



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA,
INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE - PPGIES**

**DESEMPENHO TÉRMICO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA TELHADOS
DE ACORDO COM AS CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA SOLAR DA TRÍPLICE
FRONTEIRA BRASIL-PARAGUAI-ARGENTINA.**

JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

Foz do Iguaçu - PR
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE - PPGIES**

**DESEMPENHO TÉRMICO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA TELHADOS
DE ACORDO COM AS CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA SOLAR DA TRÍPLICE
FRONTEIRA BRASIL-PARAGUAI-ARGENTINA.**

JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Dr. Gustavo Adolfo Ronceros Rivas.

Coorientador: Dr. Leonardo da Silva Arrieche.

Foz do Iguaçu - PR
2022

JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

**DESEMPENHO TÉRMICO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA
TELHADOS DE ACORDO COM AS CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA SOLAR
DA TRÍPLICE FRONTEIRA BRASIL-PARAGUAI-ARGENTINA.**

JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Adolfo Ronceros Rivas
UNILA

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
UNILA

Prof. Dr. Jiam Pires Frigo
UNILA

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio
IFMG

Prof. Dr. Marcelo Silveira Bachelos
UFES

Foz do Iguaçu, 5 de maio de 2022

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

H867d

Hoyos, Jhon Steven Navarro.

Desempenho térmico de materiais sustentáveis para telhados de acordo com as condições de irradiância solar da tríplice fronteira Brasil-Paraguai-Argentina / Jhon Steven Navarro Hoyos. - Foz do Iguaçu, 2022.

127 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território - ILATIT, Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade - PPGIES.

Orientador: Gustavo Adolfo Ronceros Rivas.

Coorientador: Leonardo da Silva Arrieche.

1. Isolamento térmico. 2. Telhas. 3. Controle de temperatura. 4. Tríplice Fronteira (Argentina, Brasil e Paraguai). I. Rivas, Gustavo Adolfo Ronceros. II. Arrieche, Leonardo da Silva. III. Título.

CDU 621.43.016

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

Curso: Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade - PPGIES

Tipo de Documento	
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(X) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais

Título do trabalho acadêmico: DESEMPENHO TÉRMICO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS PARA TELHADOS DE ACORDO COM AS CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA SOLAR DA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU, PR. – BRASIL.

Nome do orientador: GUSTAVO ADOLFO RONCEROS RIVAS Data

da Defesa: _5_/_05_/_2022_

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino- Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

Dedico esta dissertação a Luiz Inácio Lula da Silva, que na excelsa terra das cataratas iguaçuences plantou uma Universidade Pública, Alma Máter latino-americana, e me oportunizou o acesso à educação superior e à ciência como caminho de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

À Universidade Federal da Integração Latino-americana, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade - PPGIES, agradeço por me oferecer uma formação acadêmica de qualidade.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador o professor Gustavo Ronceros Rivas pelo incentivo, pela dedicação do seu tempo ao meu projeto de pesquisa e pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo. Agradeço também de forma muito especial ao professor Leonardo da Silva Arrieche, pela sua disposição para me coorientar neste trabalho.

Sou grato não só aos professores do PPGIES, mas também ao pessoal administrativo e demais colaboradores da instituição, especialmente aos técnicos de laboratório e à funcionária Fabiana Colombelli, pelos auxílios prestados na secretaria do Programa.

Expresso um especial agradecimento ao CEASB do Parque Tecnológico Itaipu, que gentilmente colaborou com esta pesquisa ao permitir usar a sua licença do Software Ansys CFD.

Não posso deixar de manifestar meu profundo agradecimento aos meus amigos César Ramos e Maria Teresa Tejada, pela sua ajuda indispensável na construção do telhado experimental que permitiu desenvolver este trabalho.

Agradeço aos meus pais Juan e Sandra, que mesmo na distância sempre me apoiaram neste caminho de engenharia e ciência. Também me sinto grato com o Bruno de Montenegro Trujillo, pelo encorajamento constante, o companheirismo e os sábios conselhos.

Aos meus amigos e amigas, companheiros de luta dos diversos países da América Latina e do Caribe que durante este tempo de estudo fizeram parte importante da minha vida. Fico grato pela convivência, pelas múltiplas experiências, as comemorações e pela infinidade de histórias que só a irmandade poderia tornar realidade.

Por último, quero agradecer a todos os familiares e amigos que me motivaram neste percurso, longe do meu país de origem.

[...] “Quando se trata de questões científicas, não existe autoridade acima da soberania da ciência. Nem militar, nem política, nem religiosa.”

Galvão R. (2019).

Navarro, J.S. **Desempenho Térmico de Materiais Sustentáveis para Telhados de acordo com as Condições de Irradiância Solar da Tríplice Fronteira Brasil-Paraguai-Argentina**. 125 páginas. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.

RESUMO

Materiais que apresentam baixa absorvância e alta emissividade são conhecidos como materiais refletivos ou frios. Esse tipo de materiais, quando usados como revestimento ou como telhados em construções, permitem a redução de temperaturas superficiais nos edifícios, minimizando a necessidade de energia para refrigeração e conforto térmico de ambientes e contribuindo com a sustentabilidade cada vez mais procurada em projetos de engenharia e arquitetura no mundo inteiro. Esta pesquisa de caráter experimental e computacional avaliou o desempenho térmico de quatro tipos de materiais para telhas: Telha de Fibrocimento sem Amianto; Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Tinta Branca (Cal); Telha Ecológica Tetra Pak e Telha Ecológica de Fibra Vegetal. Isto, mediante medições de temperatura superficiais por técnicas de termografia infravermelha usando a norma internacional ASTM E-1980, medições de temperatura superficial em regime transiente durante os períodos de maior radiação solar no verão e, através de uma simulação computacional no Software Ansys CFD para validar os perfis de temperatura e fluxo de calor da Telha de Fibra de Vegetal. A pesquisa se realizou levando em consideração as condições de radiação solar da cidade de Foz do Iguaçu, na Tríplice Fronteira Brasil-Paraguai-Argentina. Uma vez analisados e comparados os resultados de atraso térmico e fator decremental dos materiais, foi possível determinar que a Telha de Fibra Vegetal possui um atraso térmico 73,02% maior do que a Telha Convencional de Fibrocimento e 52,82% maior do que a Telha de Tetra Pak, o que sugere que a Telha Ecológica de Fibra Vegetal contribui de melhor forma ao conforto térmico de ambientes em relação aos outros tipos de materiais analisados. Também foi possível corroborar que o revestimento com tinta branca (Cal) reduz o fator decremental da telha de fibrocimento em 69,56%, uma vez que aumenta a refletância e a emissividade do material.

Palavras Chave: desempenho térmico, telhas sustentáveis, termografia infravermelha, atraso térmico, CFD.

Navarro, J. S **Thermal Performance of Sustainable Roofing Materials according to the Solar Irradiance Conditions of the Brazil-Paraguay-Argentina Triple Border**.125 pages. Master's Dissertation of the Post-Graduation Program in Energy and Sustainability, Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu, 2022.

ABSTRACT

Materials that have low absorbance and high emissivity are known as reflective or cold materials. This type of materials, when used as coating or roofing in constructions, allow the reduction of surface temperatures in buildings, minimizing the need for energy for cooling and thermal comfort of environments and contributing to the sustainability increasingly sought after in engineering projects and architecture worldwide. This experimental and computational research evaluated the thermal performance of four types of roofing materials: Fiber Cement Tile without Asbestos; Asbestos-free Fiber Cement Tile with White Paint Coating (Lime); Tetra Pak Ecological Tile and Vegetal Fiber Ecological Tile. This, by means of surface temperature measurements by infrared thermography techniques using the international standard ASTM E-1980, surface temperature measurements in a transient regime during periods of higher solar radiation in the summer and, through a computer simulation in Ansys CFD Software to validate the temperature and heat flux profiles of the Vegetable Fiber Tile. The research was carried out taking into account the conditions of solar radiation in the city of Foz do Iguaçu, on the Brazil-Paraguay-Argentina Triple Border. Once analyzed and compared the results of thermal delay and decremental factor of the materials, it was possible to determine that the Vegetal Fiber Tile has a thermal delay 73.02% greater than the Conventional Fiber Cement Tile and 52.82% greater than the Tetra Pak, which suggests that the Ecological Tile of Vegetal Fiber contributes in a better way to the thermal comfort of environments in relation to the other types of materials analyzed. It was also possible to corroborate that the coating with white paint (Cal) reduces the decremental factor of the Fiber Cement Tile by 69.56%, since it increases the reflectance and the emissivity of the material.

Keywords: thermal performance, sustainable tiles, infrared thermography, thermal delay, CFD.

Navarro, J. S. **Desempeño Térmico de Materiales Sustentables para Tejados según las Condiciones de Irradiación Solar de la Triple Frontera Brasil-Paraguay-Argentina.** 125 páginas. Tesis de Maestría del Programa de Postgrado en Energía y Sostenibilidad, Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz de Iguazú, 2022.

RESUMEN

Los materiales que tienen baja absorbancia y alta emisividad se conocen como materiales reflectantes o fríos. Este tipo de materiales, cuando se utilizan como revestimiento o cubierta en las construcciones, permiten reducir las temperaturas superficiales de los edificios, minimizando la necesidad de energía para la refrigeración y el confort térmico de los ambientes y contribuyendo a la sostenibilidad cada vez más buscada en los proyectos de ingeniería y arquitectura a nivel mundial. Esta investigación experimental y computacional evaluó el desempeño térmico de cuatro tipos de materiales para techos: Teja de Fibrocemento sin Asbesto; Teja de Fibrocemento sin Asbesto con Revestimiento de Pintura Blanca (Cal); Teja Ecológica Tetra Pak y Teja Ecológica de Fibra Vegetal. Esto, a través de mediciones de temperatura superficial mediante técnicas de termografía infrarroja utilizando la norma internacional ASTM E-1980, mediciones de temperatura superficial en régimen transitorio durante los períodos de mayor radiación solar en el verano y, a través de una simulación computacional en el Software Ansys CFD para validar los perfiles de temperatura y flujo de calor de la Teja de Fibra Vegetal. La investigación fue realizada teniendo en cuenta las condiciones de radiación solar en la ciudad de Foz de Iguazú, en la triple frontera Brasil-Paraguay-Argentina. Unavez analizados y comparados los resultados de retardo térmico y factor decreciente de los materiales, se pudo determinar que la Teja de Fibra Vegetal tiene un retardo térmico 73.02% mayor que la Teja de Fibrocemento Convencional y 52.82% mayor que la Tetra Pak, lo que sugiere que la Teja Ecológica de Fibra Vegetal contribuye de mejor manera al confort térmico de los ambientes en relación a los demás tipos de materiales analizados. También se pudo corroborar que el recubrimiento con pintura blanca (Cal) reduce en un 69,56% el factor decreciente de la Teja de Fibrocemento, ya que aumenta la reflectancia y la emisividad del material.

Palabras clave: comportamiento térmico, tejas sostenibles, termografía infrarroja, retardo térmico, CFD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Espectro de Radiação Solar.....	7
Figura 2. Espectro de Radiação do Corpo Negro	9
Figura 3. Espectro Solar no Topo da Atmosfera e na Superfície para um Ângulo de 60°	14
Figura 4. Ângulos de Localização e Orientação do Plano Inclinado.....	20
Figura 5. Ângulos Solares em Relação à Terra e à Esfera Celeste.....	21
Figura 6. Ângulos da Posição do Sol no Céu: Altitude e de Azimute	23
Figura 7. Radiação Recebida pela Câmera Termográfica	28
Figura 8. Resumo Meteorológico Anual Foz do Iguaçu.....	38
Figura 9. Temperaturas Máximas e Mínimas Promédio em Foz do Iguaçu.....	39
Figura 10. Temperatura Média Horária em Foz do Iguaçu	39
Figura 11. Categorias de Nebulosidade em Foz do Iguaçu	40
Figura 12. Horas de Luz Solar e Crepúsculo em Foz do Iguaçu	41
Figura 13. Nascer e Pôr do Sol com Crepúsculo em Foz do Iguaçu	41
Figura 14. Média Diária de Energia Solar de Ondas Curtas Incidentes em Foz do Iguaçu	42
Figura 15. Telha de Fibrocimento sem Amianto	47
Figura 16. Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Cal	48
Figura 17. Telha Tetra Pak	49
Figura 18. Telha Ecológica de Fibra Vegetal	51
Figura 19. Câmera Termográfica FLIR TG 165.....	51
Figura 20. “4 Channel K Thermometer SD” - 88598 AZ logger	52
Figura 21. Estrutura em Madeira Reciclada - Telhado Experimental	54
Figura 22. Medidas da Estrutura em Madeira Reciclada - Telhado Experimental.....	54
Figura 23. Telhado Experimental Vista Lateral.....	54
Figura 24. Medidas de Inclinação Telhado Experimental - 20° N	55
Figura 25. Telhado Experimental Vista Superior	55
Figura 26. Desenho Telhado Experimental em Sketchup – Vista Posterior.....	56
Figura 27. Desenho Telhado Experimental em Sketchup – Vista Anterior.....	56
Figura 28. Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas.....	58
Figura 29. Malha Computacional Telha Ecológica de Fibra Vegetal.....	62
Figura 30. Variações de Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas 10:00 H	68
Figura 31. Variações de Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas 13:30 H	69

Figura 32. Variações de Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas 15:00 H.....	69
Figura 33. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha de Fibrocimento Cinza	71
Figura 34. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha Tetra Pak.....	71
Figura 35. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha Fibrocimento Branca	72
Figura 36. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha de Fibra Vegetal	72
Figura 37. Perfil de Temperatura Telha Fibra Vegetal Vista Superior	74
Figura 38. Perfil de Temperatura Telha Fibra Vegetal Vista Inferior.....	74
Figura 39. Perfil de Temperatura Telha Fibra Vegetal Vista Bordas Inf. e Lateral Direita.....	75
Figura 40. Perfil de Temperatura Telha Fibra Vegetal Vista Bordas Sup. e Lateral Esquerda .	75
Figura 41. Variação Total de Temperaturas Cara Inferior e Superior Telha de Fibra Vegetal ..	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Desempenho Térmico Telhas de Fibrocimento.....	32
Tabela 2. Especificações Telha de Fibrocimento sem Amianto.....	47
Tabela 3. Especificações Telha Tetra Pak.....	49
Tabela 4. Telha Ecológica de Fibra vegetal	50
Tabela 5. Especificações Câmera Termográfica FLIR TG 165	52
Tabela 6. Especificações do “4 Channel K Thermometer SD” - 88598 AZ	53
Tabela 7. Parâmetros de Execução Simulação Computacional CFD	63
Tabela 8. Atraso Térmico e Fator Decremental das Quatro Telhas Durante as 13 Semanas	66

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana de Provas e Materiais
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
DALL	Divisão de Apoio Logístico aos Laboratórios
HSD	Teste de Significância Honesta de Tukey
IR	Infravermelha
LEED	Liderança em Energia e Design Ambiental
MERRA-2	Análise Retrospectiva da Era Moderna para Pesquisa e Aplicações Versão 2
NASA	Administração Nacional de Aeronáutica e do Espaço (Estados Unidos)
NBR	Norma Brasileira
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
PVC	Policloreto de Vinilo
SACT	Secretaria de Apoio Científico e Tecnológico
TIV	Termografia Infra Vermelha
UV-VIS	Ultravioleta Visível
WMO	Organização Meteorológica Mundial

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA A SER ESTUDADO	1
1.2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS SEGUINTE.....	5
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 O SOL: FONTE DE ENERGIA SOLAR.....	6
2.1.1 O Espectro Solar	7
2.1.2 A Constante Solar	8
2.2 LEI DE WIEN	9
2.3 LEI DE PLANK	10
2.4 RADIAÇÃO SOLAR DISPONÍVEL NA TERRA	12
2.4.1 Atenuação Atmosférica.....	12
2.4.2 Massa de Ar e Efeitos dos Gases Atmosféricos na Radiação Solar.....	13
2.4.3 Efeitos dos Aerossóis na Radiação Solar.....	14
2.4.4 Efeitos das Nuvens na Radiação Solar	15
2.4.5 Radiação Solar na Superfície Terrestre	16
2.5 TEMPO SOLAR.....	17
2.6 DIREÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA	18
2.6.1 Ângulos Solares.....	18
2.7 POSIÇÃO DO SOL NO CÉU	21
2.7.1 Ângulo de Altitude Solar (h)	21
2.7.2 Ângulo de Azimute Solar (A).....	22
2.8 RADIAÇÃO SOBRE SUPERFÍCIES INCLINADAS	23
2.9 OTIMIZAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE	24
2.10 ATRASO TÉRMICO E FATOR DECREMENTAL	25
2.11 TERMOGRAFIA INFRATERMELHA.....	26
2.11.1 Medição de Temperatura	27
2.12 MATERIAIS PARA TELHAS.....	30
2.12.1 Telhas de Fibrocimento	31
2.12.2 Telhas com Revestimento de Tintas Frias	33
2.12.3 Telhas de Tetra Pak	35
2.12.4 Telhas Ecológicas de Fibra Vegetal	36
2.13 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EM FOZ DO IGUAÇU	37

2.13.1 Temperatura Média.....	38
2.13.2 Nuvens	40
2.13.3 Sol.....	40
2.13.4 Energia Solar	42
2.14 ESTUDOS RELACIONADOS E ESTADO DA ARTE	43
2.15 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	45
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS	46
3.1.1 Telhas.....	46
3.1.2 Câmera Termográfica FLIR TG 165	51
3.1.3 “4 Channel K Thermometer SD logger” - 88598 AZ	52
3.2 ESTRUTURA EXPERIMENTAL.....	53
3.3 MÉTODO DE OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS.....	57
3.3.1 Medições de Temperatura Superficial	57
3.3.2 Medições de Temperatura Superficial em Regime Transiente	58
3.4 DESVIO PADRÃO, ANÁLISE DE VARIÂNCIA CONFIABILIDADE DOS DADOS COLETADOS	59
3.4.1 Análise dos Dados Coletados com Termografia Infravermelha	60
3.4.2 Análise dos Dados Coletados em Regime Transiente.....	61
3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ANSYS CFD APLICADA NA TELHA ECOLÓGICA DE FIBRA VEGETAL.....	62
3.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	64
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1 ATRASO TÉRMICO (ϕ) E FATOR DECREMENTAL (f).....	65
4.2 VARIAÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DURANTE AS 13 SEMANAS DE EXPERIMENTAÇÃO	68
4.3 VARIAÇÃO DE TEMPERATURAS TRANSIENTES NAS TELHAS NO DIA MAIS QUENTE DO VERÃO.....	71
4.4 RESULTADOS SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO SOFTWARE ANSYS CFD DA TELHA DE FIBRA VEGETAL	73
4.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	77
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
5.1 CONCLUSÕES.....	78
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE	92
APÊNDICE A – REGISTRO EXPERIMENTOS: TEMP. SUPERFICIAL	93
APÊNDICE B – REGISTRO DE EXPERIMENTOS: TEMPERATURA SUPERFICIAL	

EM REGIME TRANSIENTE	96
APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA DE FIBROCIMENTO	99
APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA BRANCA	100
APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA TETRA PAK.....	101
APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA FIBRA VEGETAL	102
APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO CINZA	103
APÊNDICE H – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO BRANCA.....	104
APÊNDICE I – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES TELHA TETRA PAK	105
APÊNDICE J – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES TELHA FIBRA VEGETAL.....	106
ANEXOS	107
ANEXO A - FATURAS E NOTAS FISCAIS DE COMPRA DAS TELHAS	108
ANEXO B - IRRADIÂNCIA MÉDIA ANUAL DE FOZ DO IGUAÇU.....	110

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

No presente capítulo serão abordados: O problema a ser estudado, a motivação da pesquisa, os objetivos e uma descrição sucinta dos outros quatro capítulos que compõem este trabalho.

1.1 PROBLEMA A SER ESTUDADO

No mundo moderno, a construção civil tem sofrido importantes transformações que visam favorecer o meio ambiente e contribuir com práticas de caráter sustentável, devido ao aquecimento global e ao esgotamento paulatino de diversos recursos naturais. Parte dessas transformações, são os tipos de materiais utilizados para a construção de casas, prédios, escolas, hospitais, e muitas outras classes de edificações que compõem as diferentes cidades do planeta. Da mesma maneira, uma boa parte do consumo de energia elétrica mundial, é destinado ao condicionamento térmico de espaços que são habitados ou frequentados diariamente pela humanidade, consumo tal, que pode ser reduzido mediante a melhoria do desempenho térmico e a eficiência energética das construções.

Em diversos tipos de imóveis, o ambiente térmico é afetado diretamente pelo tipo de telhado escolhido na hora de construir. Isto ocorre, devido á transmissão de energia térmica que se dá mediante a radiação solar, que é absorvida pelas telhas e levada parao interior dos ambientes, ocasionando consequentemente um aumento da temperatura [1]. Alguns dos aspectos mais relevantes dos telhados, que influenciam o comportamento da temperatura em interiores são: o tipo de material, a natureza superficial, a existência e eficácia de isolamentos térmicos ou revestimentos. Assim, o material ideal para um telhado deve atender ás recomendações em que a superfície superior tenha alta refletividade solar e alta emissividade de temperatura [2].

Telhados com alta refletância solar (alta capacidade de refletir a luz do sol) e alta emissão térmica (alta capacidade para irradiar calor) tendem a permanecer frios quando expostos ao sol, mesmo nos dias mais quentes, o que pode ser traduzido em menores gastos de eletricidade para funcionamento de sistemas de resfriamento (ar condicionado e/ou ventiladores) [3].

Alguns dos tipos de materiais para telhados mais utilizados no mundo inteiro, são: cimento, fibras de cimento, cerâmicas, plásticos, vidros de alta resistência, asfalto, alumínio prensado, e zinc. Porém, tem se tornado comum o uso das chamadas telhas ecológicas, feitas de materiais como PVC, Tetra Pak, elementos reciclados e fibras naturais de bambú, bananeiras, coco, entre outras de origem vegetal [4]. No entanto, no Brasil, as telhas onduladas de fibrocimento são elementos construtivos de baixo custo e, por isso, possuem um importante papel na construção de habitações sociais e de residências comuns [5].

Em alguns países industrializados, as telhas de fibrocimento com amianto têm sido banidas da construção civil por serem prejudiciais para a saúde, favorecendo o uso de fibras naturais em materiais que anteriormente utilizavam amianto como matéria prima. No Brasil, até o ano de 2007, a fibra mais usada na fabricação de telhas era o amianto, que tem origem mineral. Com a Lei brasileira N°. 9.055/1995, proibiu-se o emprego do amianto na fabricação de quaisquer componentes construtivos [6]. A substituição do amianto pela tecnologia das fibras sintéticas é considerada uma aplicação sustentável, devido à possibilidade de se reciclar produtos derivados do plástico (polipropileno) e utilizá-los na fabricação de produtos de fibrocimento [7].

Assim, considerando-se o fato que o Brasil é um país cujo clima é predominantemente tropical e, que recebe insolação acentuada no decorso do ano, surge a preocupação no que diz respeito de mitigar o impacto da radiação solar na carga térmica das casas e dos edifícios. Além, é válido afirmar que a correta especificação dos materiais de telhas pode contribuir tanto para a melhoria da eficiência energética em edificações como para a mitigação de altas temperaturas nos ambientes. Nesse sentido, e tendo em conta a importância dos materiais de cobertura nas construções, esta pesquisa de caráter experimental e computacional, visa avaliar o desempenho térmico de quatro tipos de telhas sustentáveis, cuja tipologia é: Fibrocimento sem Amianto; Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Tinta Branca (Cal); Ecológica Tetra Pak e Ecológica de Fibra Vegetal. Isto, mediante medições de temperatura superficiais por técnicas de termografia infravermelha usando a norma internacional ASTM E-1980, realizando medições de temperatura em regime transiente em cada uma das telhas por curtos períodos de tempo mediante o uso de termopares e, executando uma simulação computacional no Software Ansys CFD para corroborar os dados experimentais e avaliar diversos parâmetros térmicos na telha ecológica de fibra vegetal, na qual será realizada uma análise mais detalhada devido ao seu caráter inovador.

1.2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A carga térmica de casas e edifícios é devida em grande parte à radiação solar que é absorvida pelos materiais dos quais estão feitos seus telhados. Em dias de sol intenso, essa carga aumenta significativamente fazendo com que as pessoas que ocupam esses espaços sintam a necessidade de ligar equipamentos de ar condicionado ou ventiladores, para manter controlada a temperatura do ambiente. Porém, o uso desses equipamentos aumenta os custos das faturas de energia elétrica de forma considerável no verão, dado que precisam estar ligados a maior parte do tempo.

A cidade de Foz de Iguaçu é caracterizada pelas altas temperaturas durante a temporada de verão anual, entre os meses de novembro a fevereiro, causando sensação de desconforto em relação ao calor por parte dos seus habitantes.

Por outra parte, muitas casas da cidade que foram construídas antes da década de 2010, ainda possuem amianto nos seus telhados, que é uma fibra mineral que era muito utilizada na construção civil pelas suas propriedades de resistência, mas que causados severos à saúde das pessoas, principalmente dos trabalhadores da construção que estão expostos aos efeitos genotóxicos, cancerígenos e às doenças respiratórias causadas por esse material quando suas fibras são inaladas [8].

Em vista desses aspectos e considerando também o importante crescimento imobiliário da cidade, surge a necessidade de estudar as propriedades térmicas de materiais sustentáveis para elaboração de telhas de acordo às condições de irradiância local, favorecendo o conforto térmico dos ambientes internos das casas dos iguaçuenses, tanto das que serão construídas no futuro, quanto das que pretendem realizar a troca dos telhados antigos.

Por outro lado, é válido destacar a repercussão social que possui esta pesquisa, já que a cidade em crescimento busca a construção de imóveis e habitações com fins sociais, em que muitas pessoas não tem a possibilidade econômica de adquirir sistemas de ar condicionado ou de ventilação durante o período de verão intenso. Além disso, com a implementação de telhas que reduzam a carga térmica das casas, as contas de energia poderiam ter redução nos custos mensuais entre os meses de novembro a fevereiro, anualmente.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é analisar e comparar o desempenho térmico de quatro tipos de materiais de telhas, de acordo às condições de irradiância solar da cidade de Foz do Iguaçu, na tríplice fronteira Brasil-Paraguai-Argentina, em diferentes meses e horários, com o fim de determinar o melhor tipo de material sustentável entre esses quatro, que mitigue as altas temperaturas da cidade nos períodos mais quentes e de maior radiação solar.

Os objetivos específicos são:

- Medir as temperaturas superficiais dos quatro tipos de telhas mediante termografia infravermelha, em múltiplos ensaios, realizados em diferentes meses e horários, seguindo a norma ASTM E-1980 [9].
- Medir as temperaturas superficiais em regime transiente dos quatro tipos de telhas em curtos intervalos de tempo durante os períodos de maior radiação solar, fazendo uso de sensores de temperatura tipo K (termopares).
- Realizar a validação do perfil de temperaturas da telha ecológica de fibra vegetal através do Software Ansys CFD, estabelecendo condições de contorno que permitam corroborar os resultados experimentais, assim como analisar o comportamento do fluxo de calor do material.
- Analisar e comparar os resultados dos ensaios experimentais com dados encontrados na literatura especializada, para especificar o material que representa maiores benefícios de conforto (entre os quatro avaliados) em edificações na cidade de Foz do Iguaçu.
- Avaliar a importância técnica, econômica, ambiental e social, que carrega a especificação de materiais sustentáveis para a construção civil.

1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS SEGUINTE

Esta dissertação é composta por este capítulo de introdução e por mais outros quatro, cujos conteúdos são descritos a seguir.

No segundo capítulo, é feita uma recopilção de informações que serão úteis ao longo do desenvolvimento desse trabalho e que foram obtidas em diversas literaturas que tratam principalmente sobre os processos de transferência de calor, especialmente o de radiação solar, assim como materiais sustentáveis para elaboração de telhas, métodos de medição de temperatura infravermelha, parâmetros térmicos para caracterização de materiais, estado da arte de estudos relacionados ao desempenho térmico de telhados, além das especificações das condições climáticas, de irradiância e de Sol da cidade de Foz do Iguaçu.

No terceiro capítulo, é desenvolvida a metodologia do trabalho, de tipo experimental e computacional, onde são especificados os materiais usados para a realização da pesquisa e são relatados os métodos utilizados para a medição das temperaturas de superfície das telhas mediante termografia infravermelha, assim como no regime transiente com o uso de termopares. Também é explicada a simulação computacional realizada no Software Ansys CFD, as condições de contorno consideradas e os parâmetros térmicos a serem analisados na telha ecológica de fibra vegetal.

No quarto capítulo, é apresentada a discussão dos resultados obtidos experimental e computacionalmente. Além disso, são realizadas comparações entre os materiais estudados e diversas análises sobre as propriedades de cada tipo de telha. Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos nesta área.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A continuação são apresentadas as informações teóricas nas que está baseado este trabalho e que são advindas da literatura relacionada ao tema da pesquisa. De igual modo, serão citados alguns trabalhos relacionados ao estado da arte no desempenho térmico de materiais para telhados e no conforto térmico de ambientes, com o propósito de estabelecer comparações futuras entre esses estudos e a presente dissertação.

2.1 O SOL: FONTE DE ENERGIA SOLAR

O Sol, estrela mais próxima da terra, é a sede de milhões de reações termonucleares que produzem uma enorme quantidade de energia. Este corpo esférico, gasoso e autogravitante é composto principalmente de Hidrogênio. Ele se localiza no centro do sistema solar, aproximadamente a 150 milhões de quilômetros da Terra [10].

A energia emitida pelo Sol é chamada de energia solar ou radiação solar. Apesar da distância considerável entre o Sol e a Terra, a quantidade de energia solar que chega à Terra é substancial. Assim, o Sol é considerado a principal fonte natural de energia da Terra, mesmo que existam outras fontes tais como: o fluxo de calor geotérmico gerado pelo interior da Terra, a radioatividade terrestre natural e a radiação cósmica, que são insignificantes em relação à radiação solar [11].

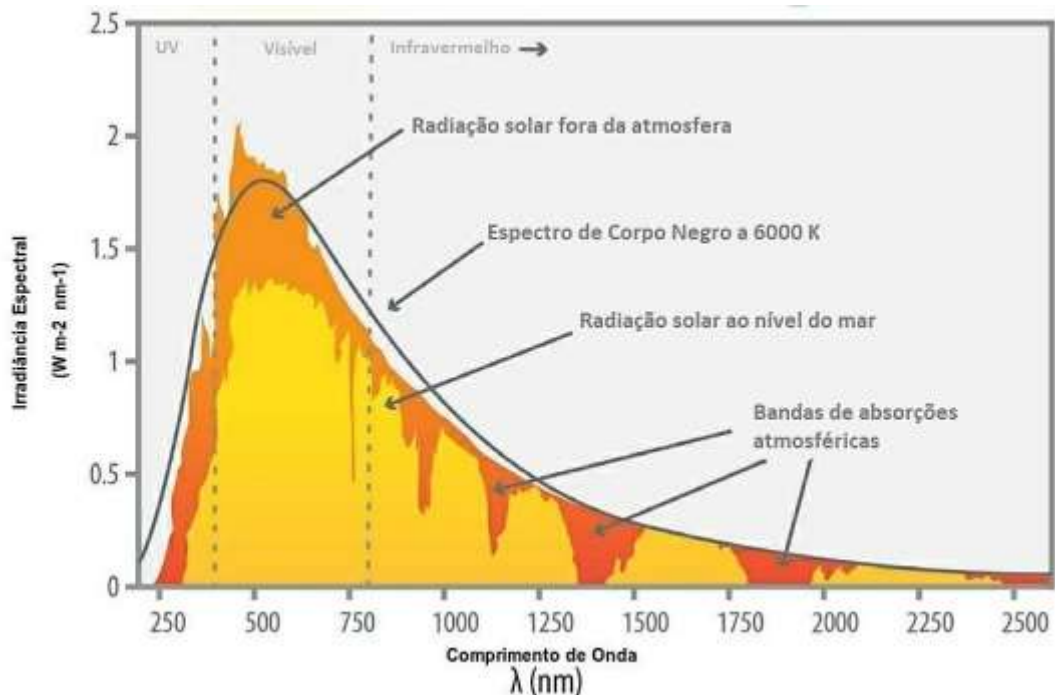
No núcleo interno do Sol, a força gravitacional cria uma pressão que gera a fusão nuclear que transforma o Hidrogênio em Hélio. Nesse processo, uma parte da massa é convertida em uma quantidade abundante de radiação eletromagnética, o que torna o Sol a fonte dominante de energia radiativa no sistema solar. O Sol tem uma estrutura física complexa e consiste em várias regiões, desde o denso núcleo interno até a camada atmosférica externa, a corona. Tanto a corona quanto o núcleo são muito quentes, na ordem de $10^6 - 10^7$ K, enquanto as regiões intermediárias que transportam e emitem energia como radiação de saída são mais frias (embora quentes comparadas aos padrões terrestres) [10].

2.1.1 O Espectro Solar

A distribuição da radiação solar em função do comprimento de onda é chamado de espectro solar. Essa distribuição espectral da radiação extraterrestre é tal que cerca de metade dela se encontra na parte visível do espectro eletromagnético. Outras partes estão nas faixas do infravermelho e do ultravioleta. Essa distribuição espectral é modificada conforme a radiação atravessa a atmosfera; as mudanças são principalmente devido a gases e aerossóis. A quantidade de radiação integrada em todo o espectro é chamada de radiação total ou radiação de banda larga [12].

Na figura 1, é representado o Espectro da Radiação Solar, que mostra as curvas espectrais de intensidade solar antes e depois de passar pela atmosfera; as bandas de absorção e a curva de radiação de corpo negro equivalente à radiação do Sol.

Figura 1. Espectro de Radiação Solar



Fonte: Adaptado de [13]

Dentro do espectro, 99% da radiação eletromagnética está na faixa de 250 a 400 nm. A parte visível do espectro ocupa apenas a faixa de 380 a 800 nm. De 250 a 380 nm existe radiação ultravioleta, e de 800 em diante, radiação infravermelha. Estas duas últimas radiações, embora não visíveis, são de grande importância tanto para o desenvolvimento da vida como para o conforto térmico em espaços fechados [13].

A produção total de radiação do Sol é aproximadamente equivalente à de um corpo negro, que não é mais do que um corpo quente que emite espectros térmicos de carácter universal em uma temperatura próxima de 5800 K [14].

2.1.2 A Constante Solar

A constante solar pode ser entendida como a taxa de transferência de energia solar que chega ao topo da atmosfera terrestre e é recebida em uma superfície perpendicular à direção do Sol. De acordo com [15], o conceito de constante solar pode ser definida como a quantidade de energia radiante do Sol que incide perpendicularmente a uma unidade de superfície na ausência de partículas (topo da atmosfera) a uma distância média Terra-Sol. Ainda, a constante solar pode ser compreendida como a irradiância solar sobre uma superfície normal aos raios solares, à distância média Terra-Sol, na ausência de atmosfera. Este conceito foi introduzido em 1837 por Claude Pouillet [16] que, sob fundamentos teóricos [17], tentou determinar a quantidade de energia por unidade de área que chega à Terra a cada segundo a partir do Sol.

Devido às consideráveis discrepâncias entre os valores de Irradiância Solar Total obtidos por diferentes satélites o conceito de constante solar continua em vigor até hoje, mas com sentido experimental: o valor médio anual da Irradiância Solar Total é **1367 W/m²**, cujo valor é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, por sua sigla em inglês) [18].

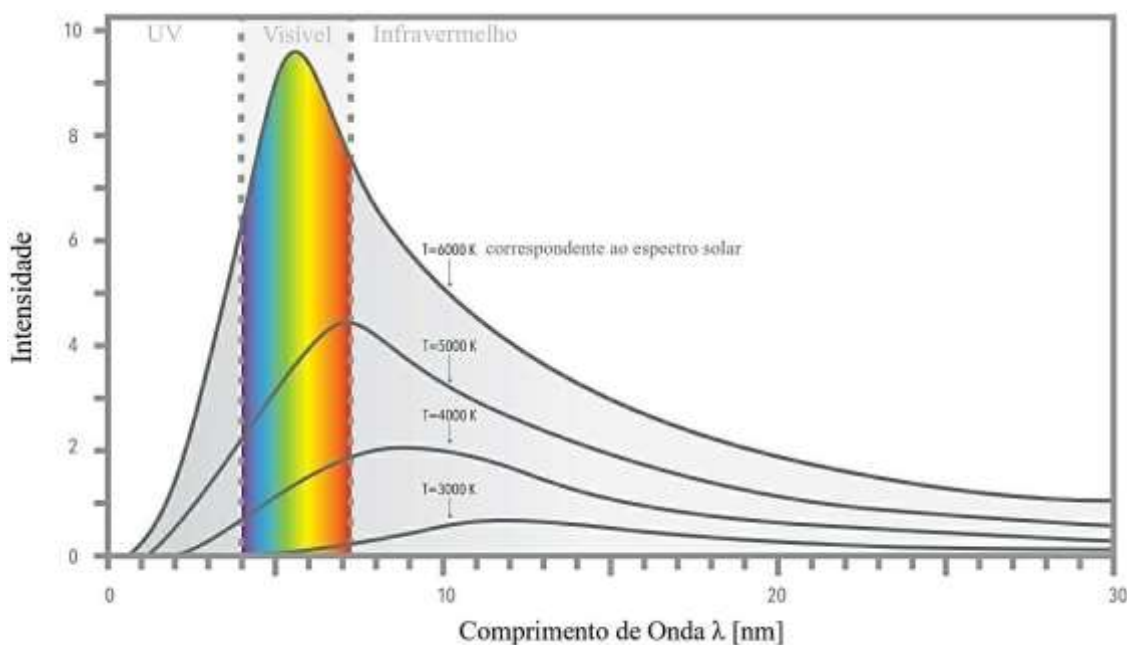
A constante solar varia em +/- 3% por causa da órbita ligeiramente elíptica da Terra em torno do Sol. A distância Sol-Terra é menor quando a Terra está no periélio (primeira semana de janeiro) e maior quando a Terra está no afélio (primeira semana de julho) [19].

2.2 LEI DE WIEN

Quando as ondas eletromagnéticas são espalhadas e detectadas de forma ordenada por meio de prismas, um espectro de radiação é obtido. Assim, a composição espectral dos corpos negros foi determinada. No final do século XIX, o espectro eletromagnético do corpo negro era bem conhecido e modelos teóricos começaram a ser feitos para entender a natureza dessa radiação. Em 1893, o físico alemão Wilhelm Wien derivou a lei que relaciona a temperatura corporal ao comprimento de onda eletromagnética que é emitida com maior intensidade. A relação determina que o comprimento de onda é inversamente proporcional à temperatura. Entende-se então, que quanto mais quente um corpo, ele emitirá radiação com comprimentos de onda menores [13], [20].

Na figura 2, é representado o espectro da radiação do corpo negro para diferentes temperaturas. Observa-se que o máximo da curva ocorre nos comprimentos de onda mais baixos. Esse fato é conhecido como lei do deslocamento de Wien.

Figura 2. Espectro de Radiação do Corpo Negro



Fonte: Adaptado de [13]

A relação de Wien descrita acima nos permite calcular o comprimento de onda da intensidade máxima de radiação de um corpo que está a uma determinada temperatura. Por exemplo, a temperatura do corpo humano em Kelvin é 310 K, então corresponde a $\lambda_{\text{max}} = 9.300 \text{ nm}$, que está localizado no infravermelho.

A radiação solar tem a capacidade de esquentar de forma importante um material. Quando um material se esquentar pela radiação do sol, é devido a que está irradiando em comprimentos de onda em toda uma gama, onde há transições dos estados vibracionais e rotacionais das moléculas do material. Um exemplo clássico desse fenômeno físico é quando dentro dos carros o ambiente fica muito quente já que não há livre circulação de ar, especialmente porque grande parte da radiação infravermelha fica presa. Isso se deve ao fato dos vidros das janelas dos carros ser praticamente opacos em comprimentos de onda superiores a 2.500 nm. Esta é a causa do efeito estufa em espaços envidraçados [21].

2.3 LEI DE PLANK

A radiação eletromagnética pode ser considerada uma onda, caracterizada por seu comprimento de onda λ . Toda radiação eletromagnética viaja na velocidade da luz c ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$) no vácuo (ou c/n em um material com índice de refração n) e tem uma frequência ν tal que $c = \lambda\nu$ [22]. Pela mecânica quântica, a radiação eletromagnética também pode ser considerada um fluxo de fótons, cujo conteúdo de energia em cada fóton depende da frequência. Na radiação eletromagnética com um determinado comprimento de onda λ , um fóton tem a energia:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Em que h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$) [23].

A radiação emitida por um objeto quente como o Sol, ou qualquer objeto nesse sentido, é distribuída em uma faixa de comprimentos de onda e, conseqüentemente, consiste em um fluxo de fótons com diferentes conteúdos de energia. A distribuição da

energia irradiada ao longo dos comprimentos de onda, assim como o fluxo total de energia, depende da temperatura do objeto. Isso pode ser relacionado a um corpo negro, que é um estado idealizado de um objeto em equilíbrio termodinâmico, em que o objeto é um perfeito absorvedor e emissor de radiação. Ou seja, ele absorve toda a radiação incidente sobre ele e emite o máximo possível de radiação [24].

Com base na mecânica quântica e na termodinâmica, um corpo negro pode ser descrito pela lei da radiação de Planck, na qual a distribuição do comprimento de onda da radiação emitida por um corpo negro com temperatura T é dada pela Equação (2):

$$G_{b\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (2)$$

Em que k é a constante de Boltzmann ($1.380 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$). $G_{b\lambda}$ é freqüentemente dado em unidades de $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$. Também podemos expressar essa distribuição em termos de fluxo de fótons, dividindo a potência emitida em cada comprimento de onda pela energia do fóton correspondente, como é mostrado na Equação (3):

$$\phi_{b\lambda} = \frac{\lambda}{hc} G_{b\lambda} \quad (3)$$

em unidades de $\text{s}^{-1}\text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$. Diferenciando a distribuição na Equação (2) com respeito ao comprimento de onda e igualando a zero, o comprimento de onda correspondente ao máximo da distribuição pode ser encontrado. A relação entre este comprimento de onda e a temperatura do corpo negro é:

$$\lambda_{m\acute{a}x}T = 2897.8 \mu\text{mK} \quad (4)$$

que é conhecida como lei de deslocamento de Wien (tratada anteriormente na seção 2.2 deste trabalho) e afirma que o comprimento de onda máximo é inversamente proporcional à temperatura. Outra relação útil, que pode ser obtida integrando a lei de Planck em todos os

comprimentos de onda, é a equação de Stefan-Boltzmann (Equação 5). Ela expressa a radiação total emitida pelo corpo negro:

$$G_b = \int_0^{\infty} G_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (5)$$

na qual, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5.670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$). G_b está em unidades de Wm^{-2} , que casualmente também é a unidade mais usada para radiação solar incidente. As duas últimas equações nos dizem algo fundamental e familiar sobre objetos aquecidos: a equação de Stefan-Boltzmann mostra que a potência total irradiada aumenta com a temperatura do objeto e a lei de deslocamento de Wien mostra que o comprimento de onda de pico diminui com o aumento da temperatura, que, por exemplo, faz com que os metais brilhem mais intensamente à medida que ficam mais quentes [25].

2.4 RADIAÇÃO SOLAR DISPONÍVEL NA TERRA

A radiação extraterrestre é afetada de várias maneiras durante a passagem pela atmosfera. Ao passar pela atmosfera, a radiação solar com incidência normal está sujeita a duas fontes de atenuação: dispersão e absorção [26].

2.4.1 Atenuação Atmosférica

A dispersão ocorre quando a radiação interage com moléculas de ar, água e poeira na atmosfera. O grau de dispersão é determinado pelo comprimento de onda da radiação em relação ao tamanho das partículas, a concentração de partículas na atmosfera e a massa total de ar pela qual a radiação deve se deslocar. O processo mais importante é o espalhamento de Rayleigh, no qual a luz é espalhada pelas moléculas de ar. Este tipo de espalhamento é mais eficaz para comprimentos de onda mais curtos na extremidade azul do espectro, principalmente aqueles menores que $0.6 \mu\text{m}$. Este processo de dispersão explica a cor azul do céu durante o dia, a cor amarela do Sol e o avermelhamento do céu à noite [27]. Isso ocorre porque a maior parte da radiação que atinge o solo a partir de outras direções que

não são diretamente do Sol, é espalhada pela dispersão de Rayleigh. Além disso, é válido destacar que uma quantidade significativa da luz espalhada é redirecionada de volta ao espaço [28].

Por outra parte, a absorção da radiação solar ocorre na faixa de UV devido ao Ozônio e na faixa de infravermelho devido à Água e Dióxido de Carbono. No processo de absorção, a radiação solar é convertida em calor, que é emitido pelas partículas como radiação de onda longa [29].

2.4.2 Massa de Ar e Efeitos dos Gases Atmosféricos na Radiação Solar

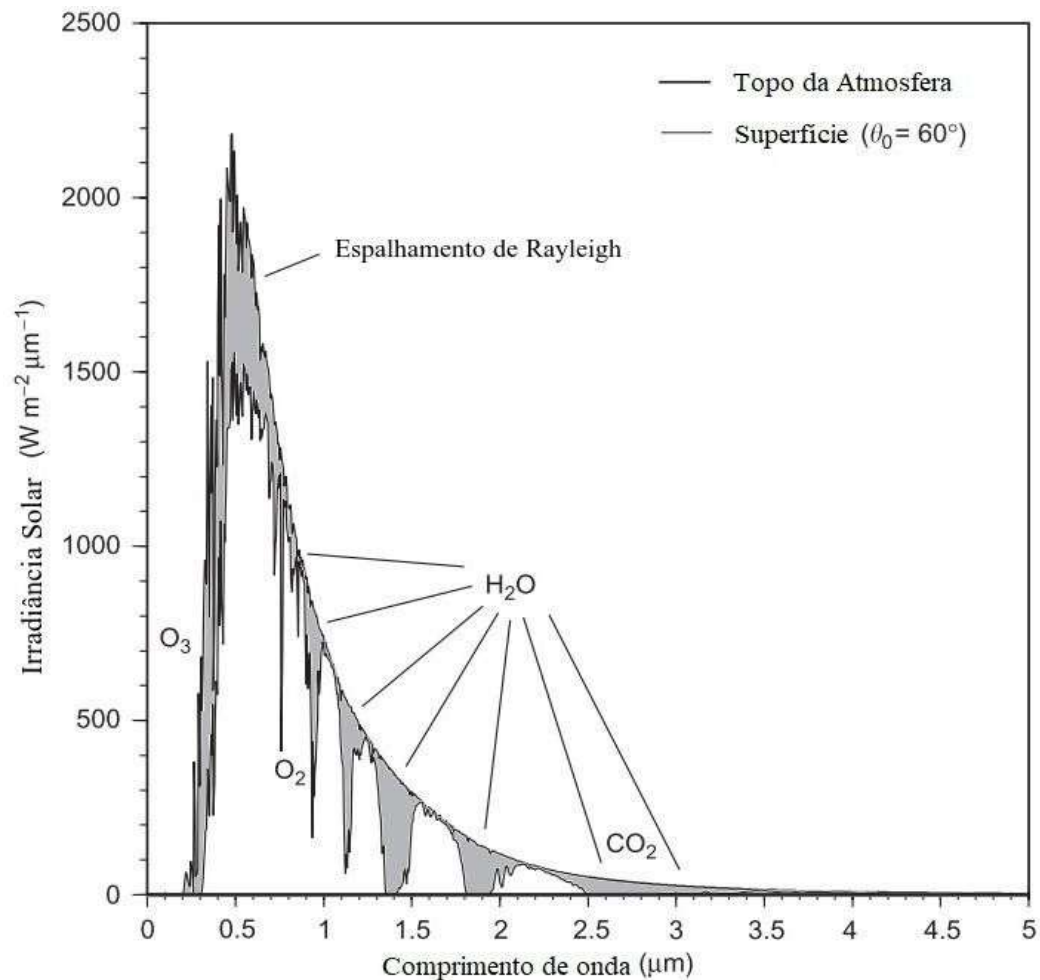
A atenuação da radiação solar depende da distância que a radiação tem que percorrer na atmosfera. Quanto maior o comprimento do caminho, mais partículas a luz tem para interagir. Isso varia ao longo do ano e em dias individuais, levando em conta que o caminho mais longo tem lugar à noite, quando o Sol está próximo ao horizonte. O comprimento do caminho é descrito pela massa de ar. Formalmente, a massa de ar é a razão da massa atmosférica através da qual a radiação passa da posição atual do Sol no céu, para a massa pela qual passaria se o Sol estivesse no zênite (diretamente acima). [10]

Por outro lado, os gases atmosféricos também absorvem a radiação solar em bandas de comprimento de onda selecionadas. A radiação UV com comprimentos de onda menores que $0.3\ \mu\text{m}$ é letal para a biosfera. A radiação UV no intervalo $0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$ é absorvida principalmente pelo O_3 na estratosfera. A pequena quantidade de radiação com comprimentos de onda menores que $0.2\ \mu\text{m}$ é absorvida em níveis mais elevados por O_2 , N_2O e N . Os processos fotoquímicos devido à absorção da radiação solar UV envolvendo várias formas de oxigênio são fundamentais na determinação da quantidade de Ozônio na estratosfera. O espectro de absorção de O_2 entre 0.2 e $0.26\ \mu\text{m}$ é fraco, mas significativo na formação de Ozônio. Na troposfera, a absorção da radiação solar ocorre nas regiões visível e infravermelho, devido principalmente a gases tais como H_2O , CO_2 , O_2 e O_3 . A absorção no visível, porém, é muito fraca [30], [31].

Na Figura 3, é mostrado o esgotamento da radiação solar em uma atmosfera límpida. A curva superior é o espectro solar no topo da atmosfera da Terra e a curva inferior

representa o espectro ao nível do mar; a área sombreada fornece os efeitos combinados de espalhamento e absorção da radiação solar pelos gases atmosféricos. [32].

Figura 3. Espectro Solar no Topo da Atmosfera e na Superfície para um Ângulo Zenital Solar de 60°



Fonte: Adaptado de [32]

2.4.3 Efeitos dos Aerossóis na Radiação Solar

Os aerossóis são suspensões de partículas líquidas e sólidas na atmosfera, excluindo nuvens e precipitação. Os tamanhos das partículas de aerossol variam de 10^{-4} a $10 \mu\text{m}$, caindo nas seguintes categorias amplas: Sulfatos, Carbono Negro, Carbono Orgânico, Poeira e Sal Marinho. As concentrações e composições do aerossol variam significativamente com o tempo e o local. As medições de visibilidade refletem a

concentração de aerossol ao nível do solo. O alcance visual pode variar de alguns metros a 200 km, dependendo da proximidade das fontes, da intensidade das fontes e das condições atmosféricas [33].

Os aerossóis de sulfato espalham principalmente a radiação solar e causam o resfriamento do sistema Terra-Atmosfera. O aumento da radiação solar refletida no topo da atmosfera devido a tais aerossóis não absorventes é quase idêntico à redução da radiação solar na superfície [34]. Por outra parte, aerossóis carbonosos (Carbono Negro e Orgânicos) absorvem e dispersam a radiação solar. A presença de aerossóis de carbono negro resulta na absorção da radiação solar, diminuindo assim a quantidade de radiação que atinge a superfície. Ao mesmo tempo, esses aerossóis absorvem a radiação solar refletida de baixo para cima e reduzem a radiação solar refletida para o espaço. Portanto, o efeito dos aerossóis de carbono negro se opõe ao efeito de resfriamento de outros aerossóis no topo da atmosfera, enquanto na superfície todos os aerossóis reduzem a radiação solar. As mudanças decorrentes do espalhamento do aerossol e da absorção da radiação solar são devidos ao seu forçamento radiativo direto [35]. Porém, os aerossóis também podem modificar a radiação solar por meio de seu papel na condensação de nuvens e como núcleos de gelo, um efeito que no geral é conhecido como forçamento radiativo indireto do aerossol [36].

2.4.4 Efeitos das Nuvens na Radiação Solar

As nuvens são um dos principais constituintes do sistema da atmosfera da Terra que afetam a entrada de energia solar e a saída de energia térmica, além de apresentar complicadas interações com os outros componentes atmosféricos. É muito difícil estimar os efeitos radiativos de nuvens com precisão adequada, devido à sua alta variabilidade temporal e espacial e seus processos químicos complexos [37].

As nuvens cobrem regularmente cerca de 65% da Terra e ocorrem em vários tipos. Alguns, como os cirros nos trópicos e estratos próximos às áreas costeiras e no Ártico, são climatologicamente persistentes. Como os aerossóis, as nuvens apresentam variações espaciais e temporais substanciais. As nuvens são o regulador mais importante da radiação solar. Ao refletir a radiação solar de volta para o espaço, elas resfriam o sistema Terra-Atmosfera (o chamado efeito de albedo de nuvem). As nuvens também absorvem a radiação

solar na região do infravermelho próximo. O resfriamento do sistema Terra-atmosfera pelo efeito albedo das nuvens ocorre principalmente na superfície [35], [38].

O albedo solar de nuvens depende substancialmente do tipo e da forma das nuvens, bem como do ângulo do zênite solar. O diagnóstico mais direto e simples da medida do impacto das nuvens sobre a radiação solar é a força de ondas curtas, que é definida como a diferença das irradiâncias solares líquidas no topo da atmosfera em condições de céu aberto e sem nuvens [39]. Assim, a irradiância líquida é a radiação solar incidente menos a radiação refletida. As medições de satélite sugerem que o forçamento global da nuvem de ondas curtas é de cerca de -45 Wm^{-2} . A força das nuvens de ondas curtas é maximizada (cerca de -120 Wm^{-2}) no hemisfério de verão por volta da Latitude 60° , onde a entrada solar é grande e as nuvens baixas são abundantes, com um máximo secundário nos trópicos. Além disso, é importante reconhecer que pequenas mudanças nos campos de força radiativa da nuvem podem desempenhar um papel significativo nas condições do clima [40].

2.4.5 Radiação Solar na Superfície Terrestre

A radiação vinda diretamente do Sol e recebida na superfície da Terra é chamada de Radiação Solar Direta. A quantidade de radiação espalhada proveniente de todas as outras direções é chamada de Radiação Solar Difusa. A soma de ambos os componentes recebidos em uma superfície horizontal é chamada de Radiação Solar Global [41].

Uma fração significativa da radiação solar de entrada é refletida de volta pela superfície. O albedo da superfície, definido como a proporção do refletido sobre a radiação que chega, depende da natureza da superfície, do ângulo do zênite solar e do comprimento de onda. Para a superfície da Água, o albedo é de cerca de 0.06, enquanto para a neve o albedo é de cerca de 0.6-0.8. O albedo do gelo marinho puro é de cerca de 0,4-0,6. Uma vez que grandes áreas da Terra são cobertas por Água, Neve e Gelo Marinho, as mudanças na cobertura de Neve e Gelo Marinho podem ter um impacto significativo no albedo global. Superfícies de terra nua têm albedo de superfície típico de 0,1-0,35, com o valor mais alto para a areia do deserto. Albedos da maioria das superfícies de vegetação situam-se na faixa de 0,1-0,25. O albedo da vegetação verde depende muito do comprimento de onda, refletindo fortemente no infravermelho próximo, mas absorvendo nas regiões ultravioleta e visível [41], [42].

2.5 TEMPO SOLAR

No mundo inteiro, muitas pessoas acreditam saber a hora aproximada de acordo à posição do sol, inclusive por questões referentes às suas próprias culturas, porém, a hora solar é diferente da hora do relógio padrão. Na verdade, o Sol é um péssimo cronometrista, pelo menos quando a precisão dentro de uma hora é necessária. Isso ocorre porque o movimento aparente do Sol no céu não é uniforme. Em vez disso, uma vez que a órbita da Terra é elíptica e a Terra está inclinada em relação à órbita, o Sol parece acelerar e desacelerar ao longo do ano, às vezes estando à frente de um relógio regular, e às vezes atrasado, até 33 minutos [43]. Isso pode ser corrigido por um fator denominado equação do tempo. Além disso, a hora do relógio padrão é definida de maneira uniforme em todos os fusos horários individuais. Essas zonas variam em largura, mas a mais larga pode levar várias horas para o Sol cruzar, o que dá diferenças substanciais entre a hora padrão e a hora solar para locais distantes dos meridianos padrão. Corrigindo tudo isso, o tempo solar em minutos pode ser calculado mediante a Equação (6):

$$t_s = t_{st} - 4 (L_{st} - L_{loc}) + E(d) \quad (6)$$

Em que t_{st} é a hora padrão em minutos após a meia-noite, L_{st} é o meridiano padrão e L_{loc} é a Longitude do local. O segundo termo faz uso do fato de que o Sol atravessa 1° de Longitude em quatro minutos. Deve-se ter cuidado com o sinal na frente deste termo, que aqui vale para Longitudes contadas ao leste positivo. $E(d)$ é a equação do tempo para o dia (d) do ano,

$$E(d) = 9.87 * \sin \left[\frac{4\pi * (d - 81)}{365} \right] + 7.67 * \sin \left[\frac{2\pi * (d - 1)}{365} \right] \quad (7)$$

É importante considerar que nos países onde existe o horário de verão, se introduz ainda outra diferença de uma hora entre a hora do relógio padrão e a hora solar que deve ser corrigida.

2.6 DIREÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

Em primeiro lugar, é preciso lembrar que qualquer local na Terra pode ser mapeado em um sistema de grade simplesmente fornecendo seus ângulos de Latitude e Longitude. A Latitude (ϕ) é a localização angular ao Norte ou Sul do Equador (geralmente, o Norte é tomado como positivo, $-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$) e Longitude, λ , é a distância angular de um lugar ao Leste ou Oeste do Meridiano de Greenwich [44].

2.6.1 Ângulos Solares

A posição do Sol em relação a esse plano é definida em termos de Latitude e vários outros ângulos principais. Os Ângulos solares [10], [11], [43]–[46], são a melhor forma de entender a posição do sol respecto à terra.

2.6.1.1 Declinação (δ)

A posição angular do Sol ao meio-dia solar em relação ao plano do Equador (Norte positivo, $-23.45^\circ \leq \delta \leq +23.45^\circ$) é chamado de ‘Ângulo de Declinação’. O meio-dia solar é entendido como o momento quando o Sol está no meridiano local. A declinação solar pode ser considerada constante durante qualquer dia para cálculos de engenharia. Porém, ésta varia ao longo do ano de acordo com a Equação de Cooper (Equação 8, magnitudes angulares em graus), dependendo exclusivamente do dia do ano, sendo 1° de Janeiro $n = 1$, e 31 de Dezembro $n = 365$.

$$\delta = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{365} * (284 + n) \right] \quad (8)$$

2.6.1.2 Inclinação (β)

A inclinação é o ângulo entre a superfície considerada (por exemplo um painel solar ou um telhado) e a horizontal. No geral, $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, sendo a inclinação 0° a superfície na horizontal e a inclinação 90° a fachada. Quando a inclinação é maior, até 180°

($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$), significa que a superfície tem um componente voltado para baixo. Não é uma circunstância comum em sistemas solares, embora possa aparecer em balanços de energia em edifícios.

2.6.1.3 Ângulo Azimutal de Superfície: de Orientação (γ)

Este ângulo é o desvio da projeção em um plano horizontal da normal da superfície desde o Sul. Na maioria das referências da literatura, a orientação igual a zero indica Sul, a orientação Leste é negativa e a orientação Oeste é positiva ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$). Diferenças neste critério podem, no entanto, ser encontradas em algumas fontes. O Ângulo de Orientação também é chamado de ‘Ângulo de Azimute de Superfície ou Ângulo Azimutal de Superfície’, e não deve ser confundido com o Ângulo de Azimute Solar ou Azimutal Solar que indica a posição do Sol no céu e que será abordado na seção 2.7.2.

2.6.1.4 Ângulo Horário (ω)

Trata-se do deslocamento angular do Sol para o Leste ou Oeste do meridiano local (zero ao Sul, Leste negativo e Oeste positivo, $-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$). Este ângulo é gerado pela rotação da Terra em torno de seu eixo, cada 15° é uma hora (360° dividido por 24), com sinal negativo pela manhã e positivo à tarde, ao meio-dia $\omega = 0^\circ$ (Equação 9). Para um cálculo correto, a hora deve ser introduzida no formato de 0–24.

$$\omega = 15 * (hora - 12) + \frac{min}{4} + \frac{seg}{240} \quad (9)$$

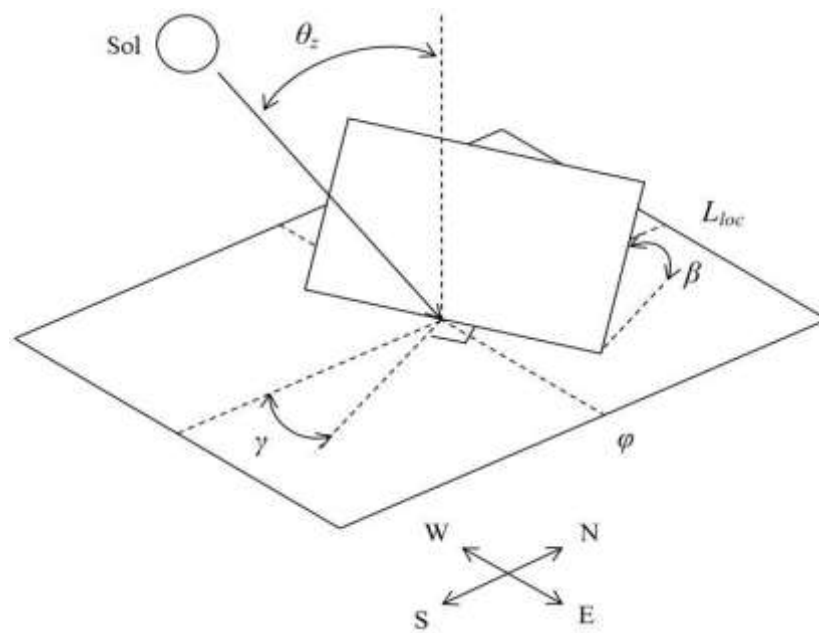
2.6.1.5 Ângulo de Incidência (θ)

É chamado de Ângulo de Incidência o ângulo entre o feixe da radiação direta sobre a superfície e a normal à essa superfície ($-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$). A incidência normal é $\theta = 0$. O ângulo de incidência está relacionado a todos os outros ângulos de acordo com a Equação (10).

$$\cos \theta = \sin(\delta) \sin(\phi) \cos \beta - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \quad (10)$$

Para um plano horizontal, a inclinação do plano seria $\beta = 0$, e a relação acima seria simplificada. Na Figura 4, são apresentados os ângulos que definem a localização e orientação do plano inclinado. Estes são a inclinação do plano β , o ângulo de azimute γ e a Latitude φ . Também são mostrados a Longitude L_{loc} e o ângulo do zênite θ_z , que será explicado no decurso da seção 2.7.

Figura 4. Ângulos de Localização e Orientação do Plano



Fonte: Adaptado de [10]

Na Figura 5, os Ângulos que definem a Posição do Sol em relação à Terra e à Esfera Celestial são mostrados; a Declinação δ e o Ângulo Horário ω .

2.7.2 Ângulo de Azimute Solar (A)

Deslocamento angular do Sul da projeção do feixe de radiação no plano horizontal. (Em geral, $A = 0$ é igual a Sul, $A < 0$ é Leste e $A > 0$ é Oeste). No entanto, podem ser encontradas referências diferentes na literatura).

Uma vez que esses os ângulos de Altitude e de Azimute sejam estabelecidos, será possível definir exatamente a quantidade de energia solar que atinge o ponto na Terra onde a superfície a ser avaliada se encontra (por exemplo um sistema solar térmico, fotovoltaico, híbrido ou simplesmente o telhado de uma casa) [46].

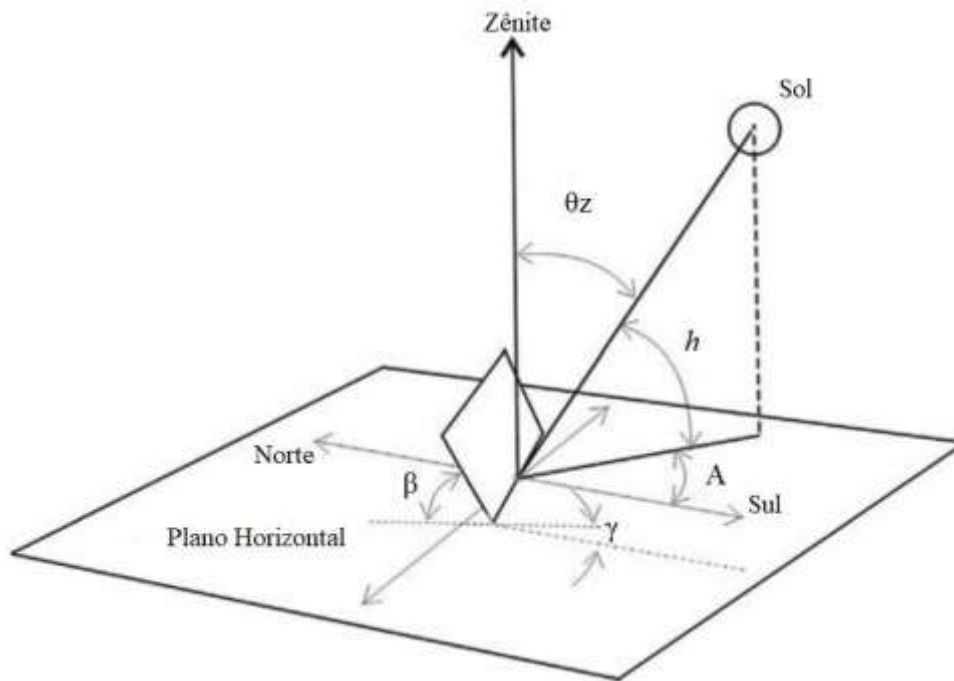
Existem duas maneiras principais de determinar a posição do Sol no céu através do Ângulo da Altitude Solar e do Ângulo do Azimute Solar: através das expressões matemáticas correspondentes (Equações 11 e 12; ângulos em graus) ou usando os mapas solares. Ambas as opções requerem informações sobre Latitude, Declinação e Ângulo Horário e, é claro, levam aos mesmos resultados; o caminho analítico, embora tradicionalmente mais lento, sempre levará a resultados mais precisos. Hoje em dia a disponibilidade de computadores pode tornar desnecessária a opção de desenho. No entanto, esta alternativa ainda está sendo utilizada porque ajuda muito na compreensão do movimento solar [44].

$$h = \arcsen(\sen \phi * \sen \delta + \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega) \quad (11)$$

$$A = \arccos \left(\frac{\cos \delta * \cos \omega - \sen h * \cos \phi}{\cos(h) * \sen \phi} \right) \quad (12)$$

Na Figura 6, é possível apreciar a relação entre os Ângulos de Altitude, de Zênite e de Azimute Solar, assim como alguns outros ângulos que já foram tratados anteriormente e que ajudam na percepção da localização do Sol no céu.

Figura 6. Ângulos da Posição do Sol no Céu: Altitude e de Azimute.



Fonte: Adaptado de [44]

2.8 RADIAÇÃO SOBRE SUPERFÍCIES INCLINADAS

De acordo com [47], [48], para desenvolver estudos nas mais diversas áreas que envolvem a radiação solar, é necessário conhecer a intensidade com que esta incide sobre uma superfície inclinada e sua variação sazonal por um período mínimo de um ano até cinco anos. Contudo, saber de forma experimental a quantidade de radiação solar que chega em uma superfície inclinada de forma direta ou difusa, requer de equipamentos e procedimentos que representam altos custos. Por esse motivo, vários modelos teóricos de estimativa têm sido desenvolvidos ao longo dos anos.

Um dos modelos estimativos é apresentado de forma sucinta em [49], onde se expressa que:

“A radiação total diária $H_{\beta T}^d$, que incide em uma superfície inclinada, com um ângulo β de inclinação em relação à superfície horizontal, é dada pela soma das irradiações direta $H_{\beta d}^d$, difusa $H_{\beta a}^d$, e refletida pelo solo $H_{\beta r}^d$, isto é:

$$H_{\beta T}^d = H_{\beta b}^d + H_{\beta d}^d + H_{\beta r}^d \quad (13)$$

A irradiação direta que atinge a superfície inclinada, é calculada através da correção da irradiação direta projetada na horizontal $H_{\beta h}^d$, dada pela seguinte expressão:

$$H_{\beta b}^d = H_{\beta h}^d * R_b \quad (14)$$

Em que,

$$R_b = \frac{\cos \theta \beta}{\cos \theta z} \quad (15)$$

é o fator de correção devido à mudança no Ângulo de Incidência dos Raios Solares sobre a superfície inclinada, θz é o Ângulo Zenital do Sol e $\theta \beta$ é o Ângulo de Incidência dos Raios Solares sobre uma superfície inclinada com a face voltada para o Equador. Esse tratamento matemático para a irradiação direta que incide numa superfície inclinada, é comum à maioria dos modelos encontrados na literatura.”

Também existem modelos estimativos para calcular a radiação difusa sobre superfícies inclinadas, porém, esse tema não será abordado dado que foge ao escopo do presente trabalho.

2.9 OPTIMIZAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE

De acordo com [50], [51], algumas regras gerais podem ser elaboradas para maximizar a coleta de radiação solar durante um certo período de tempo sobre uma superfície. Em geral, a superfície deve ser orientada de modo que o Ângulo de Incidência θ seja o mais próximo possível de zero, tão frequentemente quanto possível.

Para uma superfície fixa, não há problema em encontrar uma orientação que seja abaixo da ideal, porém, deve ser a melhor possível por um longo período de tempo.

O Ângulo de Azimute γ deve ser escolhido de forma que a superfície pegue o Sol quando ele estiver em seu ponto mais alto no céu. No hemisfério Norte, a superfície

deve ser direcionada para o Sul e no hemisfério Sul para o Norte. As exceções incluem se houver algum objeto sombreando o Sol (se houver sombreamento no Leste, a superfície deve ser orientada para Oeste e vice-versa).

A inclinação da superfície β depende da estação para a qual a superfície ou o sistema é otimizado. O verão favorece ângulos de inclinação mais baixos, e no inverno se requer de inclinações maiores. Para locais ao redor de 30° do Equador, a coleta anual de energia é otimizada quando a inclinação é definida aproximadamente igual à Latitude. Em Latitudes mais altas, ângulos de inclinação mais baixos são mais favoráveis no verão, porque mais energia está disponível nesta estação do que em Latitudes mais baixas.

2.10 ATRASO TÉRMICO E FATOR DECREMENTAL

De acordo com [52], [53], O atraso térmico (ϕ) e o fator decremental (f) são parâmetros muito importantes para determinar a capacidade de armazenamento de calor de qualquer material. O tempo que leva para a onda de calor se propagar da superfície externa para a superfície interna é chamado de ‘atraso térmico’ e a razão entre a amplitude de temperatura na superfície do material e a amplitude de temperatura externa para um período de 24 horas é chamado de ‘fator decremental’. Mediante a Equação (16), é possível calcular o atraso térmico de um material.

$$\phi = t_{T \text{ sup } \acute{m}ax} - t_{T \text{ ext } \acute{m}ax} \quad (16)$$

Em que,

$t_{T \text{ sup } \acute{m}ax}$: Hora em que ocorre a temperatura máxima na superfície do material [h];

$t_{T \text{ ext } \acute{m}ax}$: Hora em que ocorre a temperatura máxima no ambiente externo [h].

Por outra parte, é possível determinar o fator decremental usando a expressão:

$$f = \frac{T_{\text{sup máx}} - T_{\text{sup mín}}}{T_{\text{ext máx}} - T_{\text{ext mín}}} \quad (17)$$

Na qual,

$T_{\text{sup máx}}$: Temperatura máxima na superfície do material [°C];

$T_{\text{sup mín}}$: Temperatura mínima na superfície do material [°C];

$T_{\text{ext máx}}$: Temperatura máxima no ambiente externo [°C];

$T_{\text{ext mín}}$: Temperatura mínima no ambiente externo [°C].

2.11 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A tecnologia moderna hoje torna possível detectar a radiação infravermelha e, assim, medir a temperatura de grandes objetos à distância e sem contato físico [54]. O desenvolvimento de câmeras termográficas nos fornece imagens térmicas de materiais e construções. Esta se tornou uma ferramenta muito útil na construção civil para detectar inúmeras peculiaridades invisíveis ao olho humano em uma edificação que levam a mudanças de temperatura, tais como: fontes de umidade, perda de isolamento térmico, danos a tubulações, rachaduras, etc [55].

As termografias do revestimento de uma casa ou um edifício, por exemplo, mostram as zonas de maior e menor temperatura ao longo do dia, o que nos permite conhecer a relação entre a absorção e a emissão da radiação solar pelos diferentes materiais do referido revestimento das paredes ou do telhado [56].

Dispositivos de medição termográfica adquirem a radiação infravermelha emitida por um objeto e a transformam em um sinal eletrônico. Os dispositivos mais avançados incluem uma série de sensores para produzir um infravermelho detalhado da

imagem da cena. A diferença entre uma imagem visível e uma imagem infravermelha é que a imagem visível é uma representação da luz refletida na cena, enquanto na imagem infravermelha, a cena é a fonte e pode ser observada por uma câmera infravermelha sem luz [57]. Imagens adquiridas por câmeras termográficas são convertidas em imagens visíveis ao atribuir uma cor a cada nível de energia infravermelho. O resultado é uma imagem de cor falsa chamada termograma [58].

A termografia infravermelha tem muitas vantagens sobre outras tecnologias. Em geral, as principais vantagens são [59]:

- É uma tecnologia sem contato: os dispositivos usados não estão em contato com a fonte de calor, ou seja, eles são termômetros sem contato. Desta forma, a temperatura de objetos extremamente quentes ou produtos perigosos, como ácidos, podem ser medidos com segurança, mantendo o usuário fora de perigo;
- Fornece imagens térmicas bidimensionais, que fazem uma comparação entre as áreas do alvo possível;
- É em tempo real, o que permite não apenas a varredura de alta velocidade de alvos estacionários, mas também aquisição de alvos de movimento rápido e de padrões térmicos de mudança rápida;
- Não tem nenhum dos efeitos nocivos de tecnologias radioativas, como imagens de raios-X. Portanto, é adequado para uso prolongado e repetido;
- É uma técnica não invasiva. Assim, não se intromete ou afeta o alvo de forma alguma.

2.11.1 Medição de Temperatura

A temperatura é uma das grandezas físicas medidas com mais frequência. A medição de temperatura fornece informações sobre a energia interna do objeto, portanto sua regulação e controle são de vital importância em muitos processos de avaliação de materiais [60].

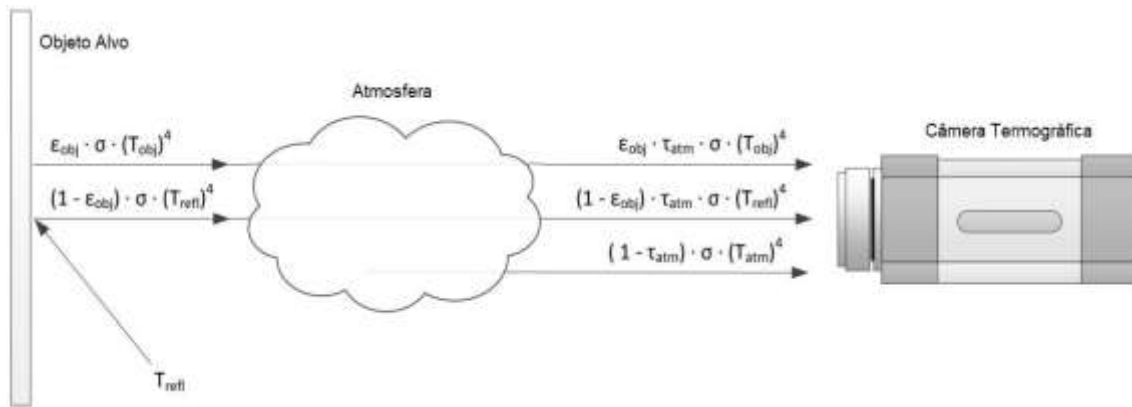
A medição de temperatura usando termografia infravermelha mede a radiação infravermelha emitida por um objeto e converte a energia detectada em um valor de temperatura. No entanto, como nem toda a radiação recebida vem do objeto alvo, para medir a

temperatura com precisão, a radiação de outras fontes (como objetos circundantes ou a atmosfera) devem ser removidos na conversão para temperatura. Este processo é chamado de ‘compensação’[61].

A radiação total recebida pela câmera (W_{tot}) vem de três fontes: a emissão do objeto alvo (E_{obj}), a emissão do entorno e refletida pelo objeto (E_{refl}) e a emissão da atmosfera (E_{atm}). Essa relação é expressada na Equação (24). O processo é ilustrado na Figura 7 [62].

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} \quad (24)$$

Figura 7. Radiação Recebida pela Câmera Termográfica



Fonte: Adaptado de [62]

A primeira fonte é a emissão do objeto alvo. No entanto, nem toda radiação emitida pelo objeto alvo é recebida pela câmera; em função da transmitância da atmosfera (τ_{atm}). Assim, a emissão do objeto alvo pode ser expressa como Equação (25).

$$E_{obj} = \varepsilon_{obj} * \tau_{atm} * \sigma * (T_{obj})^4 \quad (25)$$

Na qual,

ε_{obj} : emissividade o objeto;

τ_{atm} : transmitância da atmosfera;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann;

T_{obj} : temperatura do Objeto.

Corpos cinzentos têm uma refletividade maior que zero. Assim, eles refletem a radiação infravermelha emitida pelos arredores. A refletividade pode ser calculada a partir da emissividade. Parte dessa radiação refletida também é absorvida pela atmosfera. Este é o segundo componente recebido pela câmera e pode ser expresso mediante a Equação (26).

$$E_{refl} = \rho_{obj} * \tau_{atm} * \sigma * (T_{obj})^4 = (1 - \varepsilon_{obj}) * \tau_{atm} * \sigma * (T_{refl})^4 \quad (26)$$

Em que,

ρ_{obj} : refletividade do objeto;

T_{refl} : temperatura refletida pelo objeto

O terceiro componente é a emissão de radiação infravermelha da atmosfera. Isto pode ser expresso mediante a Equação (27), onde $(1 - \tau_{atm})$ é a emitância da atmosfera.

$$E_{atm} = \varepsilon_{atm} * \sigma * (T_{atm})^4 = (1 - \tau_{atm}) * \sigma * (T_{atm})^4 \quad (27)$$

Substituindo as Equações (25) - (27) em (24), a Equação (28) é obtida. Portanto, a temperatura do objeto pode ser calculada a partir da Equação (29). Equações semelhantes são usadas por diferentes fabricantes de câmeras termográficas ao redor do mundo.

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj} * \tau_{atm} * \sigma * (T_{obj})^4 + (1 - \varepsilon_{obj}) * \tau_{atm} * \sigma * (T_{refl})^4 + (1 - \tau_{atm}) * \sigma * (T_{atm})^4 \quad (28)$$

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) * \tau_{atm} * \sigma * (T_{refl})^4 - (1 - \tau_{atm}) * \sigma * (T_{atm})^4}{\varepsilon_{obj} * \tau_{atm} * \sigma}} \quad (29)$$

Para resolver a Equação (29), os seguintes parâmetros devem ser fornecidos: a emissividade do objeto (ϵ_{obj}), a temperatura refletida (T_{refl}), a transmitância da atmosfera (τ_{atm}) e a temperatura da atmosfera (T_{atm}) [62], [63].

A transmitância da atmosfera é geralmente estimada usando a distância do objeto à câmera e a umidade relativa. Em geral, esse valor é muito próximo de um. A temperatura da atmosfera é obtida usando um termômetro comum. No entanto, como a emissividade da atmosfera é muito próxima de zero ($1 - \tau_{atm}$), este parâmetro tem pouca influência na medição da temperatura [63].

Por outro lado, a emissividade do objeto e a temperatura refletida têm uma influência muito alta na medição de temperatura e devem ser medidas com muita precisão [64]. Porém, no presente trabalho será dispensada a realização desses cálculos, devido a que será usada uma câmera termográfica de alta tecnologia que possui a capacidade de fornecer essas informações em tempo real.

2.12 MATERIAIS PARA TELHAS

Desde os primórdios da humanidade, as telhas são componentes usados nas construções com o fim de proteger às pessoas das intempéries, possuindo diversas propriedades, como por exemplo, o isolamento térmico e acústico. As características de uma boa cobertura são principalmente: a impermeabilidade da água; a resistência aos agentes externos, como ventos e oscilações de temperaturas; a inalteração da forma; a longa duração; um custo-benefício razoável; uma fácil manutenção; e possuir um comportamento físicoresistente às dilatações e contrações dos materiais que a compõem [65].

De acordo com [66], na idade antiga eram usadas as telhas feitas de pedra - a ardósia. Com o passar do tempo, outros materiais começaram a ser utilizados na construção civil e se tornaram comuns, tanto que alguns deles se usam ainda nas construções modernas, como é o caso da telha de cerâmica e da telha com fibra de cimento. Com a evolução da engenharia de materiais, foram aparecendo diversos designs de telhas, com diferentes matérias primas em sua composição, oferecendo variedade, com opções para utilização em vários tipos de edificações e em diversas regiões do mundo, com diferentes climas.

Assim, pode-se apreciar no mercado mundial a comercialização de telhas de concreto, de cimento, de alumínio, de zinc, de policarbonato, de PVC, etc.

Entretanto, essas telhas demandam grande quantidade de recursos naturais para sua fabricação, além de altos custos de produção. A ABNT [7], [67]–[69], e a ASTM [14], [70], têm estabelecido requisitos para a fabricação deste tipo de telhas. Porém, essas normas se preocupam principalmente com parâmetros técnicos, sem atentar para os quesitos de sustentabilidade referentes às telhas. As denominadas ‘Telhas Ecológicas’ e as ‘Telhas de Tetra Pak’, surgiram mais recentemente como alternativa às telhas convencionais, cujas matérias primas, em geral, provêm de extração mineral, tão prejudicial ao meio ambiente. Elas usam em sua formulação material reciclado ou proveniente de manejo florestal (madeira e outras fibras vegetais) [66]. Por ser um produto novo no mercado, pouca literatura há acerca destes materiais, o que reforça a justificativa dessa pesquisa como uma forma de trazer mais informações sobre esse tipo de telhas.

Assim, são apresentadas a continuação algumas informações sobre os quatro tipos de telhas que serão estudadas no presente trabalho: Telhas de Fibrocimento, Telhas com Revestimento de Tintas Frias (tinta branca), Telhas de Tetra Pak e Telhas Ecológicas.

2.12.1 Telhas de Fibrocimento

As Telhas de Fibrocimento chegaram ao mercado brasileiro na década de 1940 e são amplamente usadas, desde então, na construção civil. Esse tipo de telha utiliza-se principalmente em coberturas de habitações populares, de edifícios e de galpões. O uso desse material é altamente criticado pelos ambientalistas, devido ao fato da sua composição conter minérios explorados na natureza, dentre eles o amianto, prejudicial à saúde humana e com uso banido em vários países do mundo, incluindo o Brasil. Esse tipo de telhas podem-se classificar de acordo ao perfil e à capacidade de carga, assim, elas podem ser onduladas ou estruturais. Estas telhas se compõem de uma mistura de água, cimento, calcário, fibra de amianto crisotila, celulose e lama de cal [66].

Fabricantes como BRASILIT [71] ou ETERNIT [72], seguem as normativas brasileiras correspondentes de fabricação, oferecendo telhas de fibrocimento cujos comprimentos variam de 1.22 m até 3.66 m, suas larguras de 0.50 m até 1.10 m e espessuras de 5mm até 8mm.

O aspecto superficial das telhas de fibrocimento tende a ser variável, devido às diferentes origens do cimento utilizado na sua fabricação, dessa maneira, é comum que se apresentem na cor cinza, porém, existem algumas telhas brancas no mercado.

Por outra parte, é pertinente esclarecer que há disponíveis na literatura técnica dos fabricantes de telhas de fibrocimento, algumas características de desempenho térmico, como é mostrado na Tabela 1, na qual se observa que esse tipo de telha absorve aproximadamente metade da radiação solar global incidente.

Tabela 1. Desempenho Térmico Telhas de Fibrocimento

Produto	Refletância (R%)	Emitância (E%)	Índice de Refletância Solar (IRS%)	Temperatura da Superfície da telha (°C)
Telha de Fibrocimento	51.1	93.0	61.0	59.4

Fonte: Adaptado de [71]

O desempenho térmico das telhas de fibrocimento pode ser afetado por causa do envelhecimento natural do material, principalmente pelo processo de carbonatação, pela decoloração e pela criação de mofo nas telhas [73].

2.12.1.1 Amianto ou Asbesto

“As palavras asbesto e amianto originam-se do grego (asbestos) e do latim (amianthus) e significam “incombustível” e “incorrutível”, respectivamente. Estes dois significados referem-se às suas propriedades físico-químicas de isolamento térmico; alta resistência a temperaturas, choques mecânicos, produtos químicos, microorganismos e abrasão; boa capacidade de filtragem, isolamento elétrico e acústico; incombustibilidade; durabilidade; flexibilidade e alta afinidade por outros compostos formando matrizes estáveis, como cimentos, resinas e ligantes plásticos. Essas características físico-químicas garantiram e ainda garantem o amplo uso do amianto nos processos industriais, em especial na indústria de construção civil” [8].

De acordo com as informações do livro “O Caso do Amianto: Os limites das Soluções” [74], na legislação interna brasileira, os atores nacionais – públicos e privados – defensores da continuidade do uso do amianto invocam a Lei nº 9.055/95, que dispõe sobre a extração, industrialização, utilização, comercialização e transporte do asbesto/amianto e derivados. Essa lei proíbe a exploração e uso do ‘amianto azul’ e do ‘amianto marrom’, permitindo apenas a realização de tais atividades com o ‘amianto branco crisotila’. Nesse sentido, o Brasil é o terceiro maior produtor de amianto, sendo precedido pela Rússia e pela China. Embora exista uma queda interna na produção de amianto, o Brasil passou do 5º para o 3º lugar no ranking mundial no ano de 2016, dado que demonstra a prevalência de políticas estatais dirigidas e praticadas para preservar os interesses econômicos, em detrimento dos problemas de saúde e ambientais que o amianto provoca. É válido destacar que o amianto brasileiro deriva da mina de Cana Brava, única lavra de crisotila em produção no território nacional e que está localizada em Minaçu – Goiás [75], [76].

Por outra parte, é importante mencionar que para substituir o amianto, começaram-se usar fibras sintéticas, que possuem algumas vantagens como o aumento da capacidade de deformação, resistência a impactos e a minimização do aparecimento de fissuras nas telhas. Algumas entidades consideram essa aplicação sustentável, devido à possibilidade de se reciclar produtos derivados do plástico (polipropileno) e utilizá-los na fabricação de produtos de fibrocimento [77]. A tecnologia do uso de fibras sintéticas na fabricação do fibrocimento é normatizada no Brasil por meio da NBR 15210 [78].

2.12.2 Telhas com Revestimento de Tintas Frias

Uma forma de aumentar os índices de refletância das telhas e das coberturas de edifícios é mediante o uso de tintas frias como revestimento. Chama-se de tintas frias às tintas de cores claras ou refletivas [70].

Estudos como os realizados por [79], desmostram que as tintas que contêm pigmentos refletivos ao infravermelho apresentam refletância solar superior às tintas convencionais de cores correspondentes. Além disso, é demonstrado que tintas frias coloridas mantêm temperaturas superficiais inferiores às tintas convencionais, tal como tem sido provado por diversas pesquisas como as de [70], [80]. Nesse estudo, também é mencionado que no Brasil, ainda é incipiente o desenvolvimento de tintas frias com pigmentos que apresentem baixa absorvência à radiação infravermelha.

Dos poucos produtos disponíveis comercialmente para diminuir a absorção de calor pelas superfícies, a maior parte é composta de tintas de cor branca, algumas com a presença de cargas especiais como as microesferas cerâmicas. No entanto, resultados da pesquisa realizada por [81] evidenciaram que o grande potencial de uso das tintas brancas com microesferas cerâmicas é devido principalmente à elevada refletância solar que as mesmas apresentam, e não necessariamente pela presença das microesferas.

Uma forma de realizar o revestimento das telhas é mediante o uso de pinturas à base de cal, que assumem a cor branca depois de aplicadas e secas, sendo uma boa alternativa de revestimento frio. No livro “Pintura à base de Cal” [82], é apresentada uma visão detalhada desse tipo de tinta, que é utilizada desde os tempos da civilização egípcia. Além da cal, a tinta pode utilizar aditivos orgânicos e inorgânicos, e outros insumos para modificação de cor e melhoria de reologia. Também é preciso saber que além da cor, a tinta à base de cal é mais resistente ao crescimento de microrganismos, especialmente se não houver adição de compostos orgânicos. No entanto, o uso da cal em revestimento externo e, particularmente, como tinta de cobertura não é aconselhável em regiões de chuva intensa, pois nessa situação pode sofrer solubilização ou lixiviação de Carbonatos e Hidróxidos da tinta [83], [84].

O estudo realizado por [84], confirma a elevada refletividade das pinturas à base de cal e afirma que essa propriedade é resultado da coloração branca, obtida após a secagem da pintura. Assim, à medida que se acrescentam demãos de pintura, há incremento no valor de refletância, até o máximo de três demãos. Além, no mesmo estudo foram realizados ensaios de emissividade térmica e demonstrou-se a alta capacidade do material revestido em reemitir calor para o ambiente. Porém, é válido reconhecer que a emissividade não é afetada pelo número de demãos de pintura de cal sobre as superfícies.

2.12.3 Telhas de Tetra Pak

As embalagens Tetra Pak-®, também conhecidas como longa vida, são amplamente usadas no mundo inteiro na indústria e comércio de bebidas e alimentos, devido às suas propriedades assépticas e à sua composição, já que possuem várias camadas de diferentes materiais como celulose (papel, 63%), polietileno de baixa densidade (30%) e alumínio (7%). Estes materiais criam uma barreira que impede a entrada de luz, ar, água e microrganismos.

Ao mesmo tempo, não permite que o aroma dos alimentos saia da embalagem. Entretanto, essas embalagens são descartadas com frequência, contribuindo para o aumento da poluição ambiental dada a sua decomposição tardia e sua difícil reciclagem, pois há necessidade de separação dos diferentes materiais que a compõem. Assim, uma solução viável para esse problema é a utilização das embalagens descartadas na fabricação de telhas ou coberturas [85], [86].

Segundo [87], o processo de fabricação das telhas consiste na fusão do material sob pressão e posterior resfriamento. Primeiramente, o polietileno contendo alumínio é triturado em pequenos fragmentos usando-se moinhos de faca. A redução do tamanho do material facilita sua fusão e proporciona maior homogeneidade ao produto final. Após trituração, o material é disposto em formas, para formatação das chapas. Essas formas repletas de polietileno-alumínio são introduzidas em prensas utilizadas para a produção de placas de compensado. Por último, após de ocorrer a fusão do polietileno, as placas passam por processo de resfriamento.

Conforme afirma o estudo realizado por [88], a telha ondulada feita de Tetra Pak é durável e muito resistente ao tempo, quando comparada a outros tipos de telhas. Devido a que é aluminizada, além da durabilidade e resistência, ela reflete a luz solar, oferecendo conforto térmico aos ambientes e diminuindo as consequências do efeito estufa gerado pelas altas temperaturas. Dessa forma, as telhas feitas de Tetra Pak podem representar uma sensível redução no gasto com mantas isolantes térmicas, devido a que o alumínio contido na telha chega a isolar a temperatura de 25 a 30%.

O material longa vida, além de ser atóxico, apresenta uma característica importante que é a leveza, dado que o peso da telha reciclada é aproximadamente 12 kg, isto é, metade do peso do modelo convencional de fibrocimento. Isso acaba gerando mais uma série de facilidades, principalmente em relação ao transporte, além de diminuir riscos de segurança no trabalho, já que se alguma telha cair durante sua colocação no telhado, ela não vai quebrar ou causar maiores danos em quem faz a sua instalação [89].

2.12.4 Telhas Ecológicas de Fibra Vegetal

As telhas ecológicas feitas a partir de fibras vegetais são uma alternativa sustentável quando se fala de materiais para construção. Esse tipo de telha foi desenvolvido na

França e posteriormente em outros países da Europa nos primeiros anos do século XXI por uma empresa chamada ‘Onduline’, inclusive, as telhas comumente são conhecidas como ‘telhas onduline’ ou ‘telhas ecológicas onduline’, devido ao nome do seu principal fabricante no mundo, o qual produz ao redor de dois milhões de telhas ecológicas por ano. No Brasil, as telhas ecológicas de fibra vegetal têm ganhado um lugar no mercado principalmente a partir da década de 2010, no entanto, para muitas pessoas é um tipo de telha ainda desconhecido [90], [91].

“As telhas ecológicas podem ser elaboradas a partir de fibras de não- madeiras como sisal, bananeira e coco e com fibras de madeiras como pinho e eucalipto. Também existem as produzidas com fibras vegetais de papel reciclado, como é o caso das telhas Onduline. Por serem sustentáveis, a cada nove telhas fabricadas, uma árvore é poupada no processo” [90], [92].

Conforme a pesquisa realizada por [90] e de acordo com as informações dos diversos catálogos disponibilizados pelo fabricante [92], [93], para iniciar a fabricação das telhas, é preciso adquirir papel e papelão reciclado. “Depois, o material é dissolvido em água quente com o fim de extrair a fibra celulose. Uma vez que se haja realizado este processo, uma máquina centrífuga retira as impurezas da massa para deixá-la lisa, além, clips e grampos são descartados. Logo, a massa é esticada e exposta em uma esteira aquecida para eliminar qualquer vestígio de água na telha. Ao sair, uma camada de resina e pigmentação orgânica é aplicada ao material que, em seguida, passa por uma forma onde ganha as ondulações, regulares ou não. Após a secagem, a telha é cortada e impermeabilizada. Assim que o corte é feito, as telhas são mergulhadas em betume, que oferece impermeabilização, resistência e proteção UV, para manter a cor e evitar a descamação do produto. Através desse processo, passam a absorver apenas 0.0003% de água, mesmo sendo reciclada e com o peso muito leve: 3.9 kg/m². Após estarem secos, os produtos estão prontos para o consumidor. Essas telhas ecológicas duram em média 30 anos. A empresa atua na indústria de construção civil com produtos sustentáveis dentro do seu processo de produção, utilizando recursos que são reciclados e reaproveitados. Na fábrica, por exemplo, o consumo total de energia é de 2.8 Kwh por m² de telha (energia elétrica e gás natural). A Água é reaproveitada, pois o circuito é fechado, havendo apenas a reposição do que é evaporado” [90].

“Algumas características dessa classe de telhas são: leveza, resistência, baixa absorção térmica e acústica, fácil manuseio e instalação, impermeabilidade, flexibilidade, anticorrosão, não quebram e não representam riscos para quem realiza a sua instalação.

O custo dessas telhas é em torno de 10% mais caro que as de cerâmicas convencionais. Mas considerando o conjunto (estrutura e tempo de mão-de-obra), seu valor é inferior. Um bom comparativo entre as telhas ecológicas da Onduline com as telhas cerâmicas é que as telhas de barro consomem 58.90% a mais de materiais do que o telhado feito com o material ecológico. Já em relação às telhas de fibrocimento, o telhado consome em torno de 27.8% a mais de madeira e 1.3% a mais de materiais do que o telhado de telha ecológica”[90], [92].

2.13 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EM FOZ DO IGUAÇU

Há uma diferença entre os conceitos ‘tempo’ e ‘clima’. A literatura relacionada à área de meteorologia, comumente define o estado do tempo como o estado atmosférico em um determinado local de forma momentânea. Nesse sentido, o tempo está sujeito a diversas mudanças. Por exemplo, pela manhã pode estar frio; no período da tarde pode estar quente, havendo então uma variação de temperatura em um curto espaço de tempo. Esses câmbios não se reduzem só à temperatura, já que também podem estar relacionados à umidade do ar, à ocorrência ou não de chuvas etc. Fatores como pluviosidade (chuva), umidade relativa do ar, nuvens e radiação solar atuam diretamente nas condições atmosféricas de um determinado lugar, influenciando, então, o tempo.

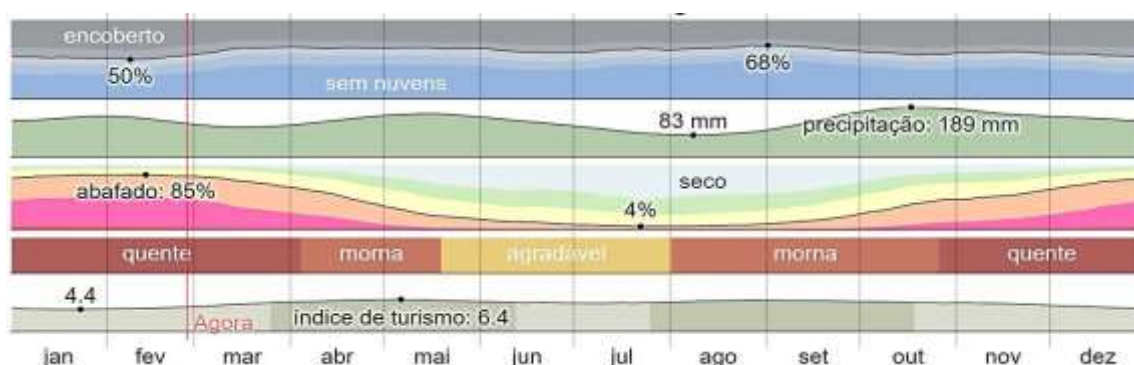
Por outra parte, para caracterizar um clima, é necessário realizar uma análise durante um longo período de tempo. Dessa forma, é possível definir o clima como um conjunto ou sucessão dos tipos de tempo e seus elementos. Esses tempos são observados ao longo das estações do ano em um determinado local, durante um período de aproximadamente 30 anos [94].

Assim sendo, esta pesquisa será realizada em base às informações meteorológicas disponibilizadas pela plataforma online *Weather Spark* (NASA) sobre a cidade de Foz do Iguaçu, na Tríplice Fronteira Brasil-Paraguai-Argentina, nos últimos 30 anos. Esses dados climatológicos vêm da análise retrospectiva *MERRA-2 Modern-Era* da NASA, a qual combina uma variedade de medições de área ampla em um modelo meteorológico mundial moderno que reconstrói a história do clima hora a hora [95].

A continuação, são apresentadas as condições climáticas anuais da cidade, que podem ser acessadas e obtidas com maiores detalhes no endereço eletrônico www.weatherspark.com:

Em Foz de Iguaçu, os verões são longos, muito quentes e abafados; os invernos são curtos e frios e o ano é chuvoso e parcialmente nublado. Durante o ano, a temperatura geralmente varia de 12 °C a 32 °C e raramente cai abaixo de 4 °C ou sobe acima de 36 °C. Na Figura 8, é possível apreciar o clima promédio da cidade ao longo do ano.

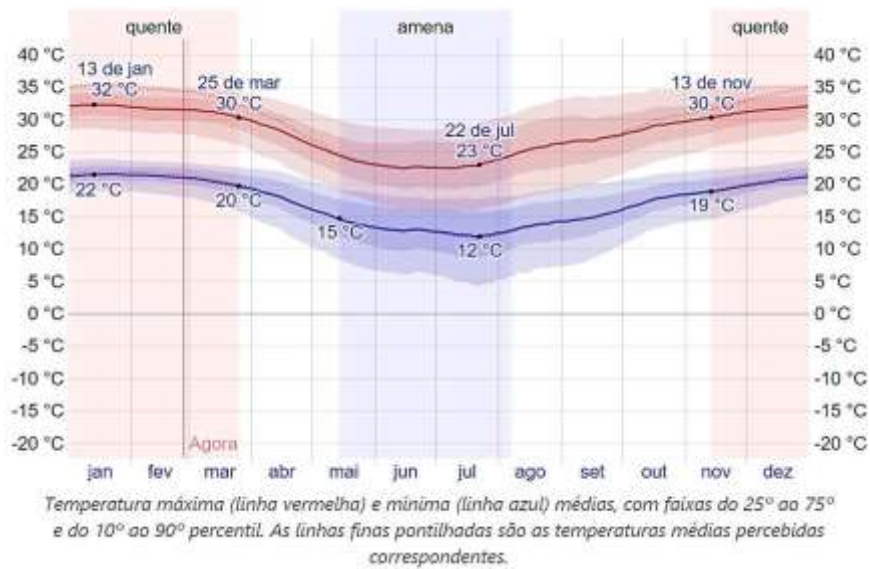
Figura 8. Resumo Meteorológico Anual Foz do Iguaçu



Fonte: [95]

Em Foz do Iguaçu, a estação quente permanece por 4.4 meses, de 13 de novembro a 25 de março, com temperatura máxima média diária acima de 30 °C. O dia mais quente do ano é 13 de janeiro, cuja temperatura máxima média é de 32 °C e a mínima média é de 22 °C. Por outro lado, a estação fresca permanece por 2.8 meses, de 14 de maio a 7 de agosto, com temperatura máxima diária em média abaixo de 24 °C. O dia mais frio do ano é 22 de julho, com média de 12 °C para a temperatura mínima e 23 °C para a máxima. Na Figura 9, é apresentado o diagrama de temperaturas médias máximas e mínimas na cidade de Foz do Iguaçu.

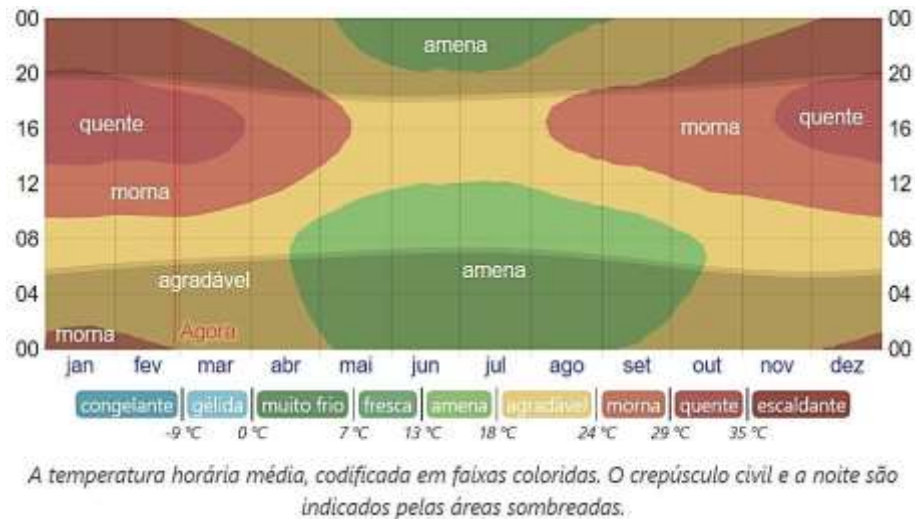
Figura 9. Temperaturas Máximas e Mínimas Promédio em Foz do Iguaçu



Fonte: [95]

Já na Figura 10, é apresentada uma caracterização compacta das temperaturas médias horárias para o ano inteiro. O eixo horizontal indica o dia do ano e o eixo vertical indica a hora do dia. A cor é a temperatura média para aquele horário naquele dia.

Figura 10. Temperatura Média Horária em Foz do Iguaçu



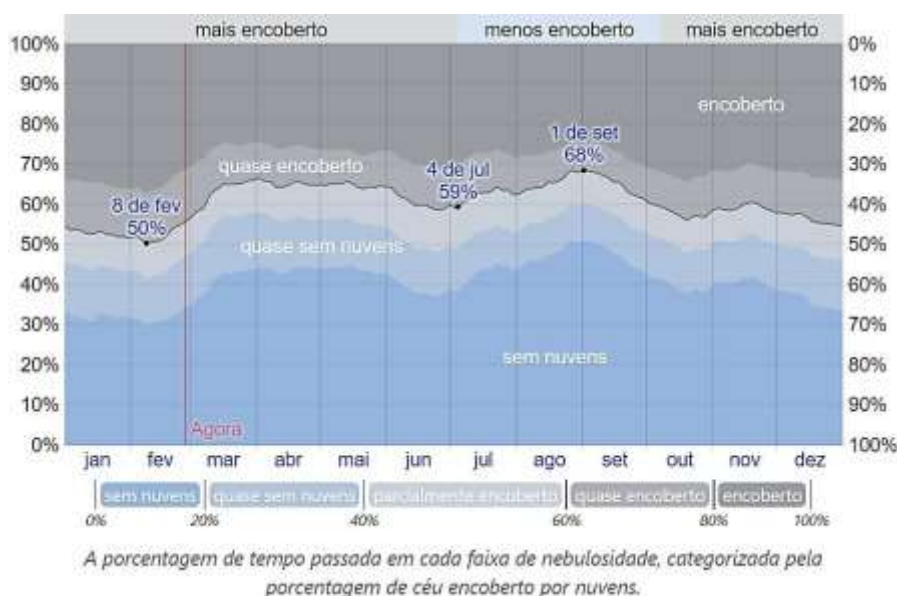
Fonte: [95]

2.13.1 Nuvens

Em Foz do Iguaçu, a porcentagem média de céu encoberto por nuvens sofre pequena variação sazonal ao longo do ano. A época menos encoberta do ano em Foz do Iguaçu começa por volta de 4 de julho e dura 3.1 meses, terminando em torno do 7 de outubro. Em 1 de setembro, o dia menos encoberto do ano, o céu permanece sem nuvens, quase sem nuvens ou parcialmente encoberto durante 68% do tempo.

A época mais encoberta do ano começa por volta do 7 de outubro e dura 8.9 meses, terminando em torno do 4 de julho. Em 8 de fevereiro, o dia mais nublado do ano, o céu permanece encoberto ou quase encoberto durante 50% do tempo. Na Figura 11, é possível apreciar as categorias de nebulosidade ao longo do ano.

Figura 11. Categorias de Nebulosidade em Foz do Iguaçu

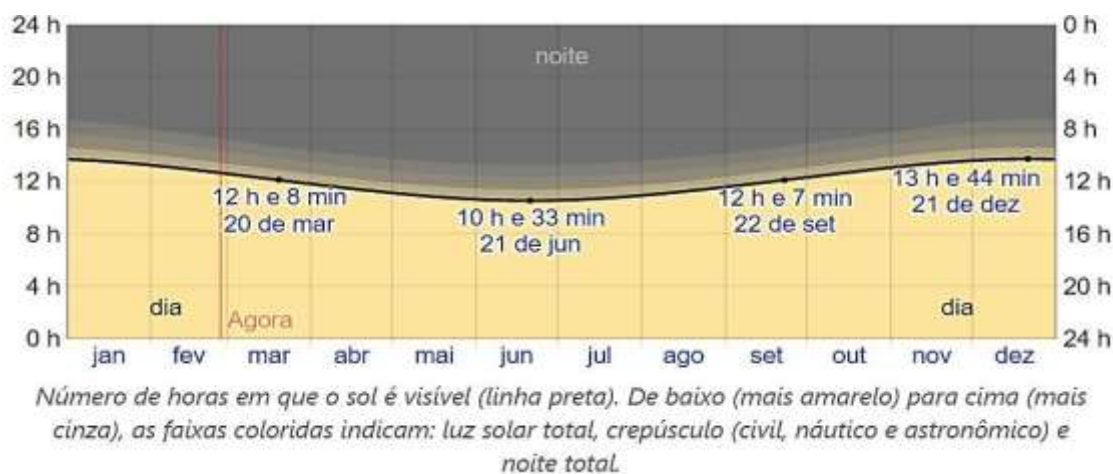


Fonte: [95]

2.13.2 Sol

A duração do dia em Foz do Iguaçu varia ao longo do ano. O dia mais curto é 21 de junho, com 10 horas e 33 minutos de luz solar. O dia mais longo é 21 de dezembro, com 13 horas e 44 minutos de luz solar. Isto pode ser apreciado na Figura 12.

Figura 12. Horas de Luz Solar e Crepúsculo em Foz do Iguaçu

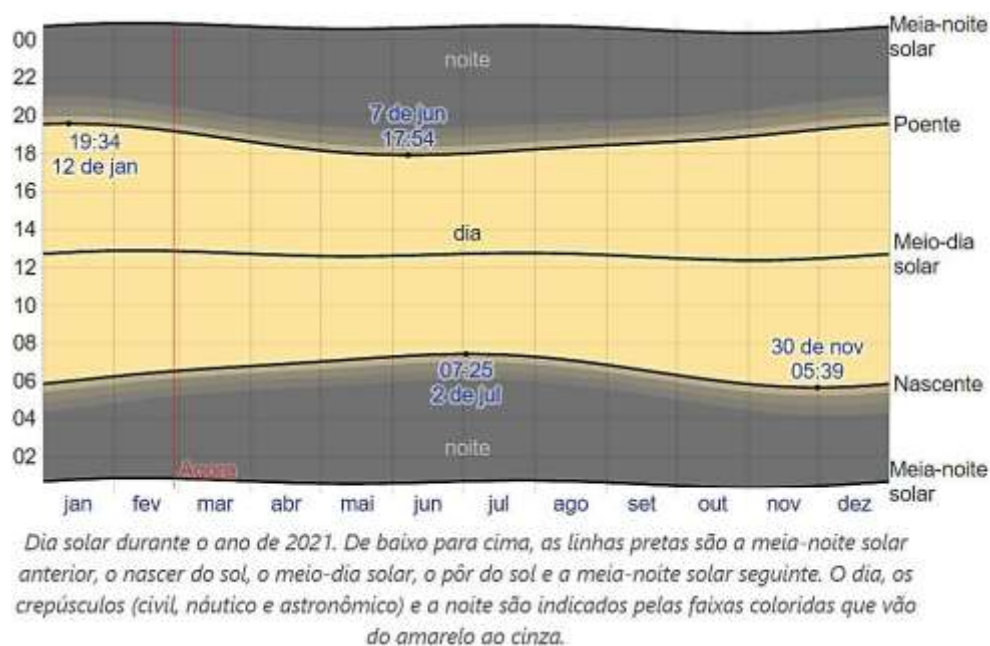


Fonte: [95]

O dia em que o Sol nasce mais cedo é 30 de novembro, às 05:39. O nascer do Sol mais tarde ocorre 1 hora e 46 minutos depois, às 07:25 em 2 de julho. O dia em que o Sol se põe mais cedo é 7 de junho, às 17:54. O dia em que o Sol se põe mais tarde ocorre 1 hora e 39 minutos depois, às 19:34 em 12 de janeiro.

É importante ressaltar que o horário de verão não foi implementado em Foz do Iguaçu durante entre 2020 e 2021. Na Figura 13, é representado o nascer e o pôr do Sol com crepúsculo.

Figura 13. Nascer e Pôr do Sol com Crepúsculo em Foz do Iguaçu



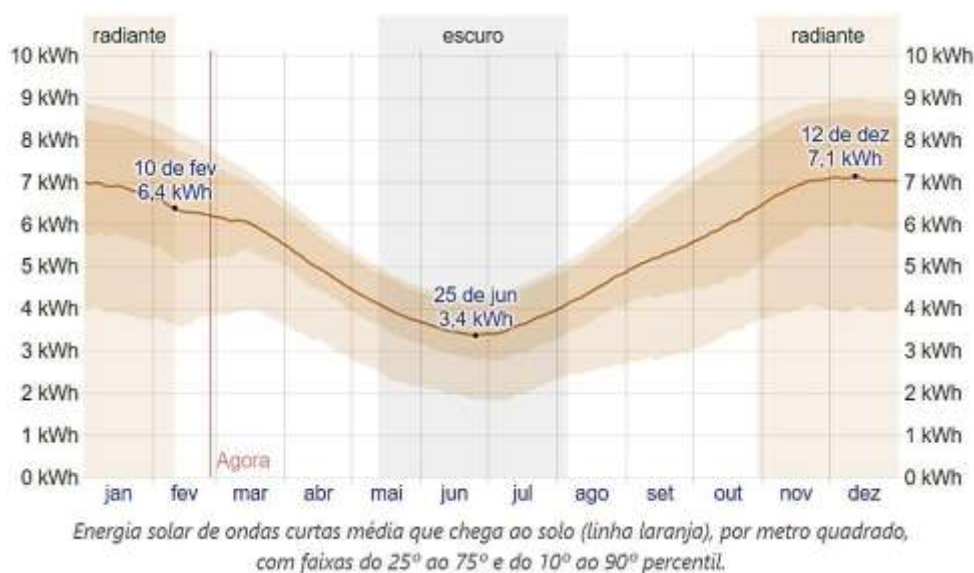
Fonte: [95]

2.13.3 Energia Solar

Esta seção discute o total diário incidente de energia solar de ondas curtas que chega à superfície do solo ao longo de uma área ampla, levando em conta as variações sazonais na duração do dia, na elevação do Sol acima do horizonte e na absorção por nuvens e outros elementos atmosféricos. A radiação de ondas curtas inclui a luz visível e a radiação ultravioleta. Além, é preciso considerar que a energia solar de ondas curtas incidente diária média passa por variações sazonais significativas ao longo do ano.

O período mais radiante do ano dura 3.4 meses, de 29 de outubro a 10 de fevereiro, com média diária de energia de ondas curtas incidente por metro quadrado acima de 6.4 kWh. O dia mais radiante do ano é 12 de dezembro, com média de 7.1 kWh. Por outra parte, o período mais escuro do ano dura 2.8 meses, de 12 de maio a 5 de agosto, com média diária de energia de ondas curtas incidente por metro quadrado abaixo de 4.1 kWh. O dia mais escuro do ano é 25 de junho, com média de 3.4 kWh, como pode se observar na Figura 14.

Figura 14. Média Diária de Energia Solar de Ondas Curtas Incidentes em Foz do Iguaçu



Fonte: [95]

2.14 ESTUDOS RELACIONADOS E ESTADO DA ARTE

Vários são os autores que têm estudado o desempenho térmico de materiais para elaboração de telhados, com o intuito de reduzir a carga térmica dos ambientes em diferentes lugares do mundo.

Em [96], por exemplo, foram analisados quatro tipos de telhados, compostos de fibrocimento e forro de policloreto de vinila (PCV): o primeiro foi utilizado como referência, o segundo teve as telhas pintadas de branco, o terceiro teve uma barreira radiante instalada e o quarto teve isolamento térmico convencional à base de poliestireno expandido (EPS). Os resultados mostraram que todas as telhas testadas tiveram um ganho térmico inferior à cobertura de referência, com reduções de 55% para a cobertura com telha branca, 67% com barreira radiante e 70% com isolamento térmico convencional. Além disso, os autores concluíram que a cobertura com barreira radiante apresentou as maiores diferenças de resistência térmica, demonstrando que é importante rever os procedimentos de cálculo, principalmente quando se utiliza uma barreira radiante para o isolamento térmico.

No estudo realizado por [1], foi comparado o comportamento térmico de diferentes tipos de coberturas medindo a Temperatura Superficial Externa (EST) e a Temperatura Superficial Interna (IST) ao longo dos dias. As coberturas foram: AC - Telhas de fibrocimento, BA - Telhas de bambu, BAP - Telhas de bambu pintadas de branco, FB - Telhas de fibra vegetal e betume, FBP - Telhas de fibra vegetal e betume pintadas de branco. Os resultados da pesquisa demonstraram que a cobertura FB apresentou o pior desempenho térmico em relação aos demais tipos de cobertura, com os melhores resultados observados na cobertura BAP.

A pesquisa de [70], analisou a refletância solar em três diferentes tipos de materiais de cobertura: telha cerâmica esmaltada, cerâmica rústica e de concreto com amostras de diferentes cores. Os resultados demonstraram que a variabilidade de cores impacta diretamente no desempenho com relação à refletância solar (cerâmica esmaltada de 0,11 - 0,67, concreto de 0,1 - 0,37, cerâmica rústica de 0,25 - 0,47). A telha de concreto apresentou menor índice de refletância solar (39%). As cores claras mostraram ser mais eficientes apresentando maiores valores de refletância solar.

Outros autores como [86], têm estudado o reaproveitamento de embalagens Tetra Pak junto a telhas de fibrocimento. Assim, foram comparados diferentes materiais de cobertura: telhas recicladas à base de embalagens Tetra Pak, telhas cerâmicas, telhas de fibrocimento, telhas de alumínio, telhas de fibrocimento com subcobertura de embalagens Tetra Pak com a face aluminizada voltada para cima e telhas de fibrocimento com forro de embalagens Tetra Pak com a face aluminizada voltada para cima. Concluiu-se que as telhas recicladas apresentaram índices de conforto térmico com valores semelhantes aos apresentados por outros materiais de cobertura, como as telhas cerâmicas e que, o reaproveitamento das embalagens Tetra Pak como forro contribuiu para redução dos valores médios de índice de temperatura e umidade, índice de temperatura de globo e umidade e carga térmica de radiação.

Por outra parte, algumas pesquisas como a realizada por [84], têm seguido o conceito de que superfícies brancas são responsáveis por alto poder de reflexão. Nesse estudo, as propriedades de refletância e emissividade térmica de superfícies pintadas com tinta à base de cal, em diferentes números de demãos, sobre substratos distintos, foram avaliadas. Os resultados de refletância variaram de 0,56 a 0,83, dependendo do número de demãos e do tipo de substrato. A emissividade térmica manteve-se com índice de, em média, 0,97, independentemente do tipo de substrato e demãos de pintura. Os resultados demonstram que a pintura de cal atende aos requisitos de refletância e emissividade térmica para um revestimento frio. Da mesma forma, [80] constatou que o tratamento com pintura branca proporciona bom desempenho térmico da cobertura e independentemente do tipo da tinta (látex PVA ou refletiva) usada na pintura de telhas de fibrocimento. Logo a tinta branca é fator condicionante para diminuir a temperatura e auxiliar no conforto térmico oferecido pela edificação.

Um estudo realizado por [97], comparou a eficiência das telhas ecológicas de fibra vegetal e fibrocimento através de uma pesquisa bibliográfica sobre os ensaios de carga de ruptura à flexão simples e a viabilidade econômica. Nesse estudo, pôde-se destacar que as telhas ecológicas possuem uma resistência à flexão simples, sendo considerada três vezes maior que as telhas de fibrocimento, além de possuir maior durabilidade. No entanto, a telha de fibrocimento tem um valor de 6,98% menor que as telhas ecológicas.

Em questão de parâmetros térmicos como o fator decremental e o atraso térmico de materiais, autores como [98], estudaram o desempenho térmico de três tipos de telhados com diferentes capacidades térmicas e condutividade térmica sob diferentes

condições externas, e foram analisadas as defasagens de tempo e os fatores decrementais para comparar os desempenhos térmicos dos telhados. Os resultados desse estudo indicam que o telhado com alto armazenamento térmico e baixa condutividade térmica tem melhor desempenho em comparação aos demais. Além disso, a intensidade da radiação solar teve efeitos consideráveis no atraso térmico dos materiais e as condições externas não tiveram efeito significativo sobre o fator decremental de cada material.

2.15 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Ao longo deste segundo capítulo foi feita uma recopilação holística de informações que permitiram compreender os conceitos relacionados ao tema da pesquisa. Além de tratar questões naturais como a física do Sol, a radiação solar disponível na Terra, os ângulos solares, o atraso térmico e o fator de decremental, também foram abordadas questões técnicas como a termografia infravermelha e a caracterização de alguns materiais para telhas. Saber sobre as condições climáticas da cidade onde se desenvolve a pesquisa é, de fato, um passo fundamental para o bom desenvolvimento deste estudo.

O referencial teórico citado neste capítulo foi consultado principalmente em artigos científicos de alto nível, livros, dissertações, teses, normas técnicas, páginas web, entre outras fontes. É importante destacar que são vários os estudos já realizados por diversos autores sobre o desempenho térmico de materiais para telhados e coberturas, no entanto, a pesquisa de materiais à base de fibras vegetais ou feitos de Tetra Pak, merecem ainda ser estudados pelos benefícios ambientais que representam e pelas diferentes condições climáticas ao longo do ano em diferentes lugares do mundo. Nesse sentido, é possível perceber que o presente trabalho possui um critério inovador a respeito da avaliação de materiais no desempenho térmico de construções, que possuem um grande potencial para serem pesquisados e não menos importante, divulgados em cidades com condições de alta radiação solar, como é o caso de Foz do Iguaçu, na tríplice fronteira Brasil-Paraguai-Argentina.

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é descrito o material com o qual foi realizada a pesquisa, a forma como foi construída a estrutura experimental e os métodos utilizados para realizar as medições superficiais de temperatura mediante termografia infravermelha e as medições de temperatura em regime transiente nos quatro tipos de telha, além disso, é realizado um tratamento estatístico desses dados experimentais para determinar a sua variância e confiabilidade. Concluindo o capítulo, é explicada a simulação computacional realizada no Software Ansys CFD, as condições de contorno consideradas e os parâmetros térmicos a serem analisados na telha ecológica de fibra vegetal.

3.1 MATERIAIS

A continuação, são especificados os materiais e os equipamentos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.1.1 Telhas

Os quatro tipos de telhas analisadas foram: Telha de Fibrocimento sem Amianto; Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Tinta Branca (Cal); Telha Ecológica Tetra Pak e Telha Ecológica de Fibra Vegetal.

3.1.1.1 Telha de Fibrocimento sem Amianto

A Telha de Fibrocimento sem amianto é uma das mais comercializadas no Brasil devido ao seu baixo custo. Estas telhas são compostas principalmente de uma mistura de água, cimento, calcário, fibra de amianto crisotila, celulose e lama de cal. A telha de fibrocimento sem amianto analisada neste estudo (Figura 15), cumpre com a NBR 15210 (2013/2014) e apresenta as características especificadas na Tabela 2. Esta telha foi comprada na cidade de Foz do Iguaçu. Informações sobre o valor da telha podem ser encontradas no ANEXO A - Faturas e Notas Fiscais de Compra das Telhas (página 108).

Tabela 2. Especificações Telha de Fibrocimento sem Amianto

Característica	Especificação
Tipo	Ondulada
Comprimento	1.83 [m]
Largura	1.10 [m]
Espessura	6 [mm]
Peso	24.4 Kg
Composição	Cimento reforçado com fio sintético (Tecnologia CRFS).
Inclinação mínima	5° (9%)
Cor	Cinza
Valor aproximado	\$R 42.50

Fonte: Adaptado de [71]

Figura 15. Telha de Fibrocimento sem Amianto



Fonte: [71]

3.1.1.2 Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Tinta Branca (Cal)

A Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Tinta Branca (Cal) apresenta as mesmas especificações da Tabela 2. O diferencial consiste no revestimento que foi realizado manualmente com Cal, com a finalidade de que a telha ficasse branca e assim poder analisar os efeitos da mudança de cor na refletividade do material. Esta telha

também foi comprada na cidade de Foz do iguaçu e pertence ao mesmo lote da telha do item anterior. Informações sobre o valor da telha podem ser encontrados no ANEXO A - Faturas e Notas Fiscais de Compra das Telhas (página 108). Na Figura 16, é representada a telha com revestimento de Cal.

Figura 16. Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Cal



Fonte: [71]

É importante destacar que para realizar o revestimento se utilizou Cal e não tinta branca, devido a que a Cal possui um preço menor no comércio (ao redor de 11\$/5Kg). Dados sobre a composição da Cal virgem para construção civil no Brasil podem ser acessadas na NBR 6453/03 [99].

3.1.1.3 Telha Ecológica Tetra Pak

A telha ecológica Tetra Pak ainda é pouco utilizada no Brasil. É por esse motivo que até o presente momento não conta com uma norma técnica para sua fabricação, além disso, é uma telha realizada por poucos fabricantes no país. A telha utilizada nesta pesquisa (Figura 17), foi adquirida em uma loja de construção localizada no município de Campinas, no Estado de São Paulo, o que acrescentou custos de frete até a cidade de Foz do Iguaçu (valores podem ser conferidos no ANEXO A - Faturas e Notas Fiscais de Compra das Telhas, na página 109). Na Tabela 3, são apresentadas algumas especificações da Telha Tetra Pak que foi analisada neste trabalho.

Tabela 3. Especificações Telha Tetra Pak

Característica	Especificação
Tipo	Ondulada
Comprimento	2.15 [m]
Largura	0.95 [m]
Espessura	6 [mm]
Peso	13 Kg
Composição	(5% de alumínio, 20% de polipropileno e 75% de papelão) Caixinhas Tetra Pak e embalagens de pasta de dente.
Inclinação mínima	18%
Cor	Cinza (predominante)
Valor aproximado sem frete	\$R 59.08
Valor aproximado com frete	\$R 104.98

Fonte: Autor

Figura 17. Telha Tetra Pak



Fonte: Autor

3.1.1.4 Telha Ecológica de Fibra Vegetal

A Telha Ecológica de Fibra Vegetal analisada neste trabalho (Figura 18), é um tipo de telha que vem tomando força no mercado nacional, por isso é fácil encontrá-la nos comércios locais. Seu principal fabricante é a empresa francesa Onduline e possui a certificação “*Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*”, que é outorgada aos materiais de construção civil que favorecem o meio ambiente e apresentam características sustentáveis. No Brasil, este tipo de telha alcançou a certificação da ABNT de acordo com a norma NBR 16.688-1. No mercado, essa telha pode ser encontrada nas cores verde, marrom, vermelha e preta, favorecendo a estética das construções. Na Tabela 4, são apresentadas as especificações da telha ecológica de fibra vegetal utilizada nesta pesquisa. Informações sobre o valor da telha podem ser encontrados no ANEXO A - Faturas e Notas Fiscais de Compra das Telhas (página 108).

Tabela 4. Telha Ecológica de Fibra vegetal

Característica	Especificação
Tipo	Ondulada
Comprimento	2.00 [m]
Largura	0.95 [m]
Espessura	6 [mm]
Peso ¹	6.46 Kg
Composição	Fibras vegetais de papel reciclado.
Inclinação mínima	18%
Cor	Verde
Valor aproximado	\$R 62.90

Fonte: Adaptado de [93]

¹ De acordo com o fabricante, a Telha Ecológica de Fibra Vegetal tem menos de 1% de absorção de água. Diferente das telhas de cerâmica ou fibrocimento, que absorvem muita água e aumentam em até 30% o seu peso, a telha ecológica permanece com praticamente o mesmo peso, o que não sobrecarrega a estrutura do telhado. A sua leveza não é problema, pois tem sido testada em túnel de vento e resiste a ventos fortes e vendavais de mais de 250 km/h.

Figura 18. Telha Ecológica de Fibra Vegetal

Fonte: [93]

3.1.2 Câmera Termográfica FLIR TG 165

As câmeras termográficas de alta tecnologia são equipamentos muito úteis para realizar medições superficiais de temperatura. A capacidade visual infravermelha dessas câmeras faz que seu uso seja frequente em diversos projetos de engenharia. Nesta pesquisa, a Câmera Termográfica FLIR TG 165, representada na Figura 19, foi emprestada pela Divisão de Apoio Logístico aos Laboratórios (DALL) da Secretaria de Apoio Científico e Tecnológico (SACT) da UNILA. Na Tabela 5, são apresentadas algumas especificações deste equipamento.

Figura 19. Câmera Termográfica FLIR TG 165

Fonte: [100]

Tabela 5. Especificações Câmera Termográfica FLIR TG 165

Característica	Especificação
Precisão Básica	+/- 1.5% ou 1.5 °C
Faixa de Medição	-25 a 380 °C
Emissividade	4 Níveis de Pre-Set com Ajuste Customizado, 0.1 a 0.99
Relação de Distância ao Alvo	24:1
Resolução de Medição	0.1 °C
Tempo de Resposta	150 Milissegundos
Lasers	Laser Duplo, Indicação de diâmetro do alvo
Tamanho (A*L*P)	186*55*94 mm
Tipo do Display	2.0", LCD TFT

Fonte: Adaptado de [100]

3.1.3 “4 Channel K Thermometer SD logger” - 88598 AZ

Este termômetro é utilizado para realizar medições de temperaturas superficiais em regime transiente, ou seja, mede variações de temperatura em curtos períodos de tempo. Este equipamento possui quatro canais (quatro termopares tipo K), que permitem realizar a medição de temperatura em quatro pontos diferentes da superfície ao mesmo tempo. O termômetro utilizado neste estudo está representado na Figura 20, e foi adquirido externamente. As suas especificações são apresentadas na Tabela 6.

Figura 20. “4 Channel K Thermometer SD” - 88598 AZ



Fonte: [101]

Tabela 6. Especificações do “4 Channel K Thermometer SD” - 88598 AZ

Característica	Especificação
Precisão Básica	+/- 1.0 % ou 1 °C
Faixa de Medição	-200 a 1370 °C
Taxa de Amostragem	Programável a partir de 1 segundo
Resolução de Medição	0.1 °C
Tamanho (C*L*A)	152*100*39 mm
Tipo de Termopares	K

Fonte: [101]

3.2 ESTRUTURA EXPERIMENTAL

Para desenvolver este estudo, foi necessário construir uma estrutura na forma do telhado de uma casa, permitindo a exposição das quatro telhas ao sol em um ângulo de 20° e orientadas ao Norte, já que é nessa posição que acontece o maior índice de radiação solar anual na cidade de Foz do Iguaçu, de acordo com sua Latitude (25° 32' 49" Sul) e Longitude (54° 35' 18" Oeste). Detalhes podem ser apreciados no ANEXO B – Irradiância Média Anual de Foz do Iguaçu (página 110), gerado em *SunData Cresesb* [102]. Além disso, foram seguidas as recomendações da Seção 2.9 (página 24) do referencial teórico.

É importante ressaltar que dadas as condições e as restrições causadas pela Pandemia do COVID-19, o acesso às instalações da UNILA foi limitado e, por esse motivo, a estrutura experimental foi construída no quintal de uma residência, localizada no bairro Jardim Universitário das Américas II, ao Norte da cidade de Foz do Iguaçu. Vale destacar que o local é livre de sombra em todas as direções.

A estrutura experimental foi construída com madeira reciclada (pallets), com o intuito de que esta pesquisa fosse realizada nas bases da Sustentabilidade. Nas Figuras 21-27 são apresentadas algumas imagens da estrutura desde diferentes perspectivas e com as suas respectivas medidas.

Figura 21. Estrutura em Madeira Reciclada - Telhado Experimental



Fonte: Autor

Figura 22. Medidas da Estrutura em Madeira Reciclada - Telhado Experimental



Fonte: Autor

Figura 23. Telhado Experimental Vista Lateral



Fonte: Autor

Figura 24. Medidas de Inclinação Telhado Experimental - 20° N



Fonte: Autor

Figura 25. Telhado Experimental Vista Superior



Fonte: Autor

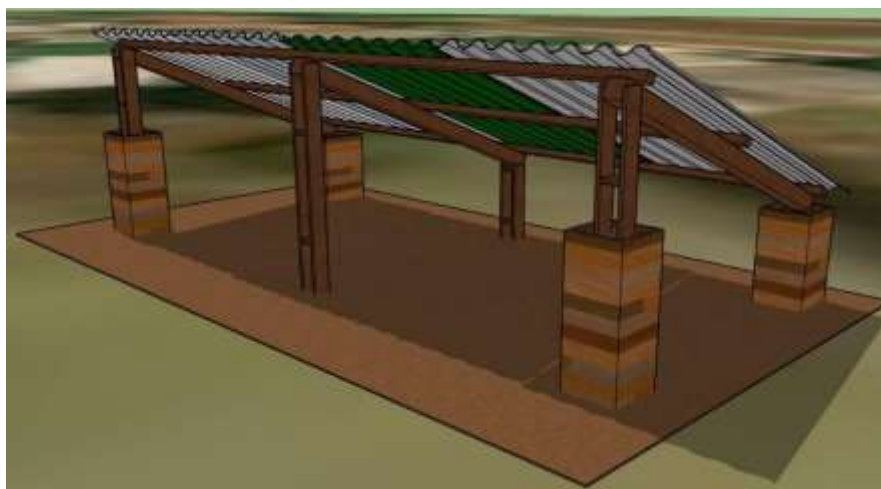
O telhado experimental foi desenhado no Software *Sketchup Pro*®, que permitiu mediante uma animação ter uma noção do movimento de rotação da terra durante os períodos que foram realizadas as medições de temperatura superficial (10:00 h, 13:30 h e 15:00 h) no lugar onde estava localizada a estrutura. Nas figuras 26 e 27, pode-se apreciar o desenho realizado.

Figura 26. Desenho Telhado Experimental em Sketchup – Vista Posterior



Fonte: Autor

Figura 27. Desenho Telhado Experimental em Sketchup – Vista Anterior



Fonte: Autor

3.3 MÉTODO DE OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

A fase de experimentos desta pesquisa está dividida em duas partes. A primeira parte faz referência à coleta de dados das temperaturas superficiais das telhas durante o verão na cidade de Foz do Iguaçu, para o que se usou a câmera termográfica. A segunda parte corresponde à coleta de dados das temperaturas transientes em curtos períodos de tempo, que foi realizada com o termómetro de quatro canais (termopares). A continuação, são detalhadas as formas como foram realizadas as diferentes rotinas de ensaios.

3.3.1 Medições de Temperatura Superficial

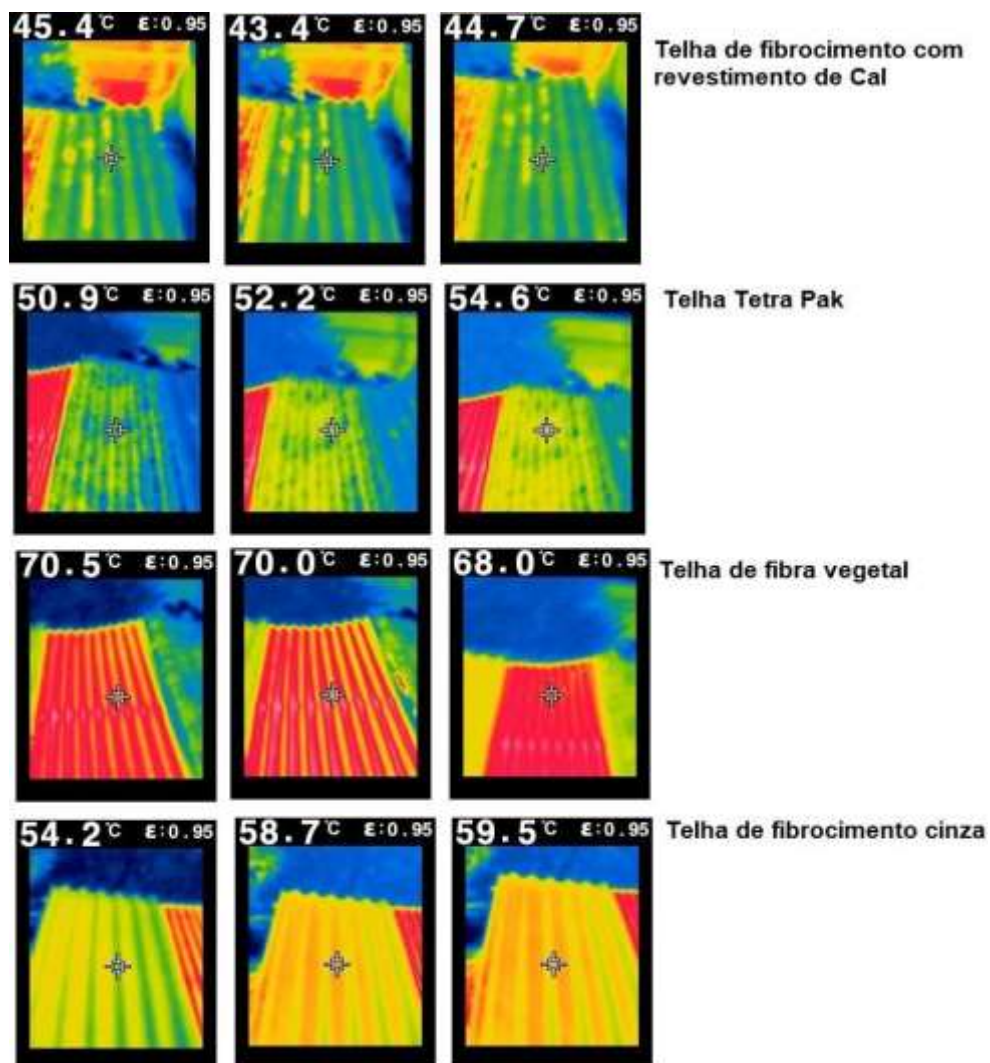
As medições de temperatura superficial das quatro telhas ocorreram a partir do dia 23 de novembro de 2020 e concluíram no dia 28 de fevereiro de 2021, considerando as informações da Seção 2.13 (página 37) do referencial teórico, sobre as condições climáticas e de irradiância da cidade de Foz do Iguaçu e seguindo as orientações da norma ASTM E-1980.

A rotina de ensaios de medição foi a seguinte:

- **Dias de medição de temperatura:** 3 dias por semana (dias em que teve Sol e céu limpo);
- **Número de medições por dia:** foram realizadas medições em 3 horários (10:00 h, 13:30 h e 15:00 h);

Uma vez que se realizaram 3 ensaios por semana de 3 sequências diárias, para cada uma das 4 telhas, durante 13 semanas, registraram-se 468 medidas de temperatura no total. É válido destacar que os registros das 468 temperaturas superficiais coletadas foram organizados em planilhas, além de armazenar as respectivas imagens obtidas da câmera termográfica. Para exemplificar como foi levado o registro dos experimentos, no APÊNDICE A – Registro de Experimentos Temperatura Superficial (páginas 93-95), é apresentada a rotina de ensaios do dia 10 de dezembro de 2020, além disso, na Figura 28, são apresentadas as imagens das temperaturas coletadas nesse mesmo dia nos quatro tipos de telha. É importante mencionar que também se registraram as temperaturas ambiente máximas e mínimas dos dias em que foram realizados os ensaios.

Figura 28. Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas no dia 10 de dezembro de 2020



Fonte: Autor

3.3.2 Medições de Temperatura Superficial em Regime Transiente

As medições de temperatura superficial em regime transiente de cada uma das quatro telhas, foram feitas uma vez por mês em três horários diferentes (10:00 h, 13:30 h e 15:00 h), nas seguintes datas:

- 28 de novembro de 2020;
- 10 de dezembro de 2020;
- 13 de janeiro de 2021 e;
- 24 de fevereiro de 2021.

Devido a que o equipamento possui quatro canais (quatro termopares), nos horários de medição, os sensores tipo K foram localizados (inseridos em pequenos buracos feitos em cada material) nos quatro pontos mais quentes de cada uma das telhas. Os pontos mais quentes das telhas foram identificados com ajuda da câmera termográfica. O termómetro foi programado para registrar a temperatura a cada 10 segundos durante um minuto, resultando 24 leituras para cada telha em cada um dos horários analisados. Dessa forma, em cada dia de medição se registraram 72 temperaturas, totalizando 288 registros no final de fevereiro.

Para exemplificar, no APÊNDICE B - Registro de Experimentos Temperatura Superficial Transiente (páginas 96-98), é apresentada a planilha de dados obtida no dia 13 de janeiro de 2021 (dia mais quente do ano de acordo com os dados da seção 2.13.1).

3.4 DESVIO PADRÃO, ANÁLISE DE VARIÂNCIA CONFIABILIDADE DOS DADOS COLETADOS

Com o propósito de verificar a confiabilidade das temperaturas coletadas nos múltiplos ensaios experimentais realizados, são apresentadas as variâncias e os desvios padrões dos dados registrados na primeira e segunda fase experimental, correspondentes à coleta de temperaturas superficiais mediante termografia infravermelha e temperaturas em regime transiente, respectivamente. É válido destacar que, na fase de termografia infravermelha, foram analisados todos os dados registrados durante as 13 semanas de experimentação. No entanto, na fase de regime transiente, só foram considerados os dados do dia em que se registraram as temperaturas mais altas (13 de janeiro de 2021), uma vez que são esses dados os que serão discutidos proximamente nos resultados da pesquisa. O método de tratamento de dados utilizado nesta análise é o Teste Anova (Teste de Análise de Variância), cujo objetivo é responder se existe uma diferença estatisticamente significativa na média das temperaturas dos grupos de ensaios realizados, mediante a proposição de uma hipótese nula e outra alterna, ambas com 95% de confiabilidade. Nos casos em que se percebeu uma diferença significativa nas médias, foi executado o Teste Tukey, que permitiu identificar os grupos de dados que tiveram um comportamento distinto em relação à maioria. Esta análise foi realizada fazendo uso do Excel e de algumas literaturas de estatística, análise de dados e metodologia da investigação [103]–[107].

3.4.1 Análise dos Dados Coletados com Termografia Infravermelha

Nos APÊNDICES C, D, E, e F, das páginas 99, 100, 101, e 102, é possível apreciar mediante gráficos e tabelas, as análises estatísticas de cada um dos conjuntos de dados obtidos durante as 13 semanas de experimentação para cada uma das telhas nos diferentes horários. Para cada conjunto de dados analisou-se a média, o desvio padrão, a variância, o limite máximo (soma da média mais o desvio padrão), o limite mínimo (diferença da média e o desvio padrão), a temperatura superficial máxima e a temperatura superficial mínima.

Posteriormente, o Teste de Análise de Variância (ANOVA) foi realizado para cada um dos conjuntos de dados. As hipóteses formuladas para os dados de cada telha nos diferentes horários de experimentação foram:

- **Hipótese Nula:** A média das temperaturas durante as 13 semanas é igual, com 95% de confiabilidade.
- **Hipótese Alternativa:** Em ao menos uma das 13 semanas a média das temperaturas é diferente das outras, com 95% de confiabilidade.

Uma vez testadas as hipóteses em cada um dos grupos, se obteve que para todos os conjuntos de dados, em ao menos uma das 13 semanas a média das temperaturas era diferente das outras, com 95% de confiabilidade. Assim sendo, foi executado o Teste Tukey para identificar em quais semanas os dados apresentaram comportamentos diferentes.

O Teste Tukey permitiu comprovar que os dados coletados para as quatro telhas em diferentes horários, durante as 13 semanas, apresentaram diferenças significativas nas temperaturas coletadas nas semanas 7, 8 e 9. Durante essas três semanas as temperaturas superaram o limite máximo (soma da média mais o desvio padrão) de acordo com todos os gráficos. Isto era previsível, uma vez que durante essas semanas se registraram os dias mais quentes do ano na cidade de Foz do Iguaçu, PR.

Por outra parte, é possível perceber que os desvios padrões em todos os conjuntos de dados são mínimos e muito menores do que as médias (desvios entre 0,2 e 2 em todas as tabelas). Isto representa um bom sinal, pois determina que os dados são altamente confiáveis para estabelecer conclusões futuras.

3.4.2 Análise dos Dados Coletados em Regime Transiente

Nesta segunda fase experimental, os dados coletados de forma transiente no dia 13 de janeiro de 2021 (dia mais quente do ano) em Foz do Iguaçu, foram analisados estatisticamente. As análises dos diferentes conjuntos de dados encontram-se nos APÊNDICES G, H, I e J, das páginas 103, 104, 105 e 106. Da mesma forma que para a primeira parte experimental, analisou-se a média, o desvio padrão, a variância, o limitemáximo (soma da média mais o desvio padrão), o limite mínimo (diferença da média e o desvio padrão), a temperatura superficial máxima e a temperatura superficial mínima das quatro telhas nos diferentes horários que foram coletados os dados.

Seguidamente, o Teste de Análise de Variância (ANOVA) foi realizado para cada um dos conjuntos de dados. As hipóteses formuladas para os dados de cada telha nos diferentes horários de experimentação foram:

- **Hipótese Nula:** As temperaturas registradas durante o período transiente (1 minuto) não excedem a média significativamente ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), com 95% de confiabilidade.
- **Hipótese Alternativa:** Ao menos uma das temperaturas registradas no regime transiente (1 minuto) é diferente da média significativamente ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), com 95% de confiabilidade.

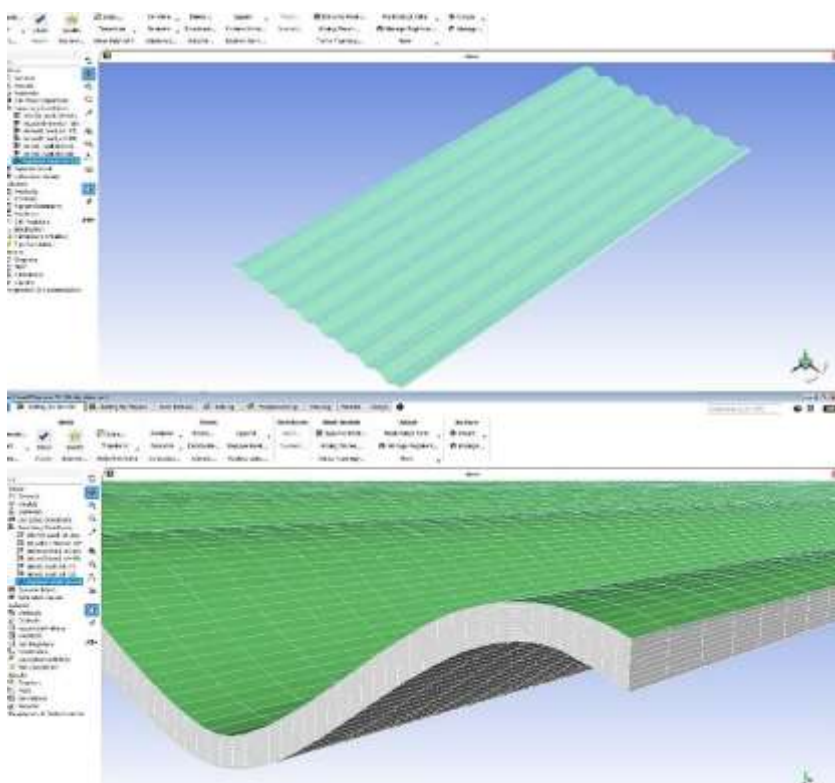
Uma vez testadas as hipóteses em cada um dos grupos, se obteve que para todos os conjuntos de dados, a hipótese nula é verdadeira com 95% de confiabilidade. Assim sendo, não foi necessário executar o Teste Tukey, devido a que todas as temperaturas registradas durante o regime transiente (1 minuto) não excedem a média significativamente ($\pm 2^{\circ}\text{C}$). Isto pode ser confirmado nos gráficos e nas tabelas dos APÊNDICES citados anteriormente, nos quais é possível perceber que os desvios padrões em todos os conjuntos de dados são mínimos e muito menores do que as médias (desvios entre 0 e 0,7 em todas as tabelas). Nesse sentido, é possível determinar que os dados possuem um alto grau de confiabilidade para serem analisados e discutidos posteriormente.

3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ANSYS CFD APLICADA NA TELHA ECOLÓGICA DE FIBRA VEGETAL

Com o objetivo de aprofundar as análises sobre a telha ecológica composta de fibras vegetais, foi realizada uma simulação computacional no Software Ansys CFD. Isto, com o fim de obter a validação do perfil de temperaturas da telha uma vez estabelecidas as condições de contorno, para corroborar os resultados das etapas experimentais e analisar o comportamento de fluxo de calor no material.

O primeiro passo para realizar a simulação consistiu em elaborar a malha computacional, que não é mais do que uma representação ou discretização do plano físico utilizado em uma simulação numérica. Para gerar a malha foi necessário desenhar manualmente a geometria desejada, que neste caso era a geometria tridimensional da telha ecológica de fibra vegetal, de acordo com as suas medidas e especificações (vide a Tabela 4 da página 50). Na Figura 29, apresenta-se a malha computacional com a qual foi realizada a análise CFD. É importante ressaltar que esta malha possui uma alta qualidade de desenho (Qualidade Ortogonal Mínima de 81.5%).

Figura 29. Malha Computacional Telha Ecológica de Fibra Vegetal



Fonte: Autor

Posteriormente, foi necessário especificar os modelos e as condições de contorno a serem implantadas na simulação computacional. Nesse sentido, foi definida a equação que governaria o processo, que para este caso foi a Equação da Difusão de Calor Generalizada (Equação 30), a qual representa o processo físico de transferência de calor.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho C_p T}{J} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\left(\alpha_{11} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \left(\alpha_{12} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + \left(\alpha_{31} \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) kJ \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\left(\alpha_{21} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \left(\alpha_{22} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + \left(\alpha_{32} \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) kJ \right] + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[\left(\alpha_{31} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \left(\alpha_{32} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + \left(\alpha_{33} \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) kJ \right] + \frac{\dot{S}}{J} \quad (30)$$

Em que J representa o jacobiano da equação e; ξ , η e γ representam coordenadas generalizadas, uma vez que a telha possui uma geometria complexa que não pode ser resumida só a coordenadas cartesianas.

Do mesmo modo, escolheu-se um modelo de radiação que inclui o rastreamento de raios solares, de acordo com as coordenadas geográficas da cidade, o dia e o horário, o ângulo de inclinação da telha, as condições de energia solar e temperatura média especificadas na seção 2.13 (páginas 38, 39 e 42), e determinou-se o regime laminar para convecção natural, uma vez que foi realizada uma análise de transferência de calor mista (convecção – radiação) sobre a telha. Além disso, outros parâmetros tiveram que ser definidos ao longo do processo para concretizar a simulação. Tais informações estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de Execução Simulação Computacional CFD

Parâmetro	Especificação	Referência
Condutividade Térmica Fibra Vegetal de Papel Reciclado	0.039 W/m K	[93]
Temperatura Ambiente	305 K	-
Densidade Fibra Vegetal Papel Reciclado	1.45 g/cm ³	[92]
Calor Específico Fibra Vegetal Papel R.	1381.6 J/Kg*K	[93]
Emissividade do Material	0.95	[92]
Ângulo de Inclinação da Telha	20 N	[102]
Espessura da Telha	6 mm	[93]
Coeficiente Trans. Cal. Ar	5 - 25 W/m ² K	
Fluxo Ar (Convecção)	Laminar	-
Latitude Foz do Iguaçu	25.401 S	[102]
Longitude Foz do Iguaçu	54.549 O	[102]
Regime Simulação	Estacionário	-

Fonte: Autor

Uma vez especificados os parâmetros, procedeu-se à solução dos cálculos executada pelo programa em um vasto número de iterações, o que permitiu obter gráficos e informações que serão discutidos no próximo capítulo.

3.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

No decorrer deste terceiro capítulo foram apresentados com detalhe os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. A especificação dos materiais que compõem as telhas foi um passo fundamental, uma vez que futuras análises dos resultados deste estudo dependem disso. Da mesma forma, é importante ter descrito a estrutura em que as etapas de experimentação foram realizadas, o local onde o estudo foi realizado e a forma como as temperaturas de superfície por termografia infravermelha e transientes foram registradas.

Uma parte essencial deste capítulo foi dedicada à análise e tratamento dos dados experimentais, o que foi satisfatório, uma vez que foi possível validar a sua fiabilidade através da realização de testes estatísticos. Assim, é válido afirmar que tais dados podem ser discutidos e analisados nos resultados de forma confiável.

Por outro lado, no final do capítulo, foi abordada a metodologia utilizada para realizar a simulação computacional do comportamento térmico da telha de fibra vegetal no Software Ansys CFD, estipulando suas condições de contorno e os parâmetros térmicos necessários para executar o processo. Desta forma, especificados os materiais e os métodos experimentais e computacionais da pesquisa, é possível prosseguir com a análise e discussão dos resultados.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão discutidos os resultados dos cálculos correspondentes ao atraso térmico e ao fator decremental dos materiais das quatro telhas analisadas neste trabalho, fazendo uso dos dados coletados durante a primeira parte experimental, referente às temperaturas superficiais obtidas por termografia infravermelha durante as 13 semanas de ensaios. Essas temperaturas também serão plotadas em gráficos com o propósito de determinar a sua variação ao longo das 13 semanas e assim estabelecer comparações entre os quatro materiais avaliados. Na sequência, serão analisadas e comparadas as temperaturas em regime transiente das quatro telhas, registradas durante a segunda fase experimental. Para efeitos de comparação, só serão analisadas as temperaturas transientes coletadas no dia mais quente do ano (13 de janeiro de 2021). Além disso, será estabelecida como referência de comparação a telha de fibrocimento, uma vez que é o tipo de telha cujo material é mais conhecido e tem sido estudado com mais profundidade ao longo do tempo por diversos autores. Encerrando o capítulo, serão discutidos os resultados obtidos na simulação computacional acerca do perfil de temperaturas e fluxo de calor da Telha Ecológica de Fibra Vegetal, realizando comparações e/ou corroborando as informações obtidas desse material durante a parte experimental desta pesquisa.

4.1 ATRASO TÉRMICO (ϕ) E FATOR DECREMENTAL (f)

De acordo com as informações apresentadas na seção 2.10 (página 25) deste trabalho, em que se definem os conceitos de atraso térmico (ϕ) e fator decremental (f), foram realizados os cálculos respectivos dessas duas grandezas para determinar a capacidade de armazenamento de calor dos diferentes tipos de telhados avaliados neste estudo, utilizando os dados coletados durante a primeira parte experimental, referente às temperaturas superficiais obtidas por termografia infravermelha durante as 13 semanas de ensaios e as temperaturas ambiente máximas e mínimas dos dias em que se realizaram as medições, o que permitiu aplicar as Equações (16) e (17) e assim construir a Tabela 8.

Tabela 8. Atraso Térmico e Fator Decremental das Quatro Telhas Durante as 13 Semanas

TIPO DE TELHA	SEMANA	ϕ [h]	f
Telha de Fibrocimento Cinza	1	1.67	0.69
	2	1.66	0.69
	3	1.29	0.70
	4	1.21	0.71
	5	1.28	0.70
	6	1.19	0.71
	7	1.03	0.78
	8	1.07	0.77
	9	1.04	0.75
	10	1.20	0.71
	11	1.27	0.70
	12	1.24	0.71
	13	1.22	0.72
Telha de Fibrocimento Branca	1	3.95	0.22
	2	3.55	0.25
	3	3.72	0.23
	4	3.98	0.21
	5	3.75	0.23
	6	3.93	0.22
	7	3.11	0.35
	8	3.15	0.33
	9	3.21	0.29
	10	3.94	0.22
	11	3.74	0.23
	12	3.89	0.22
	13	3.73	0.23
Telha de Tetra Pak	1	2.92	0.38
	2	2.89	0.39
	3	2.76	0.42
	4	2.82	0.40
	5	2.79	0.41
	6	2.63	0.44
	7	2.13	0.54
	8	2.18	0.50
	9	2.22	0.48
	10	2.80	0.41
	11	2.87	0.39
	12	2.81	0.40
	13	2.75	0.42
Telha de Fibra Vegetal	1	6.17	0.05
	2	6.02	0.06
	3	6.15	0.05
	4	5.98	0.07
	5	6.08	0.06
	6	6.14	0.05
	7	4.95	0.11
	8	4.99	0.09
	9	5.40	0.08
Continua...			

10	6.04	0.06
11	5.95	0.07
12	6.13	0.05
13	6.19	0.05

Conclusão.

Fonte: Autor

Considerando que o atraso térmico é a diferença de tempo entre a variação de temperatura na superfície da telha e a manifestação dessa variação na face oposta, quando o sistema é sujeito a um regime variável de transmissão de calor - que neste caso é a radiação solar-, é válido dizer que um atraso térmico mais elevado contribui para a melhoria do conforto térmico dos ambientes, visto que se retarda o ganho de calor através da telha e a inércia térmica é maior. Dessa forma, é possível confirmar mediante os dados da Tabela 8 que a Telha de Fibra Vegetal possui um atraso térmico 73.02% maior do que a Telha de Fibrocimento, 52.82% maior do que a Telha de Tetra Pak e 35.70% maior do que a Telha de Fibrocimento Revestida com Tinta Branca (Cal). Também é possível apreciar que durante as semanas 7, 8 e 9 os valores de atraso térmico nos quatro tipos de material são menores do que nas outras semanas, uma vez que foram essas semanas as de maior irradiância solar na cidade de Foz do Iguaçu durante o verão, e o tempo de propagação das ondas de calor nas telhas tende a ser menor.

Por outra parte, e considerando que o fator decremental representa o grau de amortecimento térmico da telha quanto às variações térmicas externas, é possível afirmar que um fator decremental menor é motivo de um melhor desempenho térmico do material. Dessa maneira, com as informações da Tabela 8 determinou-se que a Telha de Fibra Vegetal possui um fator decremental 92.75% menor do que a Telha de Fibrocimento Convencional, 86.84% menor do que a Telha de Tetra Pak e 76.16% menor do que a Telha de Fibrocimento Revestida de Tinta Branca (Cal). Também é perceptível que durante as semanas de maior irradiância os valores de fator decremental aumentaram nos quatro tipos de material. Além disso, de acordo aos dados da tabela foi possível corroborar que o revestimento com tinta branca (Cal) reduz o fator decremental da telha de fibrocimento em 69.56%, uma vez que aumenta a refletância e a emissividade do material.

Nessa ordem de idéias, e fazendo uma comparação com um estudo similar realizado por [108], pode-se confirmar que quanto maior o fator decremental do telhado, menor é o tempo transcorrido para que as ondas de calor passem do meio externo até a

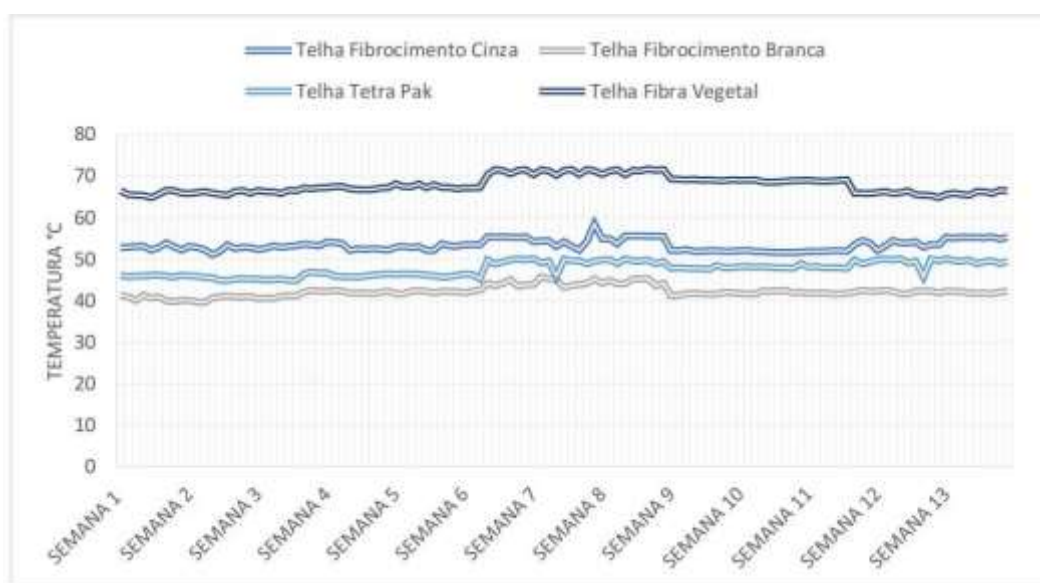
superfície da telha, apresentando um atraso térmico menor. Pode-se inferir, então, que materiais para telhados menos resistentes às variações de temperatura do ambiente também têm menor capacidade de retenção de calor, isto é, quanto maior o fator decremental, menor o atraso térmico.

4.2 VARIAÇÃO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DURANTE AS 13 SEMANAS DE EXPERIMENTAÇÃO

Conforme especificado na seção 3.3.1 (página 57), as medições de temperatura superficial por termografia infravermelha das quatro telhas ocorreram a partir do dia 23 de novembro de 2020 e concluíram no dia 28 de fevereiro de 2021. No total, foram registradas 468 temperaturas, já que se realizaram 3 ensaios por semana de 3 sequências diárias, para cada uma das 4 telhas, durante 13 semanas.

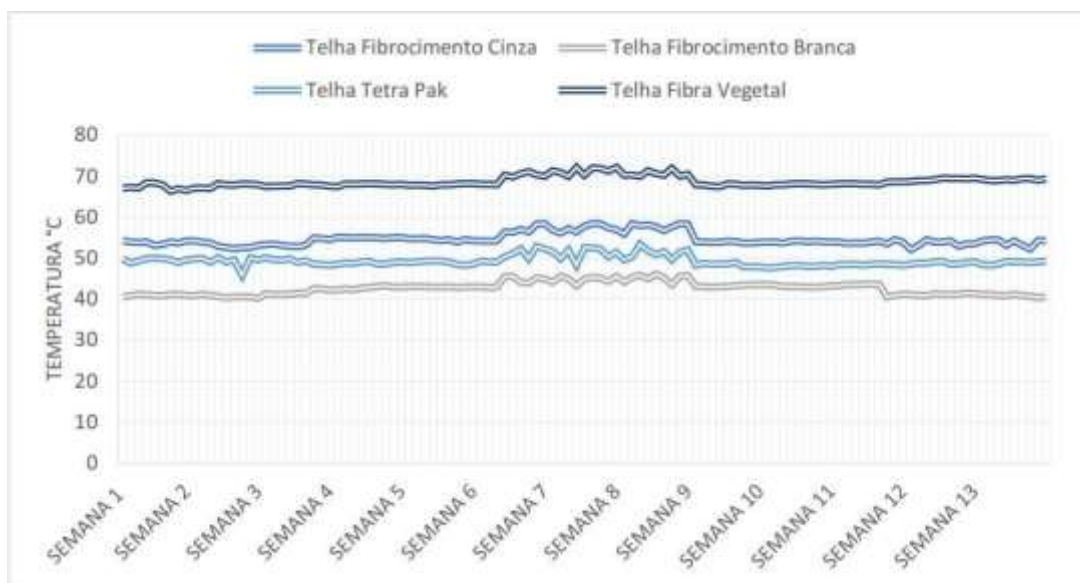
Nas Figuras 30, 31 e 32, são apresentados os gráficos da variação de temperaturas superficiais dos quatro tipos de telha durante as 13 semanas em que foram realizadas as medições, nos diferentes horários de experimentação: 10:00 h, 13:30 h e 15:00 h.

Figura 30. Variações de Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas 10:00 H



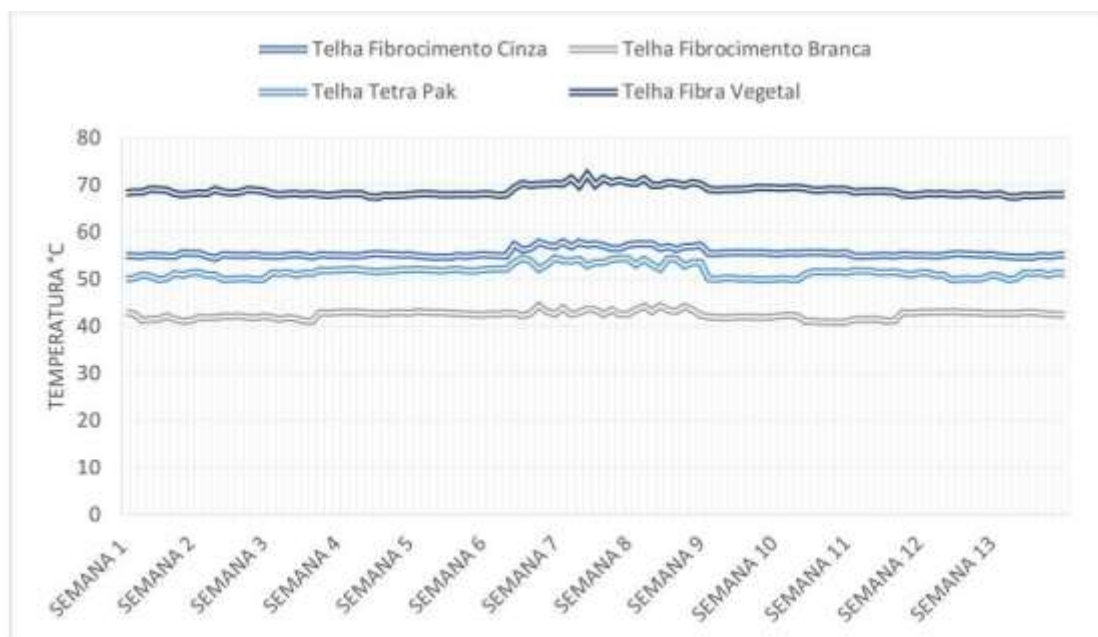
Fonte: Autor

Figura 31. Variações de Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas 13:30 H



Fonte: Autor

Figura 32. Variações de Temperaturas Superficiais das Quatro Telhas 15:00 H



Fonte: Autor

Analisando os gráficos das Figuras 30, 31 e 32, é possível perceber que durante as 13 semanas de experimentação a telha que registrou as maiores temperaturas foi a de Fibra Vegetal, seguida da Telha de Fibrocimento Cinza, a Telha de Tetra Pak e, por último,

a Telha de Fibrocimento Revestida de Tinta Branca (Cal). Além disso, as temperaturas superficiais nas quatro telhas sempre foram maiores durante as semanas 7, 8 e 9, que foram as mais quentes durante o verão.

A Telha de Fibra Vegetal apresentou temperaturas superficiais ao redor de 70°C na câmara termográfica, devido à cor verde escura do seu material. Na Telha de Fibrocimento Cinza foram registradas temperaturas ao redor de 56°C, o que de fato coincide com os dados fornecidos pelos fabricantes [71]. Por outra parte, a Telha de Tetra Pak teve temperaturas superficiais entre 45°C e 50°C, sempre registrando valores menores do que a Telha de Fibrocimento Convencional. A Telha de Fibrocimento Revestida de Tinta Branca (Cal) apresentou as menores temperaturas superficiais na câmara termográfica, o que era previsível, uma vez que a cor branca possui maior refletância em relação às outras cores do espectro. Nesse sentido, pode-se dizer que a Telha de Fibra Vegetal registrou temperaturas cerca de 20% mais altas do que a Telha de Fibrocimento Cinza. No entanto, a Telha de Fibrocimento Cinza registrou temperaturas cerca de 10% mais altas do que a Telha Tetra Pak.

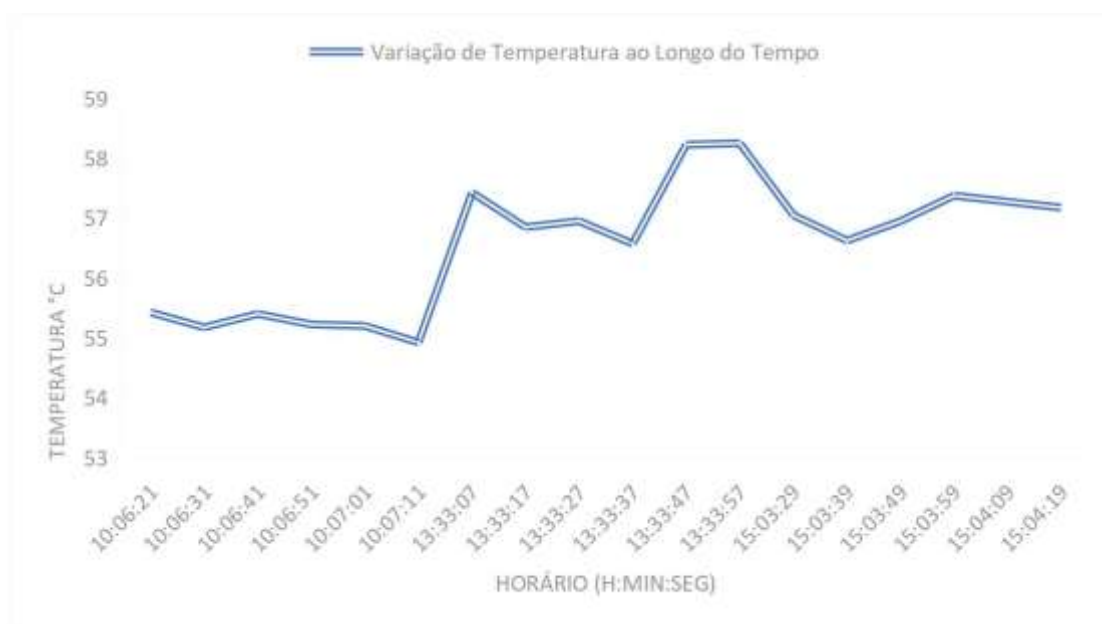
Um dado importante que pode ser deduzido do comportamento das temperaturas superficiais, de acordo aos gráficos, é que o revestimento de Tinta Branca (Cal) na telha de Fibrocimento, faz diminuir as temperaturas da superfície cerca de 23%. Dessa forma, são corroborados os estudos realizados por [82], [84], sobre revestimentos à base de Cal em coberturas e superfícies.

É importante lembrar que nem sempre o desempenho térmico do material pode ser descrito totalmente pela sua cor. Muitos autores sugerem que a absorptância e/ou refletância dependem apenas da cor da superfície, não levando em consideração as radiações ultravioletas e de infravermelho próximo. O desempenho térmico dos materiais não depende apenas da cor, mas de outros fatores e, dependendo de suas composições químicas, superfícies com a mesma cor podem apresentar diferentes absorptâncias/refletâncias e diferentes desempenhos térmicos [109], por isso, nesta pesquisa foram avaliados outros parâmetros como o atraso térmico e o fator decremental, para determinar a capacidade de armazenamento e fluxo de calor das telhas.

4.3 VARIAÇÃO DE TEMPERATURAS TRANSIENTES NAS TELHAS NO DIA MAIS QUENTE DO VERÃO

Nas Figuras 33, 34, 35 e 36, são apresentados os gráficos da variação de temperaturas transientes dos quatro tipos de telha durante o dia mais quente do verão (13 de janeiro de 2021).

Figura 33. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha de Fibrocimento Cinza



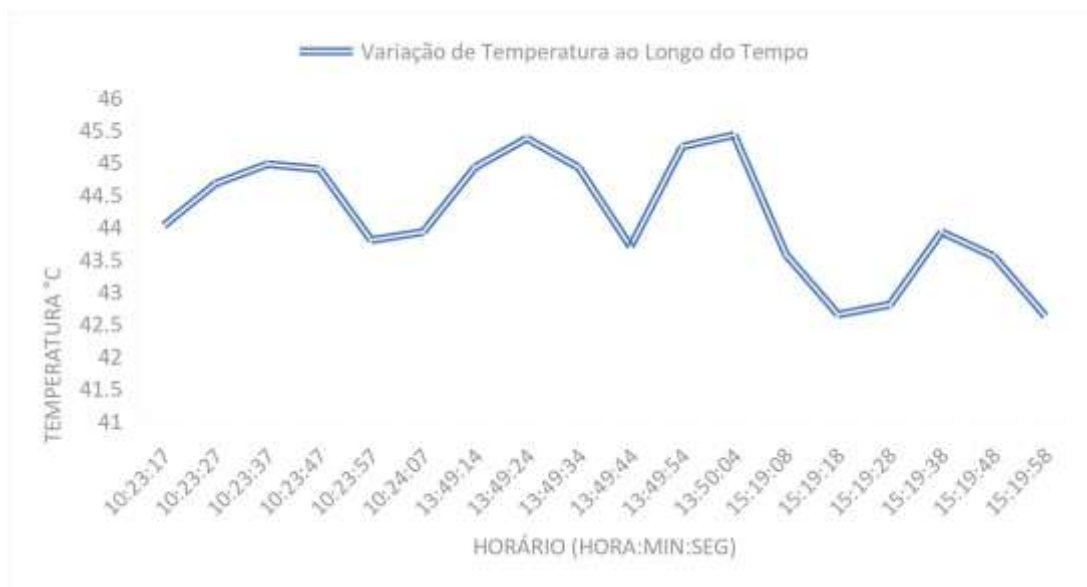
Fonte: Autor

Figura 34. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha Tetra Pak



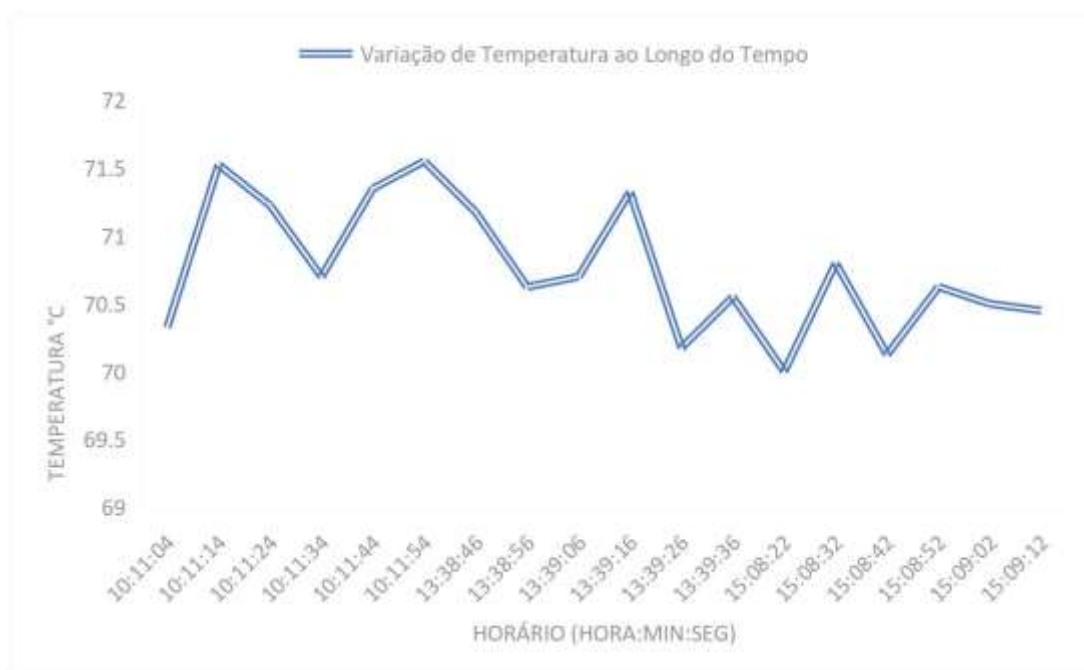
Fonte: Autor

Figura 35. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha de Fibrocimento Branca



Fonte: Autor

Figura 36. Variação de Temperatura ao Longo do Tempo Telha de Fibra Vegetal



Fonte: Autor

As informações contidas nos gráficos anteriores descrevem o comportamento das temperaturas ao longo do tempo. Dessa maneira, é possível ter uma noção de como é propagado o fluxo de calor na superfície das telhas em função do tempo. Ao

analisar as temperaturas das Telhas de Fibrocimento Cinza e Tetra Pak, nas Figuras 33 e 34, é possível observar que no período da manhã, não há quase variação e o comportamento das temperaturas é quase estável, no entanto, nos horários das 13:30 H e 15:00 H, as temperaturas tendem a crescer, o que quer dizer que nos períodos de maior irradiância solar o amortecimento das temperaturas é menor, deixando as telhas mais quentes à medida que o tempo transcorre.

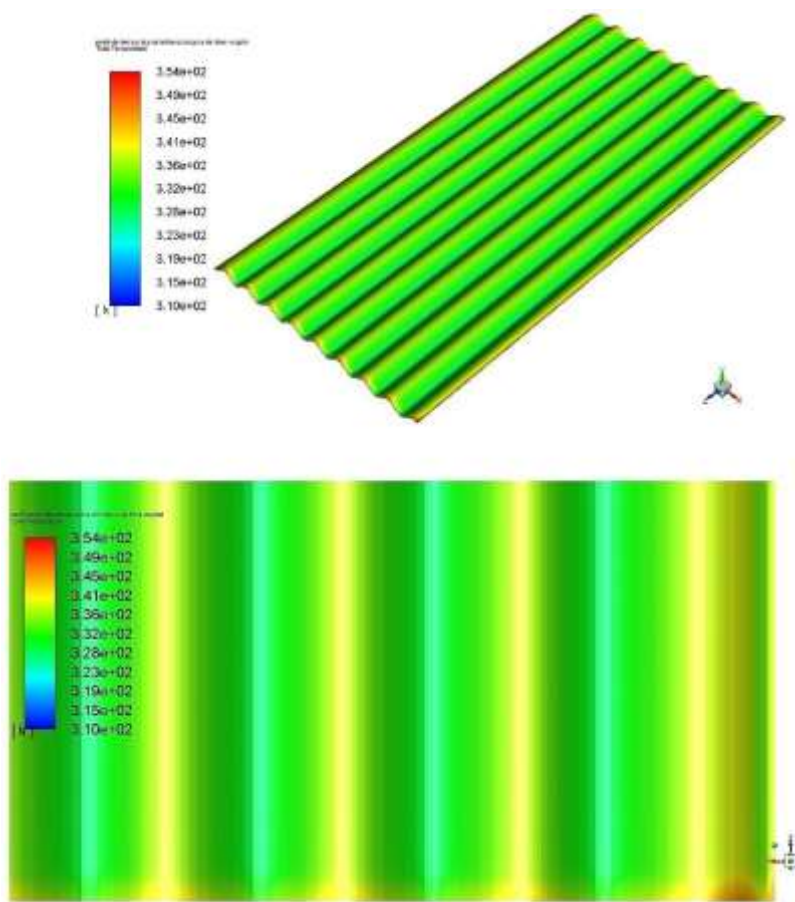
A respeito da Telha de Fibrocimento Revestida de Tinta Branca (Cal), pode-se afirmar que a variação de temperaturas ao longo do tempo se dá de forma suave, descrita por uma função de tipo quase senoidal na Figura 35, que decresce nos horários de maior radiação solar. Isto significa que o amortecimento das temperaturas nesta telha é melhor do que nas telhas de Fibrocimento Convencional e Tetra Pak.

Em relação à Telha de Fibra Vegetal, pode-se dizer que apresenta um comportamento similar à Telha de Fibrocimento Revestida de Tinta Branca (Cal), porém, com mudanças mais drásticas de temperatura ao longo do tempo. Não obstante, o amortecimento é maior do que as telhas de Fibrocimento Convencional e Tetra Pak, já que a função tende a decrescer e se estabilizar nos períodos mais quentes do dia.

4.4 RESULTADOS SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO SOFTWARE ANSYS CFD DA TELHA DE FIBRA VEGETAL

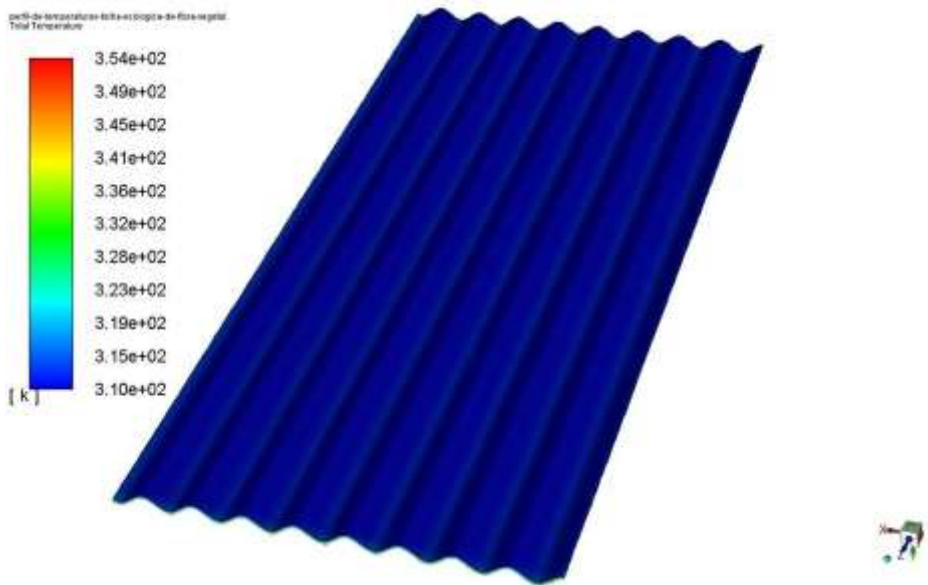
Conforme foi esclarecido na seção 3.5 (página 62), a simulação computacional no Software Ansys CFD foi realizada com o propósito de aprofundar as análises sobre o perfil de temperaturas e fluxo de calor da Telha Ecológica Fibra Vegetal, a qual apresentou o melhor desempenho térmico durante a fase experimental deste estudo. Nesse sentido, foram ingressados todos os parâmetros térmicos e as condições de contorno necessárias para que o programa executasse os cálculos respectivos. Nas Figuras 37, 38, 39 e 40, é possível apreciar os resultados dos perfis de temperatura da telha desde a vista superior, inferior, as bordas inferior e lateral direita e as bordas superior e lateral esquerda, respectivamente.

Figura 37. Perfil de Temperatura Telha de Fibra Vegetal Vista Superior



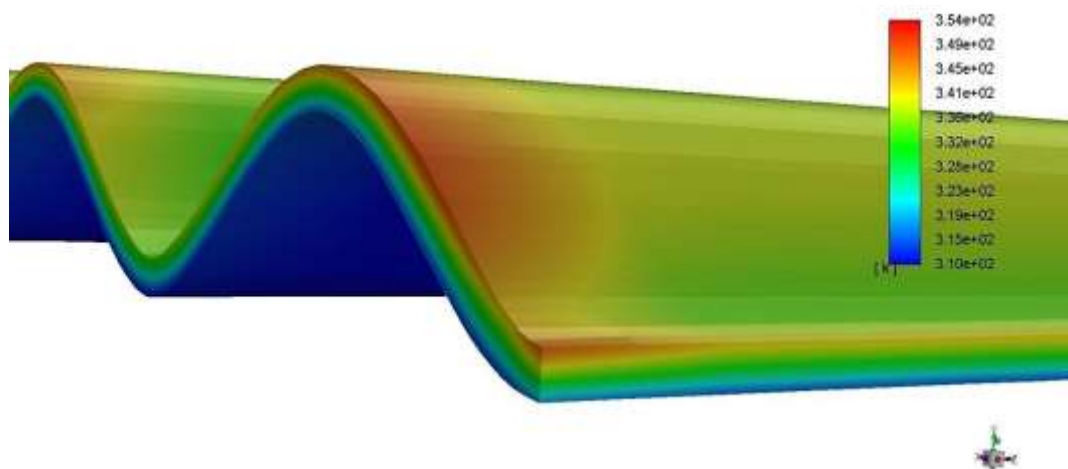
Fonte: Autor

Figura 38. Perfil de Temperatura Telha de Fibra Vegetal Vista Inferior



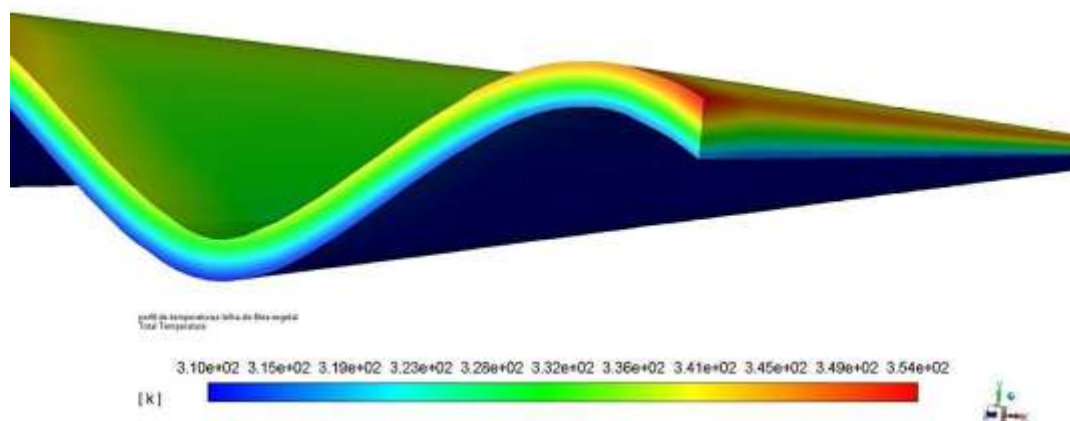
Fonte: Autor

Figura 39. Perfil de Temperatura Telha de Fibra Vegetal Vista das Bordas Inferior e Lateral Direita



Fonte: Autor

Figura 40. Perfil de Temperatura Telha de Fibra Vegetal Vista Bordas Superior e Lateral Esquerda



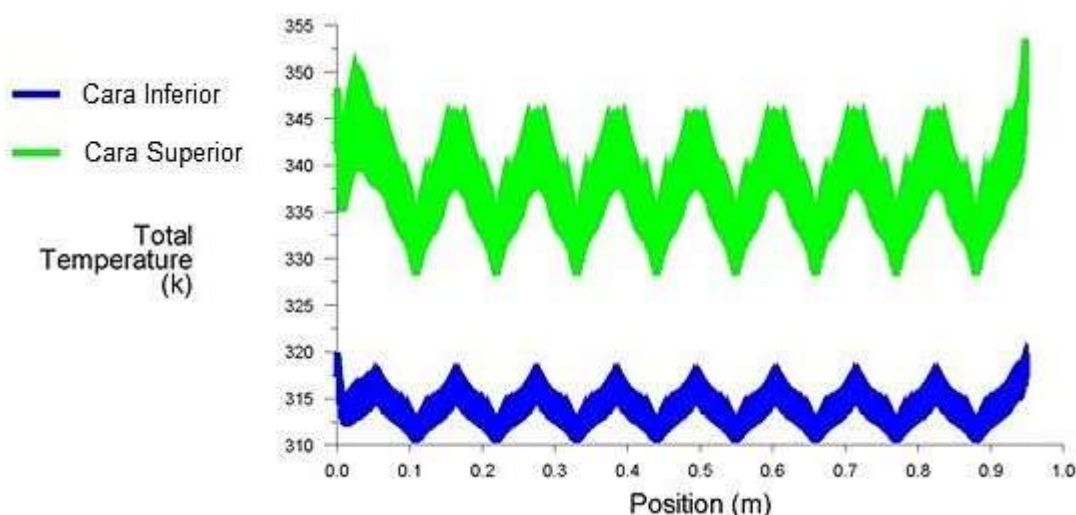
Fonte: Autor

A respeito da Figura 37, que descreve o perfil de temperaturas da cara superior da telha, é possível observar que a faixa de temperaturas está entre 332 K e 352 K (59°C e 79°C), o que resulta compatível com a faixa de temperaturas superficiais registradas pela câmera termográfica durante a etapa experimental deste trabalho, cujos

valores foram ao redor de 70°C para a Telha Ecológica de Fibra Vegetal. Além disso, pode-se constatar que as regiões com temperaturas maiores são as camadas mais externas, ou seja, as crestas das senoides da telha, tal como é possível apreciar nas Figuras 39 e 40. As regiões dos vales senoidais da telha apresentam temperaturas cerca de 25% menores do que nas crestas.

É importante destacar que a Fibra Vegetal de Papel Reciclado é um material realmente isolante, prova disso é a Figura 38, em que é possível apreciar que a temperatura da cara inferior diminuiu ao redor de 22°C em relação ao perfil de temperaturas da cara superior. Para perceber com maior clareza esse fato, a Figura 41 apresenta a variação total de temperaturas tanto na cara inferior quanto na cara superior da telha.

Figura 41. Variação Total de Temperaturas Cara Inferior e Superior da Telha de Fibra Vegetal



Nesse sentido, torna-se válido realizar a interpretação que a Telha de Fibra Vegetal possui um baixo fator decremental e um alto atraso térmico, isto é, o material do qual está feita a telha tem uma grande inércia térmica, em outras palavras, um bom amortecimento térmico, que pode ser constatado nas Figuras 39 e 40, em que mostra-se claramente o gradiente de temperatura nas bordas da telha, ressaltando que essa variação térmica tem lugar em uma espessura de 6mm somente (Espessura da Telha de Fibra Vegetal).

É pertinente mencionar que a simulação computacional realizada corroborou os resultados da fase experimental, e fica demonstrado que outros parâmetros térmicos

precisam ser avaliados para descrever o armazenamento e fluxo de calor dos materiais além da cor. Dessa forma, os resultados obtidos computacional e experimentalmente, refutam os resultados de pesquisas como a realizada por [110], em que foi considerado que o desempenho térmico das Telhas de Fibra Vegetal era menor do que outros tipos de telha, isto devido a que só foram consideradas análises de termografia infravermelha. Não obstante, os resultados do presente estudo concordam com os resultados de pesquisas como as realizadas por [97], [111], deixando em claro que as Telhas Ecológicas de Fibra Vegetal apresentam um melhor desempenho, mesmo tendo um custo maior do que as Telhas de Fibrocimento no mercado.

4.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Ao longo deste quarto capítulo foram descritos os resultados obtidos nas etapas experimentais correspondentes às medições de temperaturas superficiais por termografia infravermelha e em regime transiente. As análises e discussões desses resultados, levaram a determinar que o material que apresenta melhor desempenho térmico entre os quatro avaliados é a Fibra Vegetal, a qual possui um atraso térmico maior e um fator decremental menor quando comparada aos outros tipos de materiais para telhados avaliados nesta pesquisa. Do mesmo modo, foi possível corroborar a importância de colocar revestimento de tinta branca (Cal) na Telha de Fibrocimento, que faz reduzir a carga térmica do material e, conseqüentemente, dos ambientes em que seja usado esse tipo de telhado.

Por outro lado, a simulação computacional realizada na Telha de Fibra Vegetal, confirmou de forma satisfatória os resultados obtidos de forma experimental, permitindo validar o perfil de temperaturas da telha e realizar comparações com outros estudos em que se confirma que as telhas ecológicas apresentam melhor desempenho térmico quando comparadas com outros materiais de tipo convencional.

Assim, é importante ressaltar que de acordo às condições de irradiância solar da cidade de Foz do Iguaçu, convém utilizar telhados feitos de fibras vegetais ou revestidos de tintas frias, para mitigar a carga térmica das casas e edifícios durante o verão.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo contém as conclusões finais sobre este trabalho e sugestões para futuras pesquisas de caráter experimental e/ou computacional na área de materiais sustentáveis para telhados em função da irradiância solar, o conforto térmico de ambientes e a diminuição da carga térmica de casas e edifícios para reduzir o consumo de energia elétrica.

5.1 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho foi possível discutir acerca de uma das principais causas de ganhos térmicos nas construções de regiões com altas temperaturas, que é a incidência da radiação solar sobre as edificações e, por essa razão, o controle da incidência direta da radiação solar que atinge os telhados de casas e edifícios é um meio eficaz para reduzir os ganhos de calor. Nesse sentido, foi avaliado o desempenho térmico de quatro tipos de materiais sustentáveis para telhados: Fibrocimento Convencional sem Amianto, Fibrocimento sem Amianto Revestido de Tinta Branca (Cal), Tetra Pak e Fibra Vegetal de Papel Reciclado, com o propósito de contribuir ao conforto térmico de ambientes na cidade de Foz do Iguaçu, na tríplice fronteira Brasil-paraguai-Argentina, caracterizada por registrar temperaturas muito altas durante o verão anualmente.

Os resultados obtidos durante a fase experimental demonstraram que a Telha de Fibra Vegetal apresenta um melhor desempenho térmico, após ser avaliados os parâmetros de atraso térmico e fator decremental, seguida da Telha de Fibrocimento Revestida de Tinta Branca (Cal), a Telha de Tetra Pak e por último a Telha de Fibrocimento Convencional.

Comprovou-se que a Telha de Fibra Vegetal possui um atraso térmico 73.02% maior do que a Telha de Fibrocimento, 52.82% maior do que a Telha de Tetra Pak e 35.70% maior do que a Telha de Fibrocimento Revestida com Tinta Branca (Cal). Além disso, foi possível determinar que a Telha de Fibra Vegetal possui um fator decremental 92.75% menor do que a Telha de Fibrocimento Convencional, 86.84% menor do que a Telha de Tetra Pak e 76.16% menor do que a Telha de Fibrocimento Revestida de Tinta Branca (Cal).

Por outra parte, foi possível corroborar que o revestimento com tinta branca

(Cal) reduz o fator decremental da Telha de Fibrocimento em 69.56%, uma vez que aumenta a refletância e a emissividade do material, corroborando assim informações encontradas na literatura relacionada a esse tema. Embora a maioria de materiais revestidos de tintas frias sejam brancos ou de cores claras, muitas pessoas no mundo preferem cores escuras, por tanto, há necessidade de produzir materiais e tintas frias que contemplem esse tipo de cores, de acordo com a demanda de diversos projetos arquitetônicos que fazem uso da mais alta estética.

A respeito da Telha feita de Tetra Pak, pode-se dizer que mesmo o seu desempenho térmico seja menor do que o desempenho térmico da Fibra Vegetal, é um tipo de telha que vale a pena considerar, uma vez que as embalagens Tetra Pak hoje são um problema de poluição ambiental devido ao descarte em grandes quantidades de embalagens feitas desse material, que podem ser reaproveitadas na elaboração de telhados. Uma vantagem do material é que se caracteriza por ser atóxico, durável, resistente e leve, dado que o peso da telha reciclada de Tetra Pak é aproximadamente 12 kg, isto é, metade do peso do modelo convencional de Fibrocimento, o que de fato resulta benéfico em relação ao seu transporte e instalação.

Por outra parte, após comprovar que a Telha de Fibra Vegetal possui o melhor desempenho térmico entre os quatro materiais avaliados, a segunda parte da pesquisa consistiu em executar a simulação computacional no Software Ansys CFD, para validar o perfil de temperaturas desse tipo de telha, estabelecendo condições de contorno que permitiram corroborar os resultados experimentais, assim como analisar o comportamento do fluxo de calor do material. Os resultados da simulação foram satisfatórios, já que foi possível comprovar que o material realmente é um bom isolante térmico, concordando assim com os resultados obtidos experimentalmente em relação ao atraso térmico e ao fator decremental da Fibra Vegetal.

Assim sendo, é válido dizer que o material que representa maiores benefícios de conforto térmico, entre os quatro avaliados, em edificações na cidade de Foz do Iguaçu é a Fibra Vegetal, seguida do Fibrocimento com Revestimento de Tinta Branca e o Tetra Pak, como uma opção alternativa ao Fibrocimento Convencional que tende a ser mais pesado, menos durável e resistente, e apresenta um desempenho térmico menor.

Finalmente, levando em consideração as informações obtidas no Capítulo 4, concluiu-se que esse trabalho pode vir a contribuir e agregar valor aos estudos experimentais e

computacionais de avaliação de desempenho térmico de materiais para telhados e coberturas, com o fim de reduzir a carga térmica dos ambientes e diminuir o consumo de energia elétrica pelo uso excessivo de ventiladores e ares condicionados durante o verão, em regiões em que a irradiância solar é muito alta.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de continuar o trabalho realizado, alguns estudos podem ser feitos objetivando-se melhorias e aquisições de novos dados e informações, tais como:

- Realizar a avaliação e comparação do desempenho térmico de outro tipo de materiais sustentáveis para telhados, por exemplo, os denominados ‘telhados verdes’, cerâmicas, PVC, e outras fibras vegetais além do papel reciclado, mediante técnicas de termografia infravermelha e ensaios de espectrofotometria UV-VIS, para determinar parâmetros como a absorvância e refletância desses materiais.
- Executar análises computacionais CFD de diversos tipos de telhados, para abordar com maior precisão os perfis de temperatura, fluxo de calor e radiação desses materiais de cobertura, com o objetivo de impulsionar aqueles que representam maior conforto térmico e contribuem à diminuição da carga térmica dos ambientes e à redução do consumo de energia elétrica no verão.

REFERÊNCIAS

- [1] E. A. de Almeida and R. Passini, “Thermal behavior of alternative materials used as roof and efficiency of the reflective painting on the external face,” *Rev. Fac. Ing.*, vol. 2017, no. 82, pp. 68–73, 2017, doi: 10.17533/udea.redin.n82a09.
- [2] D. E. V. S. Kiran Kumar and S. Puranik, “Thermal performance evaluation of a mineral-based cement tile as roofing material,” *Indoor Built Environ.*, vol. 26, no. 3, pp. 409–421, 2017, doi: 10.1177/1420326x15622978.
- [3] N. L. Alchapar and E. N. Correa, “Aging of roof coatings. Solar reflectance stability according to their morphological characteristics,” *Constr. Build. Mater.*, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.005.
- [4] K. C. P. da Silva, A. T. Campos, T. Yanagi Junior, D. Cecchin, D. Lourençoni, and J. C. Ferreira, “Reaproveitamento de resíduos de embalagens Tetra Pak-® em coberturas,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 19, pp. 58–63, 2015, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p58-63.
- [5] T. da C. C. Coelho, C. E. M. Gomes, and K. A. Dornelles, “Desempenho térmico e absorvência solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural,” *Ambient. Construído*, 2017, doi: 10.1590/s1678-86212017000100129.
- [6] S. C. Brum, B. De Almeida, E. D. S. Pelosi, J. Pacheco, and M. das G. Á. Guimarães, “Amianto: a bioética entre o custo e a toxicidade,” *Rev. Eletrônica TECCEN*, 2016, doi: 10.21727/teccen.v9i1.207.
- [7] ABNT-NBR 15575-2, *Edificações habitacionais - Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais*. Brasil, 2013.
- [8] I. C. Costa, “Estudo dos Efeitos Genotóxicos do Amianto em Trabalhadores Expostos,” Escola Nacional de Saúde pública Sergio Arouca - ENSP, 2009.
- [9] M. Performance *et al.*, “Standard Test Method for Solar Absorptance , Reflectance , and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres 1,” vol. 03, pp. 1–9, 1996,

doi: 10.1520/E0903-12.2.

- [10] J. Widén and J. Munkhammar, *Solar Radiation Theory*, 1st ed., no. April. Uppsala University, 2019.
- [11] L. Wald, “Solar radiation energy (fundamentals),” *Sol. Energy Convers. Photoenergy Syst.*, no. January 2007, pp. 1–28, 2007.
- [12] T. Muneer and C. Gueymard, *Solar Radiation and Daylight Models with a chapter on Solar Spectral Radiation*, 2nd ed. Edinburgh, 2004.
- [13] A. Lira-oliver, “Radiación solar invisible y arquitectura Invisible Solar Radiation and Architecture,” pp. 116–124, 2016.
- [14] R. Hulstrom, R. Bird, and C. Riordan, “Spectral solar irradiance data sets for selected terrestrial conditions,” *Sol. Cells*, vol. 15, no. 4, pp. 365–391, 1985, doi: 10.1016/0379-6787(85)90052-3.
- [15] E. Schoffel, “Radiação Solar, Agrometeorologia,” 2010.
http://www.etecbest.com.br/janeladofructicultor/artigos/download/04_TXT_RAD_SOL_COMPILA_ROMERA_2010/RADSOL.pdf (accessed Jan. 25, 2021).
- [16] N. V. Mella, “Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península Ibérica,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [17] P. Courvoisier, “Zur Definition der Sonnenstrahlung,” *Arch. für Meteorol. Geophys. und Bioklimatologie Ser. B*, vol. 5, no. 2, pp. 125–145, 1954, doi: 10.1007/bf02244619.
- [18] C. Fröhlich, “Solar Irradiance Variability Since 1978,” *Space Sci. Rev.*, vol. 125, no. 1–4, pp. 53–65, 2007, doi: 10.1007/s11214-006-9046-5.
- [19] R. Tousey, “The solar constant,” *Nuovo Cim. Ser. 10*, vol. 6, no. 1 Supplement, pp. 413–418, 1957, doi: 10.1007/BF02724798.
- [20] S. M. Stewart, “Spectral Peaks and Wien’s Displacement Law,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 26, no. 4, pp. 689–692, 2012, doi: 10.2514/1.60241.
- [21] M. Andersen, S. J. Gochenour, and S. W. Lockley, “Modelling ‘non-visual’ effects of daylighting in a residential environment,” *Build. Environ.*, vol. 70, pp. 138–149, 2013,

doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.018.

- [22] C. Ragazas, “Planck’s Law is an Exact Mathematical Identity,” 2015.
[https://www.researchgate.net/publication/271076169%0APlanck’s](https://www.researchgate.net/publication/271076169%0APlanck's) (accessed Jan. 27, 2021).
- [23] O. Passon and J. Grebe-Ellis, “Planck’s radiation law, the light quantum, and the prehistory of indistinguishability in the teaching of quantum mechanics,” *Eur. J. Phys.*, vol. 38, no. 3, 2017, doi: 10.1088/1361-6404/aa6134.
- [24] M. A. Cavalcante and R. Haag, “Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck,” *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 27, no. 3, pp. 343–348, 2005, doi: 10.1590/s1806-11172005000300007.
- [25] J. P. Holman, *Transferencia de calor por Radiación*. 1999.
- [26] M. A. Yamasoe and M. de P. Corrêa, “Processos radiativos na atmosfera - Fundamentos,” p. 142, 2016.
- [27] M. N. Rocha and T. G. Fujimoto, “Blue skies and red sunsets (Portugese version),” vol. 3501, 2010.
- [28] R. K. Pradhan, “Does Rayleigh scattering explain the Blueness of Sky ?,” *Sci. Horiz.*, no. August, pp. 28–31, 2015.
- [29] A. Kleber *et al.*, *Atmosfera*, 1st ed. Rio de Janeiro: Observatório Nacional, 2011.
- [30] D. Roberti, *Física da Atmosfera*. Santa Maria, RS - BR: Universidade Federal de Santa Maria, 2010.
- [31] M. R. P. dos S. Pacheco and M. E. M. Helene, “Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂,” *Estud. Avançados*, vol. 4, no. 9, pp. 204–220, 1990, doi: 10.1590/s0103-40141990000200010.
- [32] K.N. Liou, “Chapter 2 Solar radiation at the top of the atmosphere,” *Int. Geophys.*, vol. 84, no. C, pp. 37–64, 2002, doi: 10.1016/S0074-6142(02)80017-1.
- [33] M. H. Unsworth and H. A. McCartney, “Effects of atmospheric aerosols on solar radiation,” *Atmos. Environ.*, vol. 7, no. 12, pp. 1173–1185, 1973, doi: 10.1016/0004-

6981(73)90125-X.

- [34] J. E. Penner, “Aerosols, their Direct and Indirect Effects,” *J. Geophys. Res.*, vol. 91, no. D1, pp. 1089–1096, 1986, doi: 10.1029/JD091iD01p01089.
- [35] E. Ezhova *et al.*, “Direct effect of aerosols on solar radiation and gross primary production in boreal and hemiboreal forests,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, no. 24, pp. 17863–17881, 2018, doi: 10.5194/acp-18-17863-2018.
- [36] J. E. Penner, “Indirect Aerosol Forcing,” *Science (80-.)*, vol. 290, no. 5491, pp. 407a – 407, 2000, doi: 10.1126/science.290.5491.407a.
- [37] P. Tzoumanikas, E. Nikitidou, A. F. Bais, and A. Kazantzidis, “The effect of clouds on surface solar irradiance, based on data from an all-sky imaging system,” *Renew. Energy*, vol. 95, pp. 314–322, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.04.026.
- [38] M. A. Hamdan and N. Gazzawi, “The effect of clouds on solar radiation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 34, no. 1, pp. 29–32, 1993, doi: 10.1016/0196-8904(93)90005-U.
- [39] O. Mansouri, R. Belarbi, and F. Bourbia, “Albedo effect of external surfaces on the energy loads and thermal comfort in buildings,” *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 571–577, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.255.
- [40] M. J. Costa, E. M. Ciências, and D. A. Terra, “Determinação das propriedades das nuvens e aerossóis relevantes para estudos de forçamento radiativo do clima a partir de medidas de satélite,” 2003, pp. 1–83.
- [41] D. H. W. Li, S. W. Lou, and J. C. Lam, “An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation,” *Energy Procedia*, vol. 75, no. May, pp. 388–393, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.399.
- [42] T. Vesala, “Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean,” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 119, no. 3–4, pp. 229–230, 2003, doi: 10.1016/s0168-1923(03)00142-4.
- [43] M. Rosa-Clot and G. M. Tina, “Photovoltaic Electricity,” *Submerg. Float. Photovolt. Syst.*, pp. 13–32, 2018, doi: 10.1016/b978-0-12-812149-8.00002-8.
- [44] A. Martinez-Gracia, I. Arauzo, and J. Uche, “Solar energy availability,” in *Solar*

- Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*, Zaragoza: Elsevier Inc., 2019, pp. 113–149.
- [45] I. Reda and A. A. Nrel, “Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (Revised),” *Natl. Renew. Energy Lab. Nrel/Tp-560-34302*, no. January, pp. 1–56, 2005.
 - [46] J. G. Cerón-Bretón, R. M. Cerón-Bretón, M. Rangel-Marrón, M. Muriel-García, Cordova-QuirozA.V., and A. Estrella-Cahuich, “A comprehensive solar angles simulation and calculation using matlab,” vol. 5, no. 3, pp. 328–336, 2011.
 - [47] J. Sclar, D. Martins, and J. F. Escobedo, “Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal,” *Rev. Bras. Geofis.*, vol. 21, no. 3, pp. 249–258, 2003, doi: 10.1590/s0102-261x2003000300004.
 - [48] A. P. de Souza, J. F. Escobedo, A. D. Pai, and E. N. Gomes, “Estimativa da radiação global incidente em superfícies inclinadas por modelos isotrópicos e índice de claridade,” *Pesqui. Agropecu. Bras.*, vol. 45, no. 4, pp. 339–350, 2010, doi: 10.1590/S0100-204X2010000400001.
 - [49] A. P. Souza, J. F. Escobedo, A. Dal Pai, and E. N. Gomes, “Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 15, no. 3, pp. 277–288, 2011, doi: 10.1590/s1415-43662011000300009.
 - [50] B. Perers, “The solar resource in cold climates,” in *Photovoltaics in Cold Climates*, 1st ed., London: Routledge, 2019, p. 10.
 - [51] M. Mussard, “Solar energy under cold climatic conditions: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. January, pp. 733–745, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.009.
 - [52] H. Asan, “Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials,” *Build. Environ.*, vol. 41, no. 5, pp. 615–620, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.02.020.
 - [53] F. Bilgin and M. Arici, “Effect of phase change materials on time lag, decrement factor and heat-saving,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 132, no. 3, pp. 1102–1105, 2017, doi: 10.12693/APhysPolA.132.1102.

- [54] M. Stewart, J. R. Webster, A. L. Schaefer, N. J. Cook, and S. L. Scott, “Infrared thermography as a non-invasive tool to study animal welfare,” *Anim. Welf.*, vol. 14, no. 4, pp. 319–325, 2005.
- [55] C. Meola and G. M. Carlomagno, “Recent advances in the use of infrared thermography,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 9, 2004, doi: 10.1088/0957-0233/15/9/R01.
- [56] F. Khodayar, S. Sojasi, and X. Maldague, “Infrared thermography and NDT: 2050 horizon,” *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2016, doi: 10.1080/17686733.2016.1200265.
- [57] Y. Y. Hung *et al.*, “Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 64, no. 5–6, pp. 73–112, 2009, doi: 10.1016/j.mser.2008.11.001.
- [58] M. Honner, Z. Vesely, and M. Svantner, “Temperature and heat transfer measurement in continuous reheating furnaces,” *Scand. J. Metall.*, vol. 32, no. 5, pp. 225–232, 2003, doi: 10.1034/j.1600-0692.2003.00645.x.
- [59] R. Gade and T. B. Moeslund, “Thermal cameras and applications: A survey,” *Mach. Vis. Appl.*, vol. 25, no. 1, pp. 245–262, 2014, doi: 10.1007/s00138-013-0570-5.
- [60] P. Herve, J. Cedelle, and I. Negreanu, “Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1016/j.infrared.2010.09.001.
- [61] G. V. Ivanov and V. G. Ivanov, “Temperature and emissivity determination of small-size long-range object’s using staring Thermovision Cameras,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 60, pp. 161–165, 2013, doi: 10.1016/j.infrared.2013.04.009.
- [62] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, and F. G. Bulnes, “Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, pp. 12305–12348, 2014, doi: 10.3390/s140712305.
- [63] N. Ludwig, D. Formenti, M. Gargano, and G. Alberti, “Skin temperature evaluation by

- infrared thermography: Comparison of image analysis methods,” *Infrared Phys. Technol.*, vol. 62, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1016/j.infrared.2013.09.011.
- [64] C. Kuenzer and S. Dech, “Geometric Calibration of Thermographic Cameras,” *Remote Sens. Digit. Image Process.*, vol. 17, pp. 287–313, 2013, doi: 10.1007/978-94-007-6639-6.
- [65] M. F. B. Pereira, “Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: Estudo de caso,” pp. 1–148, 2014.
- [66] M. L. S. LESSA, “Critérios de Sustentabilidade Para Elementos Construtivos – Um Estudo Sobre Telhas ‘Ecológicas’ Empregadas na Construção Civil,” Universidade Federal da Bahia, 2009.
- [67] ABNT-NBR 15220, *Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Brasil, 2003, pp. 1–23.
- [68] ABNT-NBR 15575-5, *Edificações habitacionais - Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas*. Brasil, 2013, pp. 1–63.
- [69] ABNT-NBR 15575-2, *Edificações habitacionais - Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais*. 2013, pp. 1–31.
- [70] L. P. Muniz-Gäal, C. C. Pezzuto, M. F. H. de Carvalho, and L. T. M. Mota, “Eficiência térmica de materiais de cobertura,” *Ambient. Construído*, vol. 18, no. 1, pp. 503–518, 2018, doi: 10.1590/s1678-86212018000100235.
- [71] Brasilit, “Telhas Onduladas de Fibrocimento,” 2021.
<https://www.brasilit.com.br/produtos/telha-fibrocimento-ondulada> (accessed Feb. 24, 2021).
- [72] Eternit, “Telhas de fibrocimento ETERNIT,” 2020.
https://www.eternit.com.br/categoria_produto/telhas-de-fibrocimento/ (accessed Feb. 24, 2021).
- [73] T. da C. C. Coelho, C. E. M. Gomes, and K. A. Dornelles, “Desempenho térmico e absorvência solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes

- processos de envelhecimento natural,” *Ambient. Construído*, vol. 17, no. 1, pp. 147–161, 2017, doi: 10.1590/s1678-86212017000100129.
- [74] K. Martin-Chenut and J. Saldanha, *O caso do amianto: Os limites das soluções locais para um problema de saúde global*, vol. 1, no. 98. 2016.
- [75] V. M. Marques, L. P. Gomes, and A. P. Kern, “Avaliação ambiental do ciclo de vida de telhas de fibrocimento com fibras de amianto ou com fibras de polipropileno,” *Ambient. Construído*, vol. 16, no. 1, pp. 187–201, 2016, doi: 10.1590/s1678-86212016000100068.
- [76] T. Coelho, “Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto,” Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- [77] J. Duarte, “O fibrocimento e a construção sustentável no Brasil,” *Associação Brasileira das Indústrias e Distribuidores de Produtos de Fibrocimento (Abifibro)*, 2019.
- [78] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios - Parte 1: Classificação e Requisitos*. Brasil, 2014, p. 16.
- [79] K. A. Dornelles, R. M. Caram, and E. P. Sichieri, “Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo,” *Paranoá Cad. arquitetura e Urban.*, no. 12, 2015, doi: 10.18830/issn.1679-0944.n12.2014.12212.
- [80] W. Ferreira and E. Martins, “Estudo comparativo de desempenho térmico entre tintas de cor branca aplicadas em coberturas de fibrocimento,” *Anáp. Digit.*, vol. 9, 2019.
- [81] K. A. Dornelles, M. Roriz, V. Roriz, and R. M. Caram, “Desempenho Térmico De Tintas Brancas Com Microesferas Cerâmicas Para Uso Em Coberturas De Edifícios,” *Xi Encac Vii Elacac*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2011, doi: 10.13140/RG.2.1.3678.8960.
- [82] K. L. Uemoto and V. Agopyan, *Pintura à base de cal*, 1st ed. São Paulo, 1992.
- [83] J. E. P. Guimarães, *A cal - fundamentos e aplicações na engenharia civil*, 2nd ed., vol. 1. São Paulo, 2002.
- [84] A. P. Werle, K. Loh, and V. M. John, “Pintura à base de cal como alternativa de revestimento frio,” *Ambient. Construído*, vol. 14, no. 3, pp. 149–157, 2014, doi:

10.1590/s1678-86212014000300012.

- [85] J. E. Rodríguez-Gómez, Y. Q. Silva-Reynoso, V. Varela-Guerrero, A. Núñez-Pineda, and C. E. Barrera-Díaz, “Development of a process using waste vegetable oil for separation of aluminum and polyethylene from Tetra Pak,” *Fuel*, vol. 149, pp. 90–94, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.032.
- [86] K. C. P. da Silva, A. T. Campos, T. Yanagi Junior, D. Cecchin, D. Lourençoni, and J. C. Ferreira, “Reaproveitamento de resíduos de embalagens Tetra Pak-® em coberturas,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 19, no. 1, pp. 58–63, 2015, doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p58-63.
- [87] M. H. de Cerqueira, “Placas e Telhas Produzidas A Partir da Reciclagem do Polietileno/Alumínio Presentes nas Embalagens Tetra Pak.,” 2005.
<http://www.recicleta.com.br/artigos/Telhas.pdf> (accessed Feb. 22, 2021).
- [88] D. C. Araújo, C. R. S. Moraes, and M. E. D. Altides, “Avaliação mecânica e físico-química entre telhas convencionais e alternativas usadas em habitações populares,” *Rev. Eletrônica Mater. e Process.*, vol. 2, pp. 50–56, 2008.
- [89] F. Beer and R. Jonhnsion, *Resistência dos Materiais - Ferdinand P Beer* -, 3rd ed. São Paulo: Pearson Education, 1995.
- [90] C. Schelb, “Avaliação de tipologias construtivas nos critérios de sustentabilidade: estudo de casos – telhas,” Universidade de Brasília, 2016.
- [91] E. Regina, V. Andrade, and G. R. Vasconcelos, “Viabilidade da Inserção no Comércio de Telhas De Fibras Vegetais - Uma Pesquisa De Mercado No Sudoeste Goiano.” Universidade de Rio Verde, pp. 1–34, 2018.
- [92] Onduline, “Telha ecológica onduline clássica,” *Por que escolher a Telha Ecológica Onduline Clássica?*, 2021. <https://br.onduline.com/pt-br/consumidor/produtos/telhas/telha-ecologica-onduline-classica> (accessed Feb. 25, 2021).
- [93] Onduline, “Telhas Ecológicas Onduline,” *Acessórios Onduline*, 2021.
https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/onduline/cat_onduline.pdf (accessed Feb. 25,

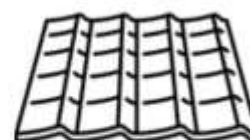
- 2021).
- [94] R. Y. Ynoue, M. S. Reboita, N. T. Boiaski, T. Ambrizzi, and gyrlene a. M. da Silva, “Previsão de Tempo e Clima,” in *Introdução à Meteorologia USP/UNIVESP*, 1st ed., São Paulo: USP/UNIVESP, 2013, pp. 1–20.
 - [95] Weather Spark, “Clima Promédio em Foz do Iguaçu, Brasil.,” *O clima promédio em Foz do Iguaçu*, 2021. <https://es.weatherspark.com/y/29508/Clima-promedio-en-Foz-de-Iguazu-Brasil-durante-todo-el-año> (accessed Feb. 26, 2021).
 - [96] C. Michels, S. Güths, D. L. Marinoski, and R. Lamberts, “Thermal performance and thermal resistance of fibre cement roof tiles: Experimental study,” *Energy Build.*, vol. 231, p. 110569, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110569.
 - [97] G. C. Martins and P. Mendes, “Estudo Comparativo entre Telhas Onduladas de Fibrocimento e Telhas Onduladas Ecológicas.” Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, p. 121, 2018.
 - [98] M. Mahmoodzadeh and R. Fatehi, “Numerical investigation of roofing materials effect on solar heat gain in different external conditions,” *J. Heat Mass Transf. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 41–53, 2019, doi: 10.22075/jhmtr.2019.15089.1211.
 - [99] ABNT 6453/03, “Cal virgem para construção civil - Requisitos,” pp. 28–30, 2003.
 - [100] FLIR®, “Flir® Tg165,” *Thermal Imaging, Nigth Vision and Infrared Camera FLIR System*, 2021. www.flir.com (accessed Feb. 02, 2021).
 - [101] AZ, “88598 AZ 4 channel K Type Temperature Sensor SD card data logger,” 2021. <https://www.az-instrument.com.tw/en/product-616361/4-Channel-K-Thermocouple-SD-Card-Logger-88598-AZ.html> (accessed Feb. 22, 2021).
 - [102] CRESESB, “Irradiação Média Anual Foz do Iguaçu,” 2021. <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data> (accessed Mar. 25, 2021).
 - [103] L. P. Fávero and P. Belfiore, *Manual de Análise de Dados: Estatística e Modelagem Multivariada com Excel, SPSS e STATA*, 1st ed. São Paulo, 2017.
 - [104] O. A. M. Helene and V. Vanin, *Tratamento Estatístico de Dados em Física*

- Experimental*, 2nd ed. São Paulo, 1991.
- [105] F. Appolinário, *Metodologia da Ciência: Filosofia e prática da Pesquisa*, 2nd ed. São Paulo, 2012.
- [106] R. H. Sampieri, C. fernández Collado, and P. B. Lucio, *Metodología de la Investigación*, 6th ed. México D.F, 2014.
- [107] J. H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros*, 2nd ed. São Paulo, 1996.
- [108] D. G. S. de Liz, M. O. Mizgier, and S. Guths, “Análise Experimental Do Comportamento Térmico Do Telhado Verde Extensivo Para Florianópolis,” *XVI Encontro Nac. Tecnol. do Ambient. Construído*, vol. 15, no. 2, pp. 1–14, 2016, doi: 10.24220/2318-0919v15n2a4053.
- [109] K. Dornelles, V. Roriz, and M. Roriz, “Determination of the solar absorptance of opaque surfaces,” *Sun, Wind Archit. - Proc. 24th Int. Conf. Passiv. Low Energy Archit. PLEA 2007*, vol. 3, no. November, pp. 452–459, 2007, doi: 10.13140/RG.2.1.2368.1764.
- [110] L. D. A. Wiermann, “Análise do Ambiente Térmico em Galpões Reduzidos para Aves com Diferentes Materiais de Cobertura - Convencional e Ecológico,” Universidade Federal de São João del Rei, 2017.
- [111] N. S. da S. Reis, A. P. Farias, M. F. N. Vieira, I. de O. Nascimento, and D. R. Pereira, “Análise Comparativa Técnica, Econômica e Ambiental de Telhas Ecológicas,” in *10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental*, 2016, pp. 1–15.

APÊNDICE

APÊNDICE A – REGISTRO EXPERIMENTOS: TEMP. SUPERFICIAL

REGISTRO DE EXPERIMENTOS



PESQUISA: DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHAS SUSTENTÁVEIS

NOME: JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

DATA: 10/12/2020

LUGAR: JARDIM UNIVERSITÁRIO II

HORA: 10:00 H

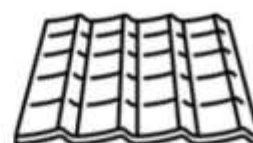
MEMORIAL DE ENSAIOS

TIPO DE TELHA	TEMPERATURA [°C]
FIBROCIMENTO SEM AMIANTO - CINZA	54.2
ECOLÓGICA FIBRA VEGETAL	70.5
ECOLÓGICA TETRA PAK	50.9
FIBROCIMENTO COM REVESTIMENTO DE CAL	45.4

OBSERVAÇÕES/COMENTÁRIOS

TEMPERATURA AMBIENTE 29°C

REGISTRO DE EXPERIMENTOS



PESQUISA: DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHAS SUSTENTÁVEIS

NOME: JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

DATA: 10/12/2020

LUGAR: JARDIM UNIVERSITÁRIO II

HORA: 13:30 H

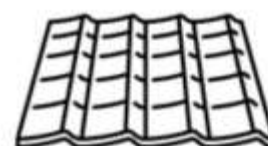
MEMORIAL DE ENSAIOS

TIPO DE TELHA	TEMPERATURA [°C]
FIBROCIMENTO SEM AMIANTO - CINZA	58.7
ECOLÓGICA FIBRA VEGETAL	70.0
ECOLÓGICA TETRA PAK	52.2
FIBROCIMENTO COM REVESTIMENTO DE CAL	43.4

OBSERVAÇÕES/COMENTÁRIOS

TEMPERATURA AMBIENTE 32°C

REGISTRO DE EXPERIMENTOS



PESQUISA: DESEMPENHO TÉRMICO DE TELHAS SUSTENTÁVEIS

NOME: JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

DATA: 10/12/2020

LUGAR: JARDIM UNIVERSITÁRIO II

HORA: 15:00 H

MEMORIAL DE ENSAIOS

TIPO DE TELHA	TEMPERATURA [°C]
FIBROCIMENTO SEM AMIANTO - CINZA	59.5
ECOLÓGICA FIBRA VEGETAL	68.0
ECOLÓGICA TETRA PAK	54.6
FIBROCIMENTO COM REVESTIMENTO DE CAL	44.7

OBSERVAÇÕES/COMENTÁRIOS

TEMPERATURA AMBIENTE 32°C

APÊNCIDE B – REGISTRO DE EXPERIMENTOS: TEMPERATURA
SUPERFICIAL EM REGIME TRANSIENTE

Telha de Fibrocimento sem Amianto (Cinza)

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	10:06:21	10s	55.4	55.3	55.4	55.6	C
AT	2021-01-13	10:06:31	10s	55.3	55.0	54.8	55.6	C
AT	2021-01-13	10:06:41	10s	55.4	55.3	55.3	55.6	C
AT	2021-01-13	10:06:51	10s	55.3	55.2	54.9	55.5	C
AT	2021-01-13	10:07:01	10s	55.2	55.2	54.9	55.5	C
AT	2021-01-13	10:07:11	10s	55.4	55.1	53.7	55.5	C

Telha Ecológica de Fibra Vegetal

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	10:11:04	10s	70.3	70.3	70.4	70.3	C
AT	2021-01-13	10:11:14	10s	71.6	71.5	71.6	71.4	C
AT	2021-01-13	10:11:24	10s	71.3	71.2	71.2	71.2	C
AT	2021-01-13	10:11:34	10s	70.5	70.2	70.4	71.7	C
AT	2021-01-13	10:11:44	10s	71.4	71.4	71.2	71.4	C
AT	2021-01-13	10:11:54	10s	71.5	71.6	71.5	71.6	C

Telha Ecológica Tetra Pak

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	10:16:13	10s	49.8	49.6	50.1	50.1	C
AT	2021-01-13	10:16:23	10s	48.8	48.9	49.1	49.6	C
AT	2021-01-13	10:16:33	10s	49.3	49.5	49.5	49.5	C
AT	2021-01-13	10:16:43	10s	49.9	49.8	45.8	49.8	C
AT	2021-01-13	10:16:53	10s	50.0	49.9	50.0	48.9	C
AT	2021-01-13	10:17:03	10s	49.9	48.9	49.6	49.4	C

Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Cal

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	10:23:17	10s	44.2	43.9	43.9	44.1	C
AT	2021-01-13	10:23:27	10s	43.6	45.7	44.2	45.2	C
AT	2021-01-13	10:23:37	10s	44.2	45.3	45.2	45.2	C
AT	2021-01-13	10:23:47	10s	45.1	45.0	44.2	45.3	C
AT	2021-01-13	10:23:57	10s	43.5	43.2	44.9	43.6	C
AT	2021-01-13	10:24:07	10s	43.8	43.6	44.1	44.2	C

Telha de Fibrocimento sem Amianto (Cinza)

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	13:33:07	10s	56.4	56.8	58.4	58.1	C
AT	2021-01-13	13:33:17	10s	56.3	56.1	57.4	57.6	C
AT	2021-01-13	13:33:27	10s	57.0	57.2	56.9	56.7	C
AT	2021-01-13	13:33:37	10s	56.4	56.4	55.9	57.6	C
AT	2021-01-13	13:33:47	10s	58.3	57.8	58.4	58.4	C
AT	2021-01-13	13:33:57	10s	58.4	58.4	57.9	58.3	C

Telha Ecológica de Fibra Vegetal

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	13:38:46	10s	70.2	71.3	71.3	71.9	C
AT	2021-01-13	13:38:56	10s	69.8	70.6	70.9	71.2	C
AT	2021-01-13	13:39:06	10s	70.6	70.2	69.9	72.1	C
AT	2021-01-13	13:39:16	10s	71.1	71.9	72.1	70.2	C
AT	2021-01-13	13:39:26	10s	70.3	70.0	70.2	70.2	C
AT	2021-01-13	13:39:36	10s	69.9	70.4	72.0	69.9	C

Telha Ecológica Tetra Pak

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	13:45:02	10s	50.3	51.6	52.2	51.8	C
AT	2021-01-13	13:45:12	10s	51.1	49.9	50.3	50.8	C
AT	2021-01-13	13:45:22	10s	52.2	51.9	51.4	51.6	C
AT	2021-01-13	13:45:32	10s	49.9	48.3	49.6	49.6	C
AT	2021-01-13	13:45:42	10s	52.9	52.5	50.3	51.5	C
AT	2021-01-13	13:45:52	10s	52.2	52.5	53.4	51.9	C

Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Cal

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	13:49:14	10s	45.5	44.2	45.1	44.9	C
AT	2021-01-13	13:49:24	10s	45.5	45.6	44.3	46.1	C
AT	2021-01-13	13:49:34	10s	44.1	44.9	45.6	45.1	C
AT	2021-01-13	13:49:44	10s	43.9	43.2	44.2	43.5	C
AT	2021-01-13	13:49:54	10s	45.2	44.9	45.3	45.6	C
AT	2021-01-13	13:50:04	10s	44.9	45.3	45.8	45.7	C

Telha de Fibrocimento sem Amianto (Cinza)

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	15:03:29	10s	57.3	57.9	56.5	56.5	C
AT	2021-01-13	15:03:39	10s	56.2	56.9	56.5	56.9	C
AT	2021-01-13	15:03:49	10s	56.5	57.8	57.2	56.3	C
AT	2021-01-13	15:03:59	10s	57.8	57.3	57.5	56.9	C
AT	2021-01-13	15:04:09	10s	57.2	57.5	57.5	56.9	C
AT	2021-01-13	15:04:19	10s	56.9	57.1	57.5	57.2	C

Telha Ecológica de Fibra Vegetal

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	15:08:22	10s	69.4	70.2	70.5	69.9	C
AT	2021-01-13	15:08:32	10s	70.3	71.4	71.0	70.5	C
AT	2021-01-13	15:08:42	10s	69.9	69.8	70.5	70.3	C
AT	2021-01-13	15:08:52	10s	70.1	72.2	70.3	69.9	C
AT	2021-01-13	15:09:02	10s	70.2	70.0	71.3	70.5	C
AT	2021-01-13	15:09:12	10s	70.3	71.4	69.9	70.2	C

Telha Ecológica Tetra Pak

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	15:13:26	10s	53.5	53.9	54.2	52.2	C
AT	2021-01-13	15:13:36	10s	54.5	53.9	54.4	54.3	C
AT	2021-01-13	15:13:46	10s	53.9	54.2	54.4	54.3	C
AT	2021-01-13	15:13:56	10s	52.1	52.9	53.1	52.8	C
AT	2021-01-13	15:14:06	10s	53.1	53.5	54.2	53.5	C
AT	2021-01-13	15:14:16	10s	54.5	53.5	53.1	53.5	C

Telha de Fibrocimento sem Amianto com Revestimento de Cal

MN/AT	date	time	int	1ch	2ch	3ch	4ch	unit
AT	2021-01-13	15:19:08	10s	42.7	43.9	43.4	44.3	C
AT	2021-01-13	15:19:18	10s	42.2	42.5	42.5	43.4	C
AT	2021-01-13	15:19:28	10s	42.7	42.9	42.5	43.1	C
AT	2021-01-13	15:19:38	10s	44.4	43.6	43.5	44.2	C
AT	2021-01-13	15:19:48	10s	43.1	43.5	44.2	43.4	C
AT	2021-01-13	15:19:58	10s	42.6	42.5	43.1	42.3	C

APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA DE FIBROCIMENTO CINZA

TEMPERATURAS TELHA FIBROCIMENTO CINZA - 10:00 H

Média	53,3
Desvio Padrão	1,3
Variância	1,8
Limite Máximo	54,7
Limite Mínimo	52,0
Temperatura Superficial Máxima	58,5
Temperatura Superficial Mínima	51,1

TEMPERATURAS TELHA FIBROCIMENTO CINZA - 13:30 H

Média	54,6
Desvio Padrão	1,6
Variância	2,5
Limite Máximo	56,2
Limite Mínimo	53,0
Temperatura Superficial Máxima	58,4
Temperatura Superficial Mínima	52,1

TEMPERATURAS TELHA FIBROCIMENTO CINZA - 15:00 H

Média	55,5
Desvio Padrão	0,9
Variância	0,7
Limite Máximo	56,4
Limite Mínimo	54,7
Temperatura Superficial Máxima	57,9
Temperatura Superficial Mínima	54,4



APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA BRANCA

TEMPERATURAS TELHA FIBROCIMENTO BRANCA- 10:00 H

Média	42,2
Desvio Padrão	1,3
Variância	1,7
Limite Máximo	43,5
Limite Mínimo	40,9
Temperatura Superficial Máxima	45,7
Temperatura Superficial Mínima	39,6

TEMPERATURAS TELHA FIBROCIMENTO BRANCA- 13:30 H

Média	42,6
Desvio Padrão	1,6
Variância	2,4
Limite Máximo	44,2
Limite Mínimo	41,1
Temperatura Superficial Máxima	46,1
Temperatura Superficial Mínima	40,2

TEMPERATURAS TELHA FIBROCIMENTO BRANCA- 15:00 H

Média	42,4
Desvio Padrão	0,8
Variância	0,6
Limite Máximo	43,2
Limite Mínimo	41,6
Temperatura Superficial Máxima	44,4
Temperatura Superficial Mínima	40,8



APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA TETRA PAK

TEMPERATURAS TELHA TETRA PAK- 10:00 H

Média	47,7
Desvio Padrão	1,7
Variância	2,9
Limite Máximo	49,4
Limite Mínimo	45,9
Temperatura Superficial Máxima	50,1
Temperatura Superficial Mínima	44,8

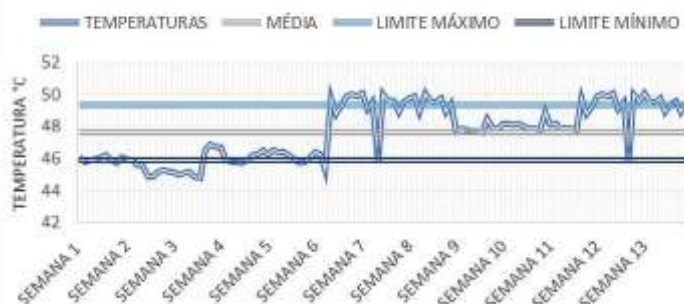
TEMPERATURAS TELHA TETRA PAK - 13:30 H

Média	49,3
Desvio Padrão	1,3
Variância	1,6
Limite Máximo	50,6
Limite Mínimo	48,0
Temperatura Superficial Máxima	53,4
Temperatura Superficial Mínima	45,8

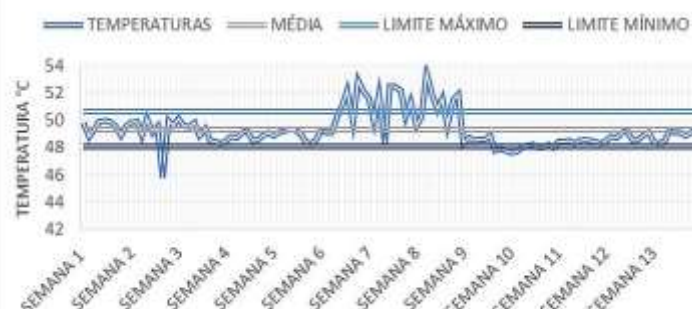
TEMPERATURAS TELHA TETRA PAK - 15:00 H

Média	51,6
Desvio Padrão	1,3
Variância	1,7
Limite Máximo	52,9
Limite Mínimo	50,3
Temperatura Superficial Máxima	54,5
Temperatura Superficial Mínima	49,9

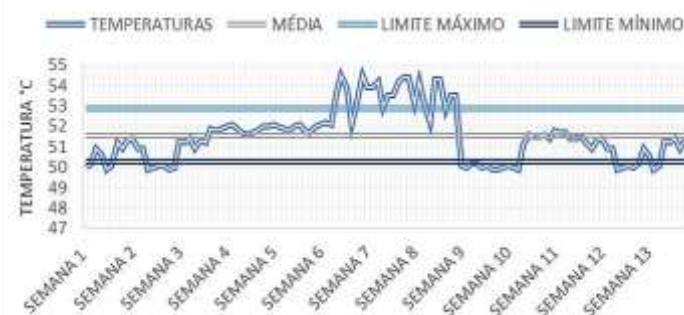
DESVIO PADRÃO TELHA TETRA PAK- 10:00 H



DESVIO PADRÃO TELHA TETRA PAK- 13:30 H



DESVIO PADRÃO TELHA TETRA PAK- 15:00 H



APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA TELHA FIBRA VEGETAL

TEMPERATURAS TELHA FIBRA VEGETAL - 10:00 H

Média	67,9
Desvio Padrão	2,0
Variância	4,1
Limite Máximo	69,9
Limite Mínimo	65,8
Temperatura Superficial Máxima	71,7
Temperatura Superficial Mínima	64,8

TEMPERATURAS TELHA FIBRA VEGETAL - 13:30 H

Média	68,6
Desvio Padrão	1,3
Variância	1,6
Limite Máximo	69,9
Limite Mínimo	67,4
Temperatura Superficial Máxima	72,1
Temperatura Superficial Mínima	66,3

TEMPERATURAS TELHA FIBRA VEGETAL - 15:00 H

Média	68,8
Desvio Padrão	1,0
Variância	1,0
Limite Máximo	69,8
Limite Mínimo	67,8
Temperatura Superficial Máxima	72,2
Temperatura Superficial Mínima	67,4



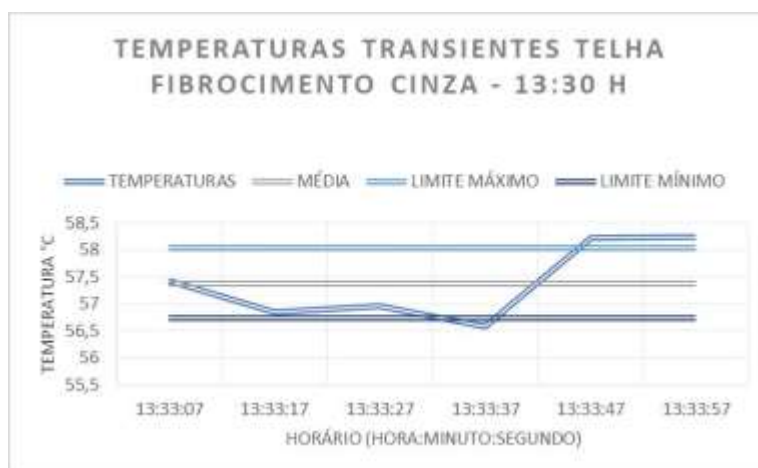
APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES

TELHA FIBROCIMENTO CINZA

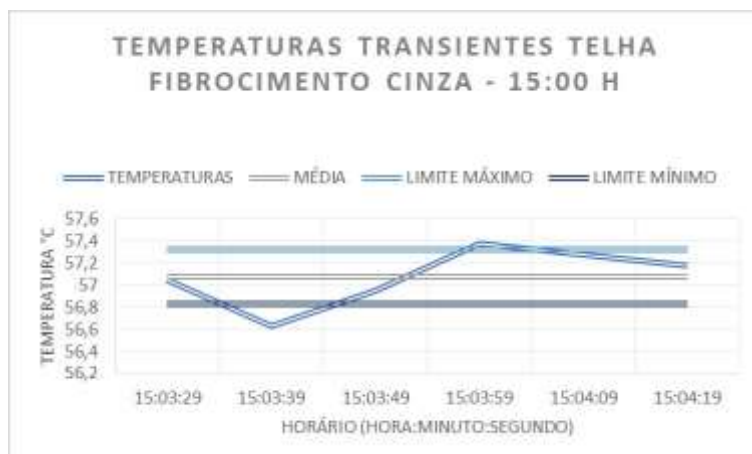
TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO CINZA - 10:00 H	
Média	55,2
Desvio Padrão	0,2
Variância	0,0
Limite Máximo	55,4
Limite Mínimo	55,1
Temperatura Superficial Máxima	55,4
Temperatura Superficial Mínima	54,9



TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO CINZA - 13:30 H	
Média	57,4
Desvio Padrão	0,7
Variância	0,4
Limite Máximo	58,0
Limite Mínimo	56,7
Temperatura Superficial Máxima	58,3
Temperatura Superficial Mínima	56,6



TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO CINZA - 15:00 H	
Média	57,1
Desvio Padrão	0,2
Variância	0,1
Limite Máximo	57,3
Limite Mínimo	56,8
Temperatura Superficial Máxima	57,4
Temperatura Superficial Mínima	56,6



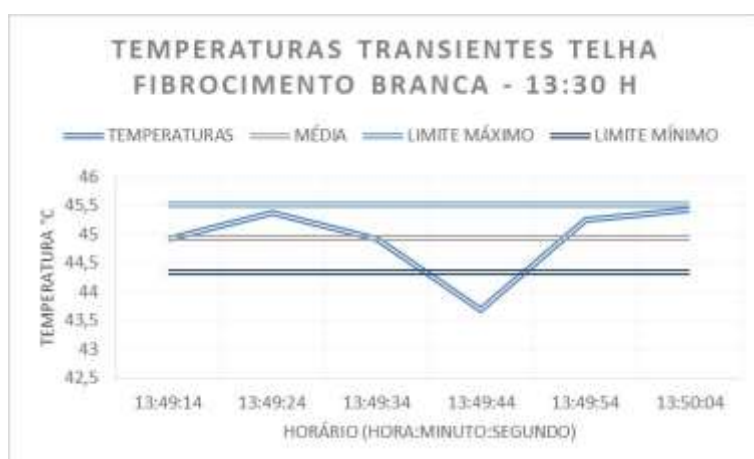
APÊNDICE H – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES

TELHA FIBROCIMENTO BRANCA

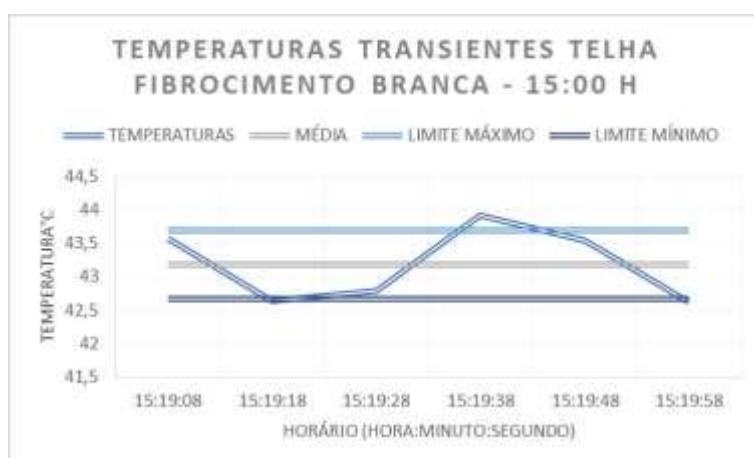
TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO BRANCA - 10:00 H	
Média	44,38333333
Desvio Padrão	0,479727932
Variância	0,230138889
Limite Máximo	44,86306127
Limite Mínimo	43,9036054
Temperatura Superficial Máxima	44,975
Temperatura Superficial Mínima	43,8



TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO BRANCA - 13:30 H	
Média	44,93333333
Desvio Padrão	0,585709446
Variância	0,343055556
Limite Máximo	45,51904278
Limite Mínimo	44,34762389
Temperatura Superficial Máxima	45,425
Temperatura Superficial Mínima	43,7



TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBROCIMENTO BRANCA - 15:00 H	
Média	43,1875
Desvio Padrão	0,513312364
Variância	0,263489583
Limite Máximo	43,70081236
Limite Mínimo	42,67418764
Temperatura Superficial Máxima	43,925
Temperatura Superficial Mínima	42,625

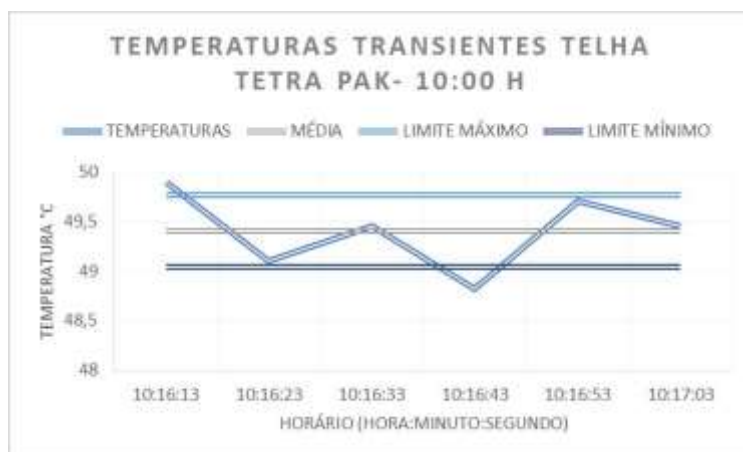


APÊNDICE I – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES

TELHA TETRA PAK

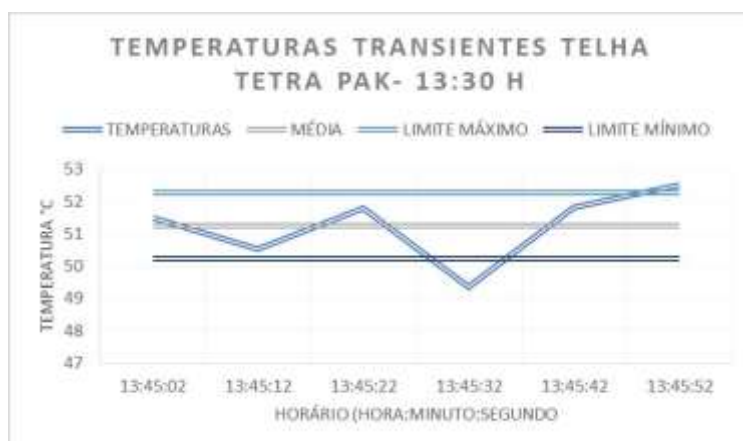
**TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA TETRA PAK
- 10:00 H**

Média	49,40416667
Desvio Padrão	0,357192953
Variância	0,127586806
Limite Máximo	49,76135962
Limite Mínimo	49,04697371
Temperatura Superficial Máxima	49,9
Temperatura Superficial Mínima	48,825



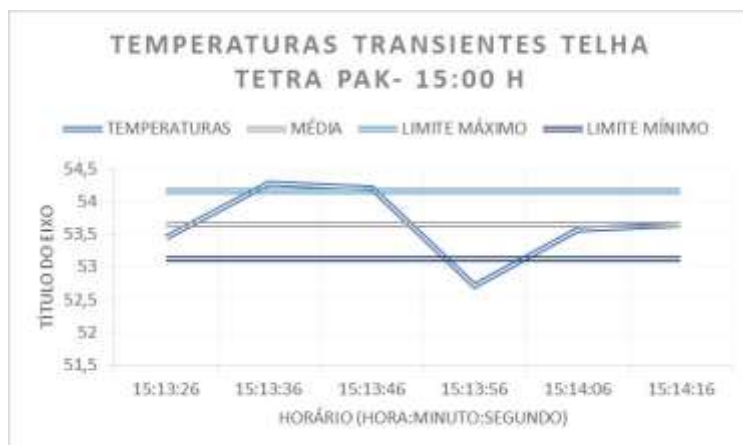
**TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA TETRA PAK
- 13:30 H**

Média	51,2375
Desvio Padrão	1,026802277
Variância	1,054322917
Limite Máximo	52,26430228
Limite Mínimo	50,21069772
Temperatura Superficial Máxima	52,5
Temperatura Superficial Mínima	49,35



**TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA TETRA PAK
- 15:00 H**

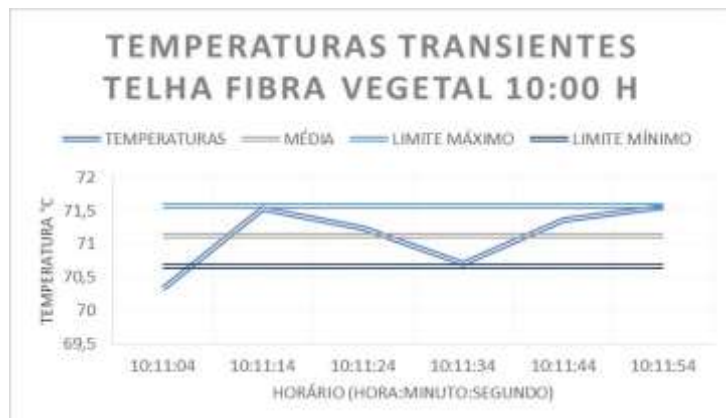
Média	53,64583333
Desvio Padrão	0,51547241
Variância	0,265711806
Limite Máximo	54,16130574
Limite Mínimo	53,13036092
Temperatura Superficial Máxima	54,275
Temperatura Superficial Mínima	52,725



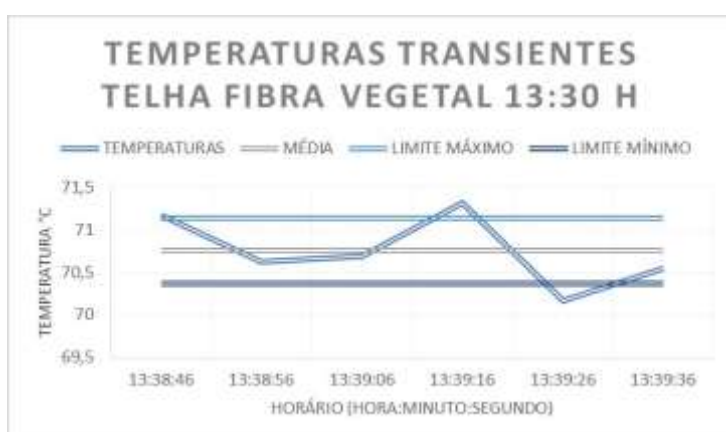
APÊNDICE J – ANÁLISE ESTATÍSTICA DADOS TRANSIENTES

TELHA FIBRA VEGETAL

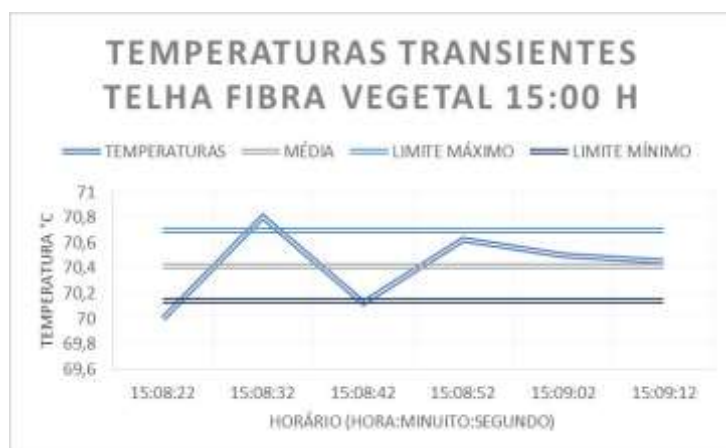
TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBRA VEGETAL - 10:00 H	
Média	71,1125
Desvio Padrão	0,451098197
Variância	0,203489583
Limite Máximo	71,5635982
Limite Mínimo	70,6614018
Temperatura Superficial Máxima	71,55
Temperatura Superficial Mínima	70,325



TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBRA VEGETAL - 13:30 H	
Média	70,75833333
Desvio Padrão	0,387208672
Variância	0,149930556
Limite Máximo	71,14554201
Limite Mínimo	70,37112466
Temperatura Superficial Máxima	71,325
Temperatura Superficial Mínima	70,175



TEMPERATURAS TRANSIENTES TELHA FIBRA VEGETAL - 15:00 H	
Média	70,41666667
Desvio Padrão	0,276008253
Variância	0,076180556
Limite Máximo	70,69267492
Limite Mínimo	70,14065841
Temperatura Superficial Máxima	70,8
Temperatura Superficial Mínima	70



ANEXOS

ANEXO A - FATURAS E NOTAS FISCAIS DE COMPRA DAS TELHAS

MUNDO DAS TELHAS
AVENIDA CARLOS GOMES, 974 (45)3528-9229

DATA: 09/10/20
HORA: 13:41:15

FED. VENDA: 2139

CLIENTE: 11552 JHON STEVEN NAVARRO
ENDERECO: RUA DONA LOTTE KNOF DOS CAMPOS 438 B. JO UNIVERSITARIO
CIDADE: FOZ DO IGUAU
CNPJ: 000000000000000000 CPF: 000000000000000000 VENDEDOR: GUILHERME 999167719
TELEFONE: 0000000000 - 45991170873

COD.	NOME DO PRODUTO	MARCA	REFER.	LOCAL	UNIT.	QTD	V.UNIT	V. TOTAL
53063	TELHA OND.1,83X1,10X6MM S/ABRANTO BRASILIT				UNI	2,00	R\$ 42,50	R\$ 85,00
12751	TELHA ONDULINE TRADICIONAL VERDE				UN	1,00	R\$ 82,90	R\$ 82,90
27663	TAXA DE ENTREGA				UND	1,00	R\$ 30,00	R\$ 30,00
							PRODUTO:	R\$ 177,90
SALDO DEVEDOR:						R\$ 177,90	DESLOC.:	R\$ 0,00
DESCONTO:						R\$ 3,44	M.DESCA:	R\$ 0,00
							TOTAL:	R\$ 177,90

DOLAR R\$ 32,94 GUINHEU G\$ 265.522,37 PESO P\$ 2.505,63

OBSERVAÇÃO:
COND. PAGAMENTO: PRESTACAO-60H 08/11/20 R\$ 177,90

NOTA PROMISSORIA

Vencimento em 08/11/20 VALOR R\$ 177,90

Aos 08 dias do mes de novembro de 2020 pagarei por esta NOTA PROMISSORIA a MUNDO DAS TELHAS, CNPJ 35.715.874/0001-00 a sua ordem na cidade de FOZ DO IGUAU-PR a quantia de Cento e Setenta e Sete Reais e Noventa Centavos. em moeda corrente do pais, e por qualquer atraso que ocorrer, pagarei R\$ 183,24 mais juro de mora de ao mes.

FOZ DO IGUAU-PR, 09 de outubro de 2020

Fiador: JHON STEVEN NAVARRO
CPF: 000000000000000000 RG:

RECEBEMOS DE T SAKAUE COMERCIO DE MATERIAIS DE CONSTRUCAO LTDA OS PRODUTOS E/OU SERVIÇOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL ELETRÔNICA INDICADA ABAIXO. EMISSÃO: 13/10/2020 VALOR TOTAL: R\$ 104,95 DESTINATÁRIO: JHON STEVEN NAVARRO HOYOS - Rua Dona Lotte Knop Campos, S/N Loteamento Universitario das Americas FOZ DO IGUAÇU-PR.

DATA DE RECEBIMENTO: IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR:

NF-e

Nº. 000.000.299

Série 001

IDENTIFICAÇÃO DO EMITENTE

T SAKAUE COMERCIO DE MATERIAIS DE CONSTRUCAO LTDA
Rua Joao Felipe Xavier da Silva, 683
Sao Bernardo - 13030-680
CAMPINAS - SP Fone/Fax:

DANFE

Documento Auxiliar da Nota Fiscal Eletrônica

0 - ENTRADA
1 - SAÍDA

Nº. 000.000.299

Série 001

Folha 1/1



CHAVE DE ACESSO
3520 1034 6520 9000 0117 5500 1000 0002 9912 2128 6792
Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e
www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora
PROTOCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO
135200919051336 - 13/10/2020 15:20:04

NATUREZA DA OPERAÇÃO
Venda de mercadoria

INSCRIÇÃO ESTADUAL
122191500117

INSCRIÇÃO ESTADUAL DO SUBST. TRIBUT
CNPJ
34.652.090/0001-17

DESTINATÁRIO / REMETENTE

NOME / RAZÃO SOCIAL
JHON STEVEN NAVARRO HOYOS

CNPJ / CPF
012.486.049-46

DATA DA EMISSÃO
13/10/2020

ENDEREÇO
Rua Dona Lotte Knop Campos, S/N

Bairro / Distrito
Loteamento Universitario das Americas

CEP
85870-620

DATA DA SAÍDA

MUNICÍPIO
FOZ DO IGUAÇU

UF / FONE / FAX
PR 45991170873

INSCRIÇÃO ESTADUAL
HORA DA SAÍDA

FATURA / PAGAMENTO

Pagamento (1): À Prazo - Outros - R\$ 104,95 - Fatura: 299, Valor Original: R\$ 104,95, Valor Líquido: R\$ 104,95

CÁLCULO DO IMPOSTO

BASE DE CÁLCULO ICMS	VALOR DO ICMS	BASE DE CÁLC. ICMS ST	VALOR DO ICMS ST	VALOR DO II	VALOR TOTAL PRODUTOS
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,05
VALOR DO FRETE	VALOR DO SEGURO	DESCONTO	OUTRAS DESPESAS	VALOR TOTAL DO IPI	VALOR TOTAL DA NOTA
48,88	0,00	2,95	0,00	0,00	104,95

TRANSPORTADOR / VOLUMES TRANSPORTADOS

NOME / RAZÃO SOCIAL
RODONALVES TRANSPORTES E ENCOMENDAS LTDA

FRETE POR CONTA
(0) do Remetente (CIF)

CODIGO ANTT

PLACA DO VEÍCULO

UF
SP

CNPJ / CPF
44.914.992/0032-34

ENDEREÇO
ALFREDO VIEIRA ALVES

MUNICÍPIO
CAMPINAS

UF
SP

INSCRIÇÃO ESTADUAL
244762584116

QUANTIDADE
1

ESPECIE
VOLUME

MARCA

NUMERAÇÃO

PESO BRUTO
13,000

PESO LÍQUIDO
13,000

DADOS DOS PRODUTOS / SERVIÇOS

CODIGO PRODUTO	DESCRIÇÃO DO PRODUTO / SERVIÇO	NCM/SH	QUANTIDADE	CFOP	UN	QUANT	VALOR UNIT	VALOR TOTAL	ICMS	VALOR ICMS	ALIQ. ICMS	VALOR IPI	ALIQ. IPI
362	TELHA ECOLOGICA 2,15 X 0,95 X 0,06M - IBI Nº Ped. Compra: 40696, Item Ped. Compra: 1	69051000	0102	6108	PC	1,0000	59,05	59,05	0,00	0,00	0,00		

DADOS ADICIONAIS

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

RESERVADO AO FISCO

Inf. Contribuinte: DOCUMENTO EMITIDO POR ME OU EPP OPTANTE PELO SIMPLES NACIONAL. LEI COMPLEMENTAR 123/2016. NÃO GERA DIREITO A CREDITO FISCAL DE IIS E IPI. O MATERIAL DEVERA SER CONFERIDO NO ATO DA ENTREGA/RETIRADA. NÃO ACEITAMOS RECLAMAÇÕES POSTERIORES.

Valor Aproximado dos Tributos: R\$ 9,57 (Fonte: IBPT)

Assinatura em 13/10/2020 às 15:30:36

Assinatura em 13/10/2020 às 15:30:36

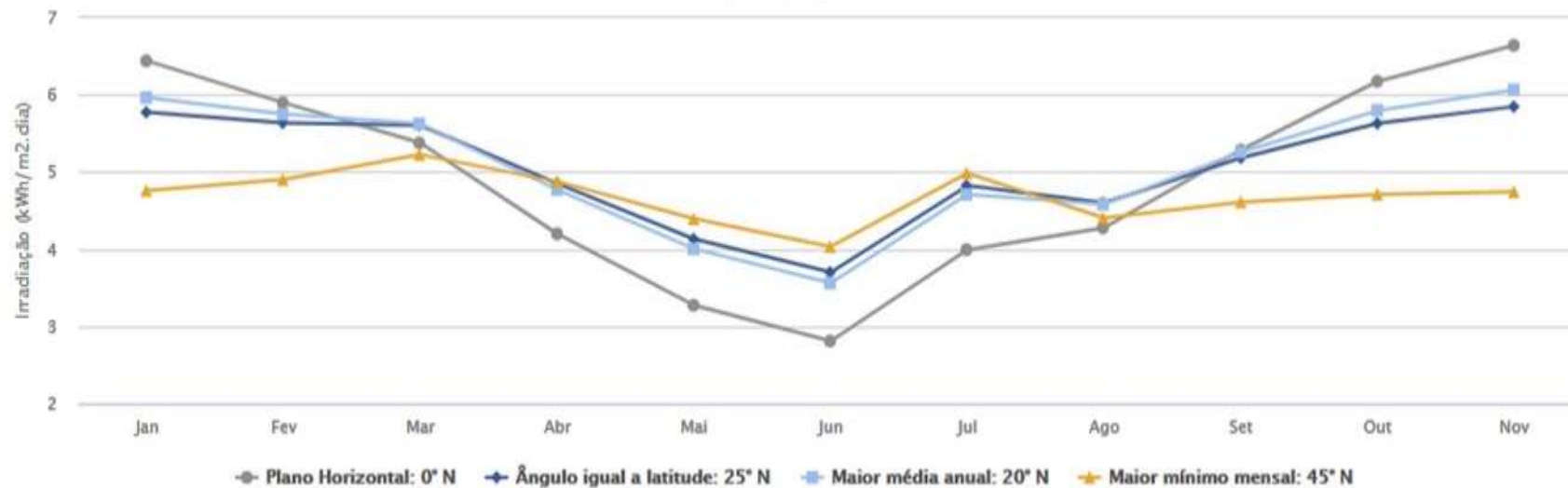
ANEXO B - IRRADIÂNCIA MÉDIA ANUAL DE FOZ DO IGUAÇU

Estação: Foz do Iguaçu
Município: Foz do Iguaçu, PR - BRASIL
Latitude: 25,401° S
Longitude: 54,549° O
Distância do ponto de ref. (25,401° S; 54,549° O) : 0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	6,44	5,90	5,38	4,20	3,27	2,81	3,03	3,99	4,28	5,28	6,18	6,64	4,78	3,83
✓	Ângulo igual a latitude	25° N	5,77	5,63	5,61	4,85	4,13	3,70	3,92	4,82	4,60	5,18	5,63	5,85	4,97	2,14
✓	Maior média anual	20° N	5,96	5,75	5,62	4,77	4,00	3,56	3,78	4,71	4,58	5,26	5,80	6,06	4,99	2,50
✓	Maior mínimo mensal	45° N	4,76	4,90	5,22	4,88	4,39	4,03	4,22	4,98	4,40	4,61	4,71	4,74	4,66	1,19

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Foz do Iguaçu–Foz do Iguaçu, PR-BRASIL

25,401° S; 54,549° O



Fonte: [102]