma imagem do radiômetro utilizado é apresentada abaixo.



Figura 31: Radiômetro (modelo CMP3).

A seguir são apresentados os dados de radiação solar global referentes aos intervalos nos quais foram realizados os experimentos deste trabalho.

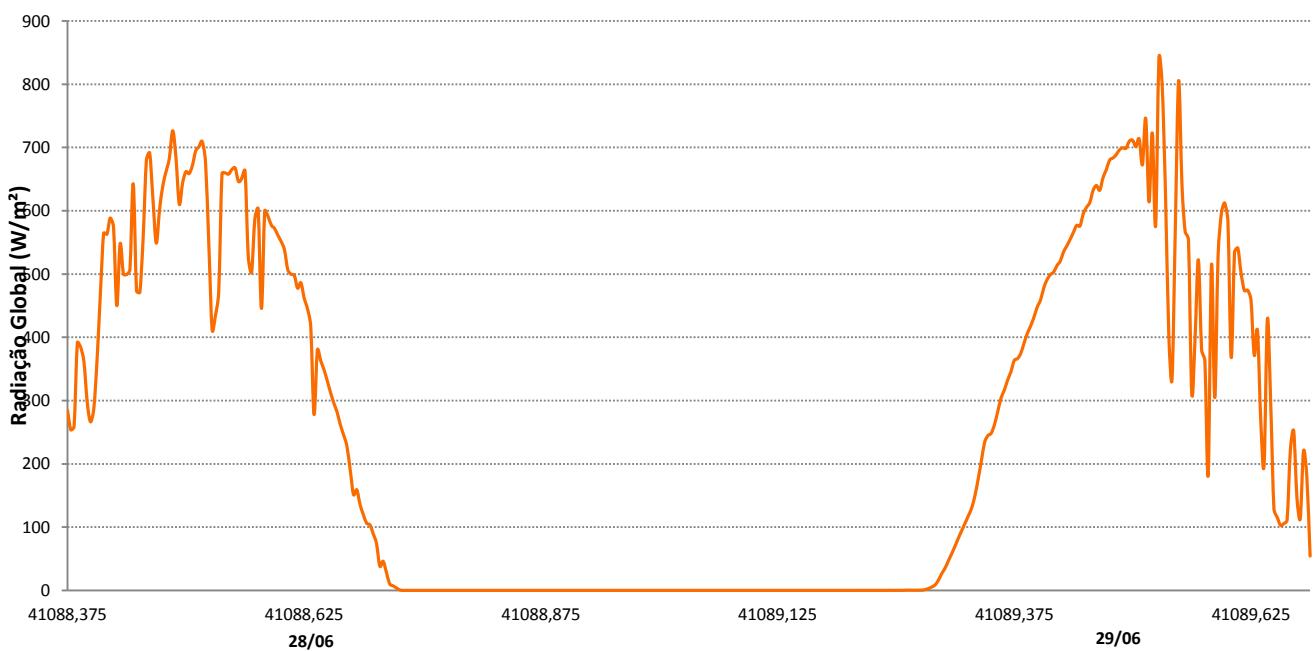


Gráfico 19: Dados de Radiação Solar Global - Período: 28/06 - 9:00 a 29/07 - 17:00

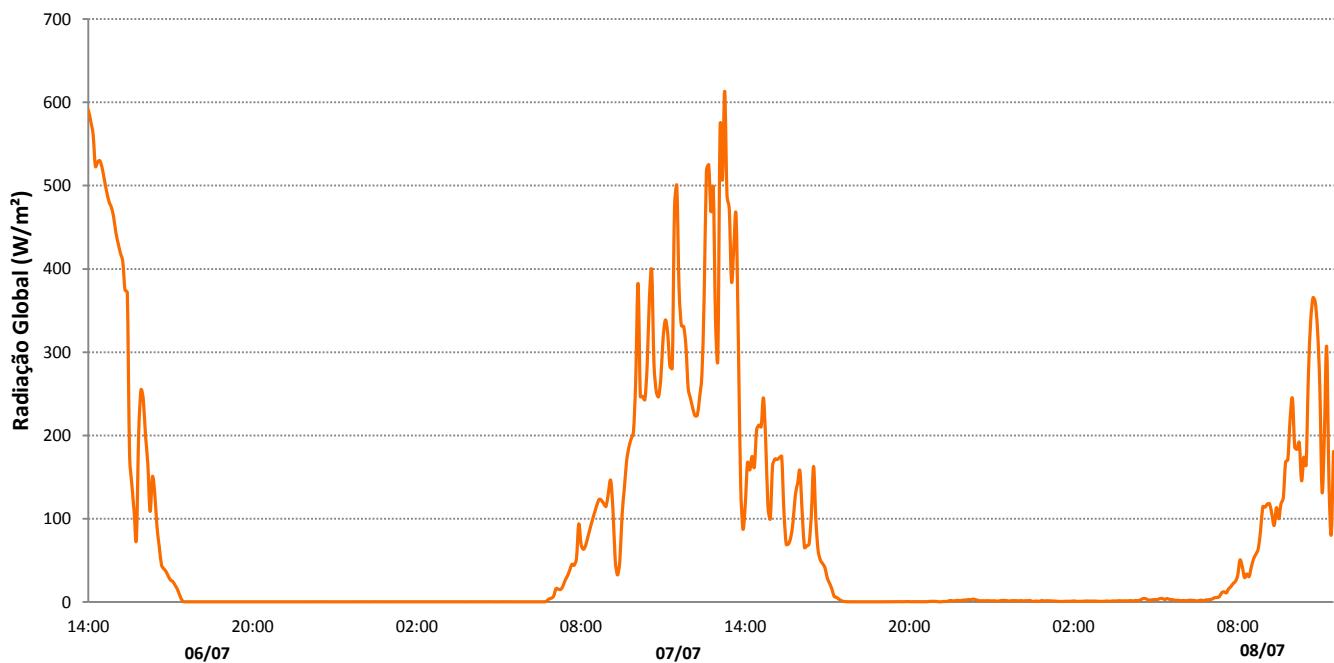
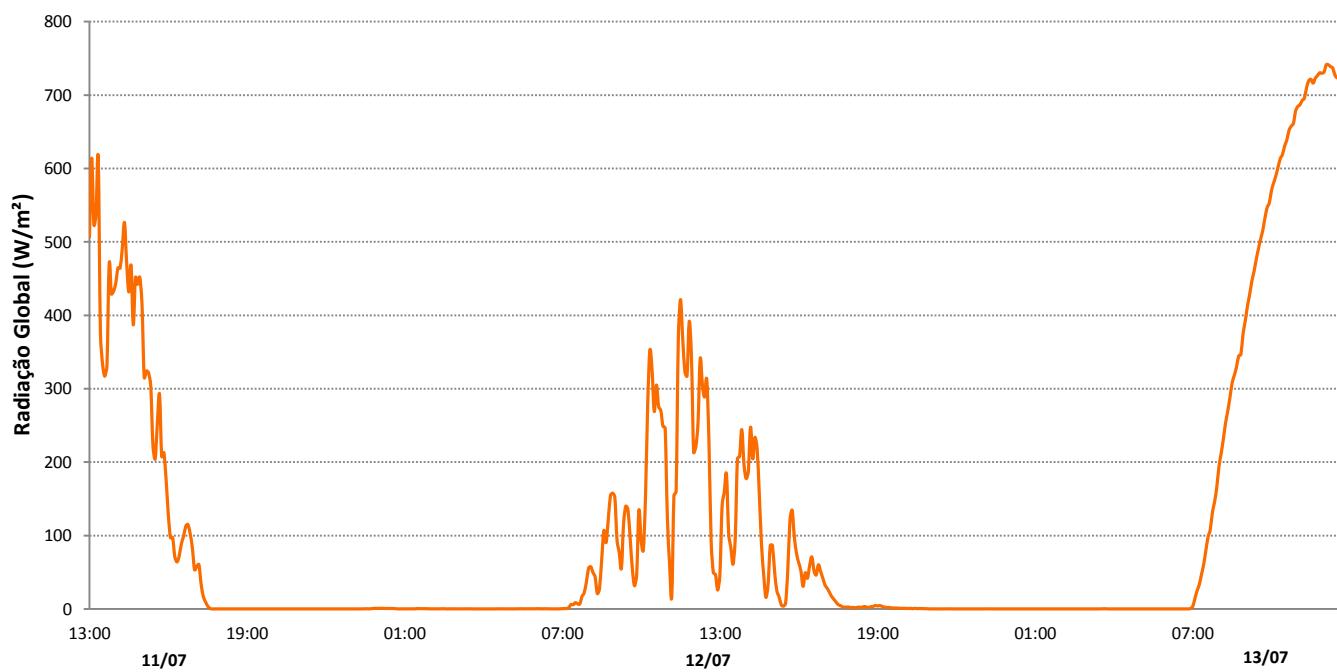
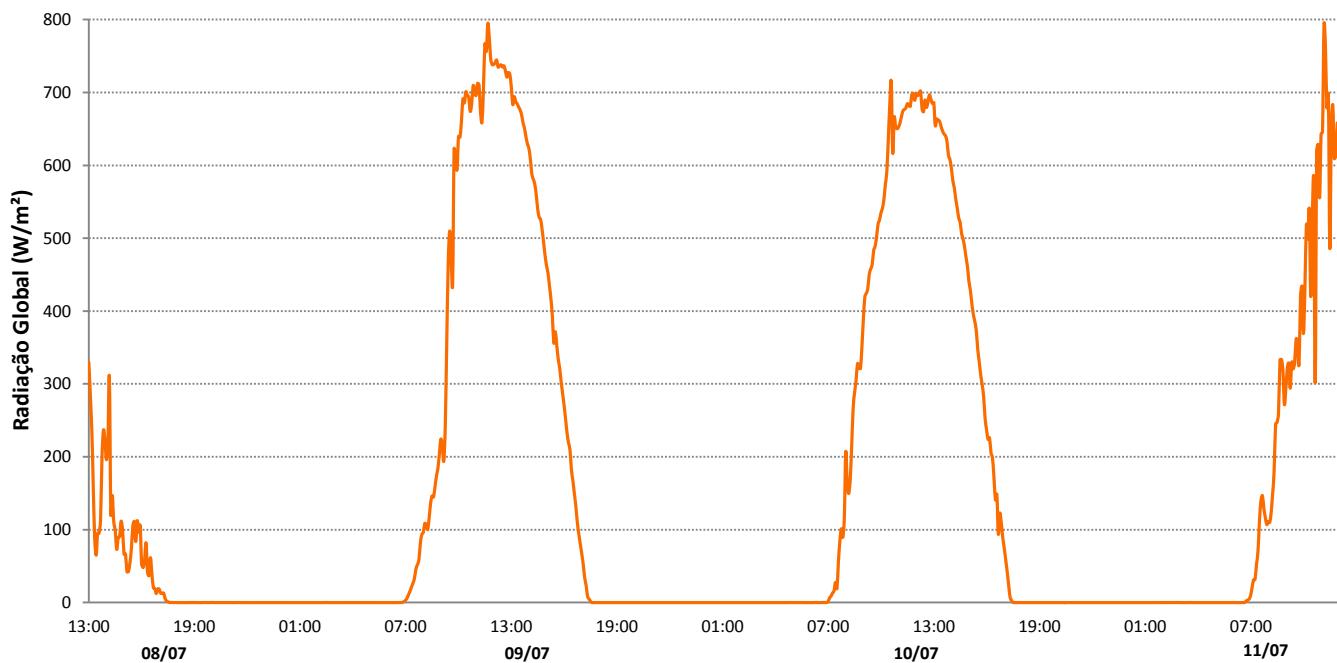


Gráfico 20: Dados de Radiação Solar Global - Período: 06/07 - 14:00 a 08/07 - 11:00.



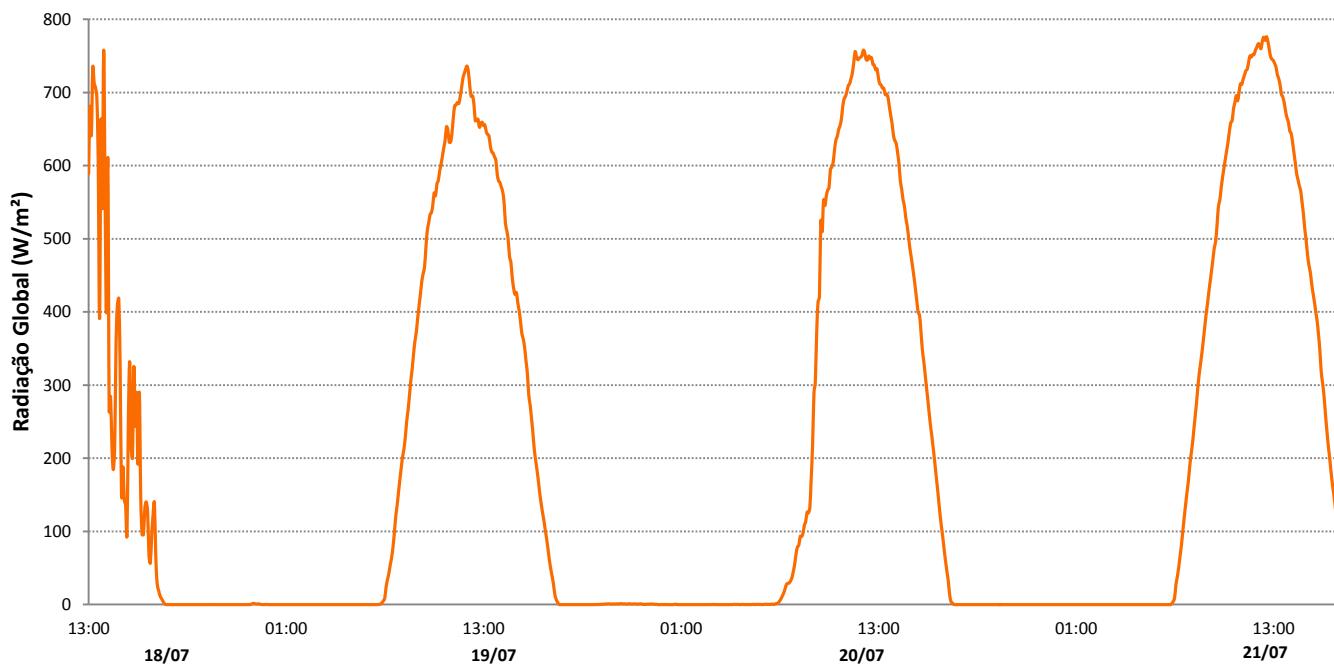


Gráfico 23: Dados de Radiação Solar Global - Período: 13/07 - 13:00 a 11/07 - 14:00.

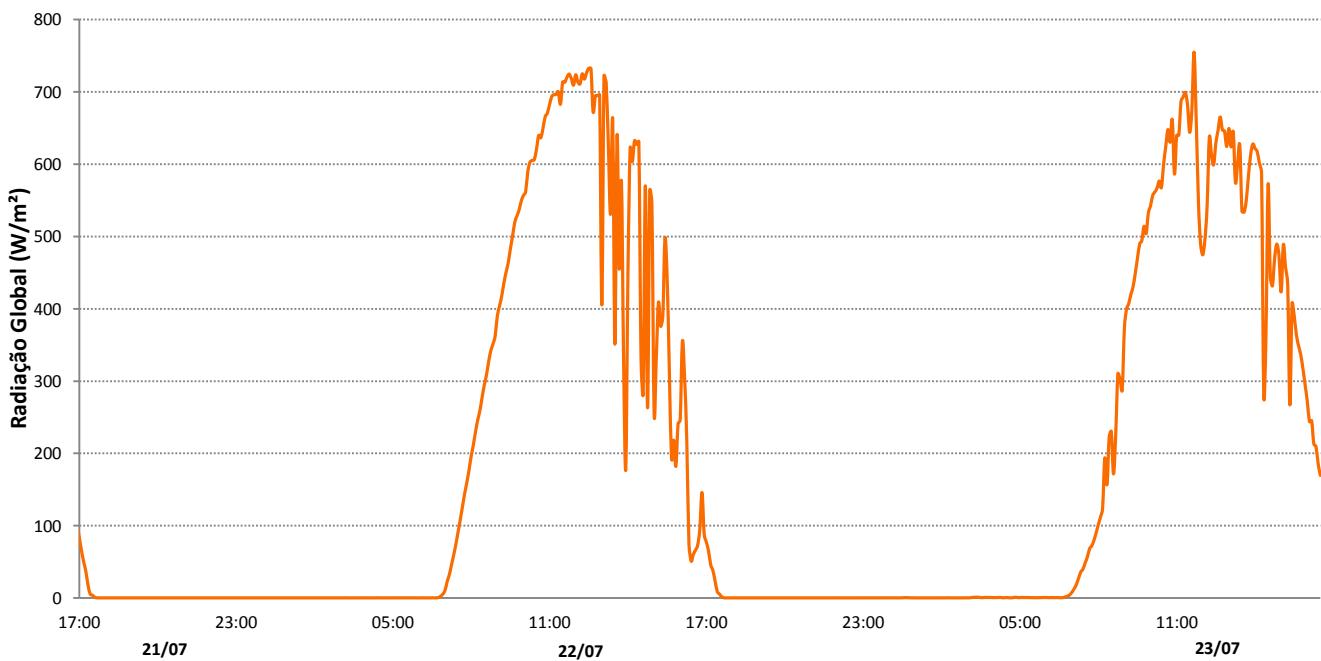


Gráfico 24: Dados de Radiação Solar Global - Período: 21/07 - 17:00 a 23/07 - 14:00.

Anexo VI: Propriedades termofísicas do ar atmosférico

A partir das propriedades termofísicas do ar atmosférico obtidas (INCROPERA, DEWITT, *et al.*, 2007) e mostradas na Tabela 19 abaixo, foram produzidas aproximações polinomiais dos parâmetros para a utilização destes nos cálculos desenvolvidos e apresentados no item 0 (pg. 58).

Tabela 19: Propriedades termofísicas do ar em função da temperatura.

T (K)	ρ (kg/m ³)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	Pr
250	1,395	159,6	22,3	0,720
300	1,161	184,6	26,3	0,707
350	0,995	208,2	30,0	0,700
400	0,871	230,1	33,8	0,690

A seguir são apresentados os gráficos e as respectivas equações polinomiais desenvolvidas pelo programa *MS Office Excel*.

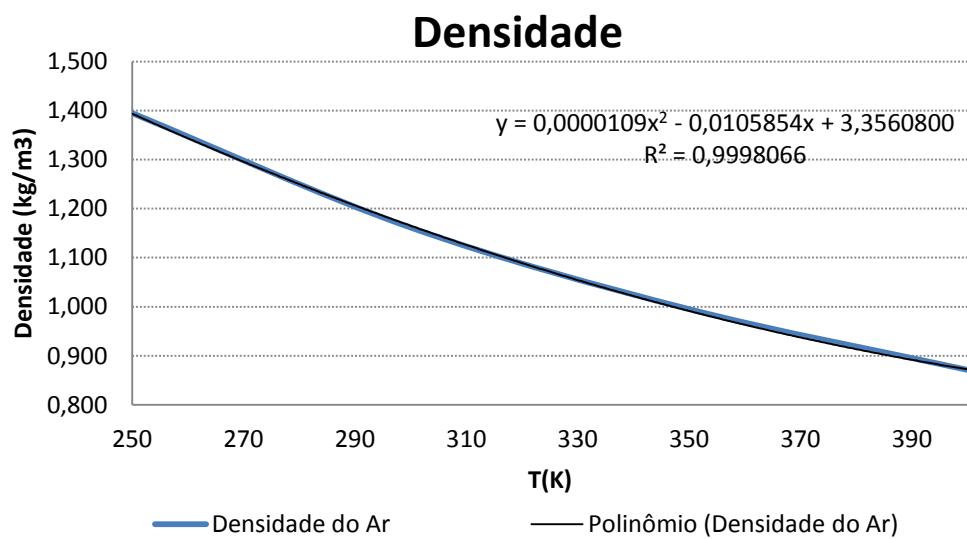


Gráfico 25: Densidade do ar em função da temperatura.

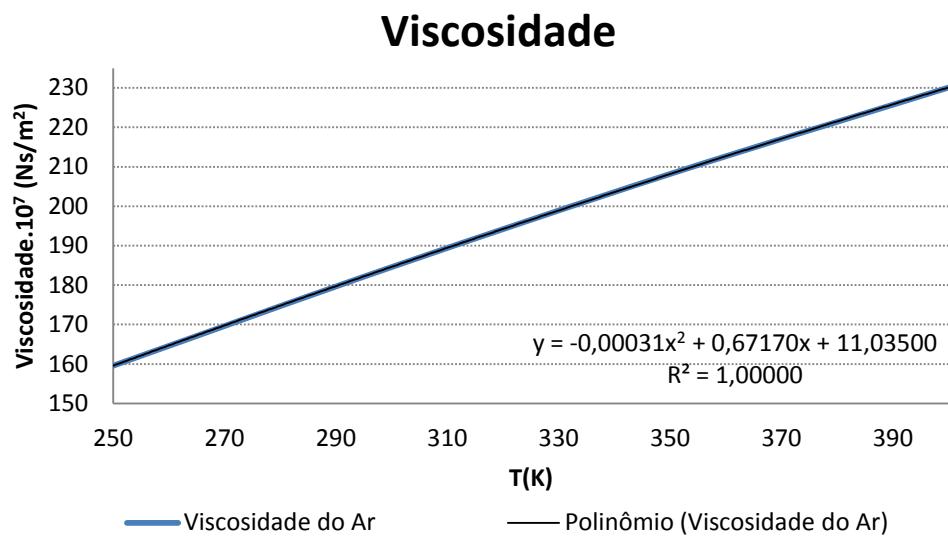


Gráfico 26: Viscosidade do ar em função da temperatura.

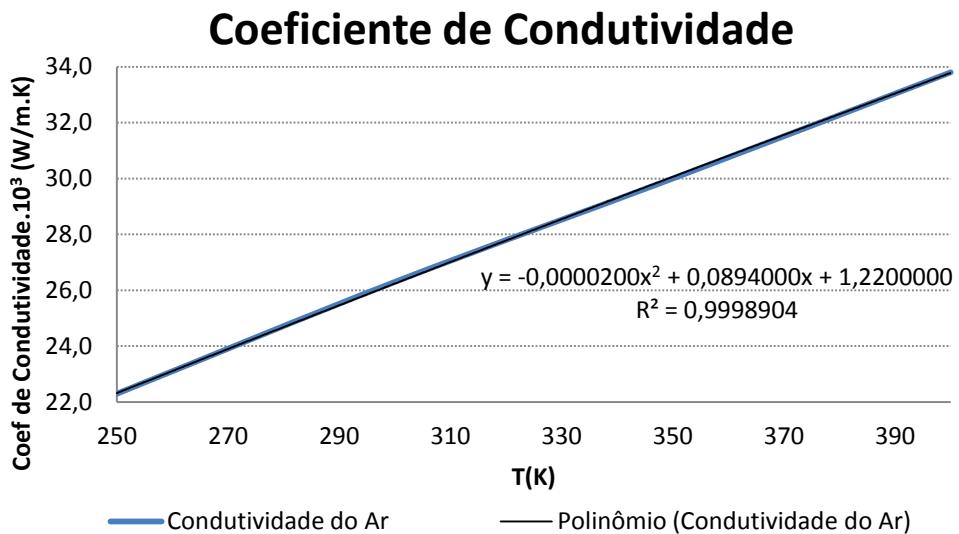


Gráfico 27: Coeficiente de Condutividade do ar em função da temperatura.

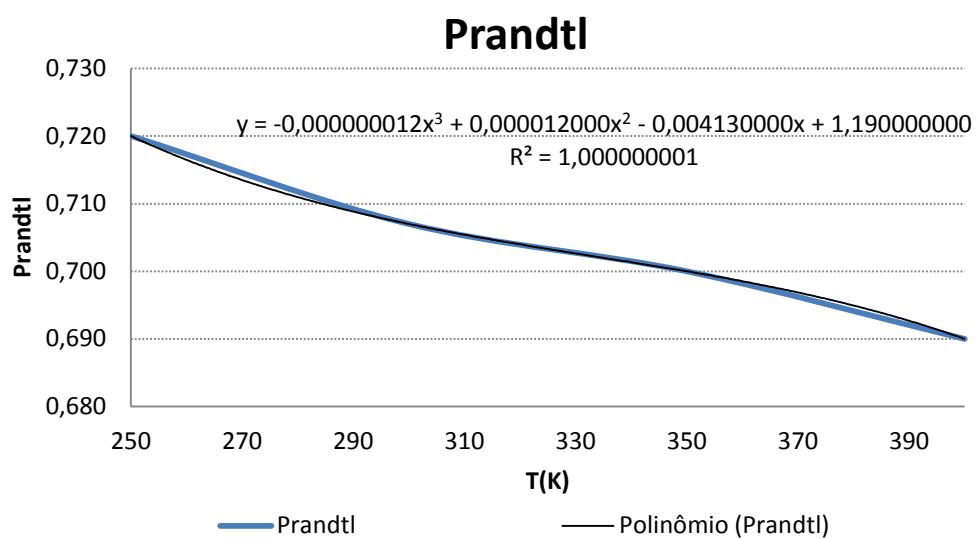


Gráfico 28: Coeficiente de Prandtl do ar em função da temperatura.